

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2017

Pavel Hanzálek



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

ANALÝZA SPEKTRA HOUSLÍ

SPECTRUM ANALYSIS OF THE VIOLIN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Hanzálek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2017



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Pavel Hanzálek

ID: 174451

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Analýza spektra houslí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte měření frekvenčního spektra houslí různých rozměrů, různé kvality a stáří korpusu, (dřeva) s různými typy kovových a střevoových strun. V programu Matlab vytvořte funkci pro porovnání frekvenčních spekter vybraných tónů u různých druhů smyků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GEIST, B. Akustika - jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi. Praha: MUZIKUS s.r.o., 2005. ISBN 978-8086253312.

[2] SYROVÝ, V. Hudební akustika. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.

[3] CREMER, L. The Physics of the Violin, The MIT Press, 1984. ISBN 978-0262031028.

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

Konzultant:

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.

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na problematiku analýzy zvukového spektra a směrových charakteristik u houslí. Začátek práce pojednává o vývoji houslí, obecně o barvě zvuku a směrových charakteristikách. Teoretická část se také zabývá jednotlivými typy zvukových spekter a obecně o LPC analýze. Praktická část se zabývá již praktickými úkoly práce jako je popis aplikace vytvořené v programu MATLAB pro zkoumání časového spektra tónů, FFT spekter, formantů pomocí LPC analýzy a zobrazení směrových charakteristik. Dále se zabývá popisem metody, postupem snímání a měření dvou rozdílných houslí s odlišnými typy strun a stáří korpusu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vývoj houslí, zvukové spektrum, spektrální analýza, spektrogram, barva zvuku, směrové charakteristiky, LPC analýza

ABSTRACT

This work focuses on the problems of sound spectrum analysis and directional characteristics of the violin. The beginning of the work deals with the development of the violin, generally about timbre and directional characteristics. The theoretical part also deals with different types of sound spectra and LPC analysis on general. The practical part deals with practical tasks of work such as a description of the application created in MATLAB for examination of the time spectrum of tones, FFT spectra, formants by LPC analysis and display of directional characteristics. It also deals with the describing the methods, the process of sensing and measuring two different violins with different types of strings and age of corpus.

KEYWORDS

Evolution of the violin, sound spectrum, spectral analysis, spectrogram, timbre, directional characteristics, LPC analysis

HANZÁLEK, P. *Analýza spektra houslí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 77s. Vedoucí bakalářské práce MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma Analýza spektra houslí 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

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc při měření a podnětné návrhy k práci. Také bych chtěl poděkovat doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za odborné konzultace a pomoc při měření.

V Brně dne

.....

podpis autora

Experimentální část této bakalářské práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

ÚVOD	14
1 HISTORIE HOUSLÍ	15
1.1 Konstrukce houslí a smyčce	15
1.2 Vznik tónu.....	16
1.3 Rozsah nástroje	18
1.4 Barva zvuku	18
1.5 Smyčcové techniky	19
1.6 Směrové charakteristiky	20
1.6.1 Vyzařovací vlastnosti nástrojů.....	20
1.6.2 Rychlostní potenciál	22
1.6.3 Činitel směrovosti	22
1.6.4 Index směrovosti.....	22
2 ZVUKOVÉ SPEKTRUM	23
2.1 Spektrum diskrétní.....	23
2.2 Spektrum spojité	24
2.3 Spektrum smíšené	24
2.4 Spektrum houslí	25
2.5 Lineární predikce	25
3 METODIKA MĚŘENÍ	26
3.1 Způsoby akustických měření nástrojů	26
3.2 Zahrané tóny	27
3.3 Jednotlivé smyky	27
3.4 Podmínky na hráče při nahrávání	28
4 PRAKTICKÁ REALIZACE MĚŘENÍ	29
4.1 Naměřené nástroje	29
4.1.1 Mechanické rozměry nástrojů.....	30
4.1.2 Použité struny a jejich vliv na barvu zvuku	31

4.2	Mikrofonní pole	32
4.3	Popis prvků měřící soustavy	33
4.4	Průběh měření	34
4.4.1	Souhrn naměřených vzorků	34
5	REALIZACE V PROSTŘEDÍ MATLAB	36
5.1	Aplikace	36
5.1.1	Funkce Spektrogram	37
5.1.2	Funkce FFT a LPC	38
5.1.3	Funkce Směrové charakteristiky	39
5.1.4	Funkce Porovnání vyšších harmonických složek	40
6	NAMĚŘENÁ DATA	41
6.1	Výběr vzorků	41
6.2	Spektrogramy	41
6.2.1	Detaché v dynamice piano - 1. poloha	42
6.2.2	Sul ponticello v dynamice forte - 1. poloha	43
6.2.3	Sul tasto v dynamice piano - 1. poloha	44
6.2.4	Spiccato v dynamice forte - 3. poloha	46
6.2.5	Detaché v dynamice mezzoforte - 5. poloha	47
6.3	Porovnání FFT	49
6.3.1	Détaché v dynamice piano - 1. poloha	49
6.3.2	Sul ponticello v dynamice forte - 1. poloha	50
6.3.3	Sul tasto v dynamice piano - 1. poloha	51
6.3.4	Spiccato v dynamice forte - 3. poloha	52
6.3.5	Détaché v dynamice mezzoforte - 5. poloha	53
6.4	Porovnání LPC	54
6.4.1	Détaché v dynamice piano - 1. poloha	56
6.4.2	Sul ponticello v dynamice forte - 1. poloha	57
6.4.3	Spiccato v dynamice forte - 3. poloha	59
6.4.4	Détaché v dynamice mezzoforte - 5. poloha	60

6.5	Směrové charakteristiky	62
6.5.1	Détaché v dynamice forte	62
6.5.2	Sul ponticello v dynamice forte	63
6.5.3	Staccato v dynamice forte	64
6.5.4	Sautillé v dynamice forte	66
6.5.5	Spiccato v dynamice forte	67
6.5.6	Shrnutí naměřených výsledků	68
7	ZÁVĚR	70
7.1	Shrnutí	70
8	DOPORUČENÍ	71
	LITERATURA	72
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	73
	SEZNAM PŘÍLOH	74
A	FORMANTOVÉ OBLASTI	75
B	OBSAH PŘILOŽENÉHO CD	77

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Polární graf pro tóny moderních houslí (détaché).....	21
Obr. 2.1: Základní typy zvukových spekter [6].....	24
Obr. 2.2: Zvukové spektrum prázdných strun houslí [1].....	25
Obr. 3.1: Sled hraných tónů - prázdné struny.....	27
Obr. 3.2: Sled hraných tónů - 3. poloha.....	27
Obr. 3.3: Sled hraných tónů - 5. poloha.....	27
Obr. 3.4: Sled hraných tónů - Vlčí tóny (h1, fis1) a 8. poloha	27
Obr. 4.1: Moderní housle.....	30
Obr. 4.2: Barokní housle.....	30
Obr. 4.3: Rozestavení mikrofonů v bezodrazové komoře	33
Obr. 4.4: Bokorys bezodrazové komory (upraveno z [10]).....	34
Obr. 5.1: Aplikace v prostředí MATLAB.....	37
Obr. 5.2: Zjednodušený průběh skriptu spektrogramu v programu MATLAB.....	38
Obr. 5.3: Zjednodušený průběh skriptu FFT a LPC v programu MATLAB.....	39
Obr. 5.4: Zjednodušený průběh skriptu Směrová charakteristika v programu MATLAB	40
Obr. 6.1: Spektrogram prázdné struny g - moderní housle.....	42
Obr. 6.2: Spektrogram prázdné struny g - barokní housle.....	43
Obr. 6.3: Spektrogram prázdné struny a1 - moderní housle.....	44
Obr. 6.4: Spektrogram prázdné struny a1 - barokní housle	44
Obr. 6.5: Spektrogram prázdné struny e2 - moderní housle.....	45
Obr. 6.6: Spektrogram prázdné struny e2 - barokní housle	45
Obr. 6.7: Spektrogram tónu d1 - moderní housle	46
Obr. 6.8: Spektrogram tónu d1 - barokní housle	47
Obr. 6.9: Spektrogram tónu a2 - moderní housle	48
Obr. 6.10: Spektrogram tónu a2 - barokní housle.....	48
Obr. 6.11: FFT spektrum prázdné struny g - moderní a barokní housle.....	50
Obr. 6.12: FFT spektrum prázdné struny a1 - moderní a barokní housle.....	51
Obr. 6.13: FFT spektrum prázdné struny e2 - moderní a barokní housle.....	52
Obr. 6.14: FFT spektrum tónu d1 ve 3. poloze - moderní a barokní housle.....	53
Obr. 6.15: FFT spektrum tónu a2 v 5. poloze - moderní a barokní housle.....	54
Obr. 6.16: LPC analýza prázdné struny g.....	56

Obr. 6.17: LPC analýza prázdné struny a1	58
Obr. 6.18: LPC analýza tónu d1 ve 3. poloze	59
Obr. 6.19: LPC analýza tónu a2 v 5. poloze	61
Obr. 6.20: Směrové charakteristiky tónů barokních houslí - détaché.....	62
Obr. 6.21: Směrové charakteristiky tónů moderních houslí - détaché.....	63
Obr. 6.22: Směrové charakteristiky tónů barokních houslí - sul ponticello	64
Obr. 6.23: Směrové charakteristiky tónů moderních houslí - sul ponticello	64
Obr. 6.24: Směrové charakteristiky tónů barokních houslí - staccato	65
Obr. 6.25: Směrové charakteristiky tónů moderních houslí - staccato	65
Obr. 6.26: Směrové charakteristiky tónů barokních houslí - sautillé	66
Obr. 6.27: Směrové charakteristiky tónů moderních houslí - sautillé	66
Obr. 6.28: Směrové charakteristiky tónů barokních houslí - spiccato.....	67
Obr. 6.29: Směrové charakteristiky tónů moderních houslí - spiccato.....	67
Obr. A.1: Zobrazení formantových oblastí a formantů na klaviatuře - détaché (prázdná g)	75
Obr. A.2: Zobrazení formantových oblastí a formantů na klaviatuře - sul ponticello (prázdná a1)	75
Obr. A.3: Zobrazení formantových oblastí a formantů na klaviatuře - spiccato (d1 - 3. poloha)	75
Obr. A.4: Zobrazení formantových oblastí a formantů na klaviatuře - détaché (a2 - 5. poloha)	76

SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1: Mechanické rozměry měřených nástrojů v cm.....	31
Tab. 4.2: Materiál strun se syntetickým jádrem ¹	31
Tab. 6.1: Porovnání hlasitosti pro prvních osm harmonických složek.....	50
Tab. 6.2: Porovnání hlasitosti pro prvních devět harmonických složek.....	51
Tab. 6.3: Porovnání hlasitosti pro prvních pět harmonických složek.....	52
Tab. 6.4: Porovnání hlasitosti pro první devět harmonických složek.....	53
Tab. 6.5: Porovnání hlasitosti pro prvních pět harmonických složek.....	54
Tab. 6.6: Formantové oblasti [6]	55
Tab. 6.7: Hodnoty LPC analýzy prázdné struny g.....	57
Tab. 6.8: Hodnoty LPC analýzy prázdné struny a1	58
Tab. 6.9: Hodnoty LPC analýzy tónu d1 ve 3. poloze.....	60
Tab. 6.10: Hodnoty LPC analýzy pro tón a2 v 5. poloze	61

ÚVOD

Práce se zabývá analýzou frekvenčního spektra, analýzou FFT spektra, LPC analýzou a směrovým vyzařováním u houslí. Pomocí teoretických poznatků, vlastních naměřených vzorků a jejich následnou analýzou se bude snažit vysvětlit a popsat rozdíly, které se týkají zvukového spektra u houslí. Tato práce se bude zabývat postupy měření houslí, následného zpracování zvukových vzorků do grafické podoby a jejich vyhodnocení.

Na začátku práce jsou objasněny základní pojmy, co se týče zvukového spektra, LPC analýzy a směrových charakteristik obecně a jejich následného měření. Krátce zde jsou zmíněny výhody a nevýhody umělé generace tónu a porovnání s buzením nástroje reálným hráčem.

Kapitola 4 se zabývá praktickou realizací měření. Jsou zde popsány jednotlivé naměřené nástroje, rozdíly mezi strunami se syntetickým jádrem a střevoými strunami a celkový průběh měření.

Další kapitola popisuje následné zpracování naměřených vzorků v připravené aplikaci, která byla vytvořena v prostředí MATLAB.

V poslední kapitole se nachází jednotlivé vybrané vzorky, jejich spektrogramy, FFT spektra, LPC spektra a polární diagramy. Dále jsou zde vzorky vzájemně porovnány a slovně okomentovány. Nachází se zde také celkové shrnutí naměřených výsledků.

Pro účely měření byly zvoleny moderní a barokní housle, to proto, aby byly porovnány rozdíly u různých druhů nástrojů s rozdílnou kvalitou a stářím korpusu a také s odlišnými typy strun, jimiž byly struny se syntetickým jádrem a struny střevové.

Cílem této práce je popsat rozdíly ve spektru u moderních a barokních houslí při použití různých druhů strun a také při využití různých smyčcových technik v různých dynamikách. Práce by měla sloužit pro muzikanty a zvukaře. Měla by objasnit změny ve zvukovém spektru a v barvě zvuku u houslí při použití různých druhů strun a při použití různých smyčcových technik.

1 HISTORIE HOUSLÍ

Smyčcovým hudebním nástrojům v podobě, která je nám důvěrně známa, předcházela dlouhodobý vývoj. Za prvního předchůdce houslí se považuje tzv. rubeba, jedná se o středověký raný smyčcový nástroj. V průběhu 14. století již tyto nástroje nedostačovaly tehdejšími požadavkům, zejména u tónového rozsahu. Docházelo ke zdokonalování smyčcových nástrojů. [3]

Dílny tehdejších mistrů opouštěly nástroje dokonalejší, které mají základní prvky podobné s fidulou, odtud také vznikl jejich název - viola. Jenže i ty měly své nedostatky, tak docházelo ke zdokonalování viol. Koncem 16. století byly vynalezeny housle.

Nejstarší dochované novodobé housle vyrobil v roce 1564 A. Amati v Cremoně. Mezi další nejvýznamnější výrobce houslí patří A. Stradivari. [10]

Housle se ve svém tvaru v průběhu let moc neměnily, nanejvýše docházelo jen k menším úpravám v konstrukci nástroje, z důvodu pohodlnější hry.

1.1 Konstrukce houslí a smyčce

Housle jsou strunný smyčcový nástroj, který má 4 struny laděné po kvintách: g, d1, a1, e2. Existují různé velikosti houslí, ty se dělí na:

Čtyřčtvrťové - délka houslí je okolo 58 cm

Tříčtvrťové

Půlové - délka nástroje je přibližně 51 cm

Čtvrťové

Hlavní část houslí tvoří ozvučná skříň, tzv. *trup*, jedná se o tělo nástroje a jeho délka se pohybuje okolo 34 - 35 cm. Skládá se z víka, které se obvykle vyrábí sklížením ze dvou dílů měkkého dřeva (nejčastěji smrkového), z důvodu lepší rezonance. Jedná se o hlavní rezonátor. Víko je po obou stranách opatřeno zvukovými otvory, které připomínají písmeno f. [12]

Dno trupu tvoří spodní deska, která je u některých nástrojů vyráběna jako celek, nebo je sklížena ze dvou desek. Vyrábí se z tvrdšího javorového dřeva. Víko a dno trupu jsou spojeny úzkými *luby*, které jsou vyráběny z javorového dřeva. Vprostřed trupu je umístěn *krk* a na jehož konci se nachází spirálovitá hlavice, která je vyřezána ze smrkového dřeva. Lidově se jí říká *šnek*. Má pouze estetickou funkci a nijak nezlepšuje barvu zvuku nástroje, je znakem kvalitní výroby. Na vrchní části krku je tzv. *hmatník*. Je vyráběn z velmi tvrdého dřeva, nejčastěji se používá ebenové. U levnějších nástrojů je hmatník vyráběn ze dřeva javorového. Na hmatníku se nachází *pražec*, který má čtyři výřezy na struny. Pod hlavicí leží žlábek, ve kterém se nacházejí *količky* sloužící na

upevnění strun. Ve špalíčku je zasazen *žalud*, na který je pomocí poutka připevněn *struník*. Ten je obvykle vyroben z ebenového dřeva a jsou v něm čtyři doladovací šroubky, ve kterých jsou otvory pro struny. [12]

Struny s tělem nástroje „spojuje“ tzv. *kobylka*. Vyrábí se taktéž z javorového dřeva a nachází se uprostřed mezi zvukovými otvory. I malé odchýlení v umístění kobylky může mít za následek změnu v charakteru tónu houslí. Kobylka se postupem času deformuje, je to způsobeno tlakem smyčce na struny. Proto se také musí měnit.

Má několik důležitých funkcí:

- *Udržuje struny dále od hmatníku, tím pádem nedochází ke vzniku nepříjemných ruchů;*
- *Přenáší vibrace ze strun na tělo nástroje;*
- *Zaoblený tvar poskytuje, aby se smyčec dotýkal strun odděleně;*
- *Slouží jako akustický filtr - snižuje některé frekvence struny;*

Pod víkem na levé straně je přiklíženo žebro, taktéž se mu říká basový trámec a je vyráběný ze smrkového dřeva. Jeho rolí je zesilovat zvuk nižších strun. Na druhé straně je kolmý podstavec zvaný duše, který má za úkol přenášet chvění struny z horního víka na dno nástroje a také mírní tlak strun a kobylky na víko. [12]

I nepatrná změna polohy duše může mít za následek změnu v barvě a intenzitě tónu (stejně jako u kobylky). Pro pohodlnější hru byl na housle připevněn podbradník. Taktéž se při hře používají tzv. *ramenní opěrky*, které slouží k efektivnější hře na nástroj.

Smyčec se vyrábí ze dřeva ušlechtilého buku (fernambuku) a je nedílnou součástí pro hraní na housle. Skládá se z válcovitého nebo osmihranového prutu, ze žabky a žíní. Dodnes se vyrábí z koňských žíní, jelikož s žádnými syntetickými materiály nebylo dosaženo takové kvality reprodukce, jako právě s přírodními žíněmi. [10]

Žíně jsou ukotveny v hrotu a na druhém konci v žabce, která se pohybuje pomocí šroubku. Žíně se musí pravidelně mazat kalafunou, což je směs přírodních pryskyřic. Dochází tím ke zdrsnění žíní a lepšímu tření při vzniku tónu. Žíně se postupem času opotřebovávají, tzv. se pálí. Proto se musí jednou za čas smyčec nechat znovu potáhnout žíněmi novými.

1.2 Vznik tónu

Zdrojem zvuku u nástroje je chvějící se struna, která je upevněna mezi dvěma pevnými body. Podle vzniku tónu housle patří do tzv. *chordofonů*. Všechny body struny kmitají příčně - kolmo na délku struny, dochází ke vzniku příčné vlny. Struna se chvěje nejen celá, ale i v polovině, třetině, čtvrtině atd., dochází tak ke vzniku dílčích vln. [1]

Struny patří k nejstarším hudebním zdrojům zvuku. Již Pythagorovi sloužily k jeho pokusům, který zjistil základní akustický vztah:

- 1) *struna vydává tón tolikrát vyšší, kolikrát je kratší;*
- 2) *čím má větší průměr, tím vydává tón nižší;*

Dalšími pokusy byly zjištěny nové závislosti:

- 3) *výška tónu na struně je přímo úměrná odmocnině ze síly, kterou je struna napínána;*
- 4) *výška tónu na struně je nepřímo úměrná odmocnině z hustoty struny;* [1]

Frekvenci kmitání struny lze určit pomocí Taylorova vzorce [1]:

$$f = \frac{l}{\lambda} = k \cdot f_1, \quad (1.1)$$

kde l ... délka struny, f_1 ... funkce délky struny, λ ... vlnová délka.

Tento vzorec platí však jen za podmínky, pokud je struna dokonale pružná. Jinak je potřeba vztahy opravit, jak to udělal Seebeck [1]:

$$f = f_1 \left(1 + \frac{d^2}{4l} \sqrt{\frac{\Pi E}{F}} \right), \quad (1.2)$$

kde d ... kruhový průměr struny, f_1 ... frekvence tónu vypočtená podle Taylorova vzorce, E ... Youngův modul pružnosti v tahu příslušné struny ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$), l ... délka struny, Π ... Ludolfovo číslo, F ... síla.

Akustický systém u každého hudebního nástroje tvoří tři funkční části:

- *budící element či mechanismus - excitátor (též generátor)*
- *kmitající element - oscilátor*
- *zesilující a vyzařující element - rezonátor*

Rezonátor však nemůžeme ztotožňovat s funkcí klasického zesilovače, lze jej považovat za filtr, který ve spektru kmitů oscilátoru zdůrazňuje konkrétní frekvenční pásma. Taktéž slouží k vyzařování kmitavé energie oscilátoru do okolního prostoru s nejmenšími ztrátami. [6]

1.3 Rozsah nástroje

Rozsah nástroje je široký, od malého g až po c5, to znamená, že kmitočtový rozsah základních tónů (fundamentů) je zhruba 196 - 4186 Hz. Akustický výkon houslí je průměrně 10^{-3} W a dynamický rozsah asi 38 - 40 dB. Notace je v houslovém klíči. [12]

Pro využití celého rozsahu nástroje, a také pro změnu barvy nástroje je důležité hrát v polohách, dochází k posunu levé ruky hráče blíže ke kobylce nástroje. Nejčastěji se používá první, třetí a pátá poloha. Čím se hraje výš (blíže ke kobylce), tím jsou rozestupy mezi prsty menší, hra je tím pádem obtížnější.

1.4 Barva zvuku

Barva zvuku - témbra, tento pojem je známý již od konce 18. století. Tehdy byla barva považována za náhodnou kvalitu zvuku nebo za vlastnost hlasu, kterou lze verbálně popsat. Lze jej považovat za charakteristický znak a kvalitu tónů.

V roce 1843 formuloval Ohm základní psychoakustický zákon, podle kterého lidské ucho vnímá periodické kmitání částic vzduchu jako jednoduchý tón a každé jiné periodické kmitání těchto částic rozkládá v řadu pravidelných kmitů a vnímá k nim odpovídající řadu jednotlivých tónů. [6]

U periodických zvuků tak ucho pracuje jako frekvenční analyzátor a vyhodnocuje frekvenci a amplitudu jednotlivých dílčích kmitů jako celkový vjem - vjem barvy zvuku. V tomto vjemu však není zastoupena fáze dílčích kmitů, protože lidské ucho fázi zvukového signálu jako takovou nezaregistruje. [6]

Nutno zdůraznit, že Ohmův zákon platí pouze pro periodické zvuky - tóny a celý mechanismus jejich vnímání velmi zjednodušuje.

Barva zvuku souvisí se strukturou kmitočtu zvuku, který vytváří příslušný hudební nástroj. O barvě zvuku můžeme mluvit jen za situace, kdy se jedná o zvuky složené, tj. že obsahují ve svém spektru i vyšší harmonické složky. Čistý sinusový tón je totiž bezbarvý (pokud není vygenerován). Barvu zvuku rozeznáváme podle toho, kolik a jaké z vyšších harmonických tónů znějí společně s fundamentem (základním tónem).

Při srovnávání spektra tónu a jeho barvy zjišťujeme, že rozdíl v charakteru barvy tónu uděluje poměr vyšších harmonických sudých vůči lichým. Souvisí to s tvarem vlny, který vytvářejí. *Všeobecně lze říci, sudé harmonické, které jsou obsaženy např. v tónech dřevěných dechových nástrojů, vytvářejí měkčí a zastřenější tón. Oproti tomu liché harmonické, které jsou obsaženy v tónech např. žesťových nástrojů, dodávají tónům lesk a ostrost. [2]*

Dalšími činiteli, které se podílí na barvě zvuku a souvisí i s jeho tvořením jsou např.: tah smyčce při hře na smyčcové nástroje, zvuky způsobené mechanikou nástroje. Dále se na barvě zvuku podílejí tzv. formanty. Jsou to částkové (parciální) tóny, oproti

vyšším harmonickým složkám nejsou násobkem fundamentu. Často se spektrum rozlišuje na tzv. *intervalové* a *formantové* oblasti, jejichž hranice je mezi 6. a 8. harmonickou. [1]

Významné jsou také Schumannovy *zákony barvy* zvuku, které formuloval v roce 1929. Na základě dlouholetých analýz tónu u hudebních nástrojů se Schumann přikláněl k „vokálnímu“ pojetí barvy zvuku. Jejich znění: [6]

1) *Zákon formantových oblastí*

Barva zvuku hudebního nástroje je dána nezávisle na výšce základní harmonické pevnou polohou formantových oblastí, které mají silnější vyšší harmonické tóny.

2) *Zákon formantových intervalů*

Pro barvu tónu hudebního nástroje je vedle frekvenční polohy formantových oblastí rozhodující též interval mezi těmito oblastmi. Respektive nejsilnější harmonické tóny těchto oblastí.

3) *Zákon akustického posuvu*

Při stoupající dynamice tónu se přesouvá intenzitní maximum v dané formantové oblasti postupně na vyšší harmonické složky.

4) *Zákon akustického skoku*

Zabývá se tóny, které mají dvě formantové oblasti

1.5 Smyčcové techniky

Jedním z nejdůležitějších faktorů při tvorbě zvuku je smyk. Jeho provedení závisí na síle a následné kvalitě zahraného tónu. Při tahání smyčcem vznikají tzv. netlumené kmity. Smyčec tře strunu asi v jedné desetině její délky, to aby nedošlo k zániku důležitých harmonických tónů. [12]

Smyky se dělí na *dlouhý smyk*, dále jsou oddělované smyky např.: *détaché* a *martelé*, *legato*, *staccato*. Skákavé smyky, jimiž jsou *spiccato*, *sautillé* a *tremolo*. Další možností je hra u kobylky nástroje, ta se nazývá *sul ponticello*. Typické pro tento druh smyku je, že u něj mohou výrazně vyniknout vyšší harmonické tóny a celkově zvuk má ostřejší kovové zabarvení. Smyká-li se smyčcem nad hmatníkem, dochází k utlumení vyšších harmonických tónů a tón je měkčí a poněkud zastřenější. Tomuto smyku se říká *sul tasto*. [12]

Další možností při hře na housle je použití *dusítka*, které se umísťuje na kobylku nástroje. Tomuto způsobu hry se říká *con sordino*. Dochází k utlumení převodních kmitů kobylky a tím i rezonance těla nástroje. Hra bez dusítka se nazývá *senza sordino*. Taktéž může dojít k rozechvívání strun pomocí prutu smyčce. Označuje se jako *col legno*. Tón

vzniká obdobně, jako kdyby do strun udeřilo tvrdší kladívko, tím pádem se jedná o kmity tlumené. Dalším stylem hry je tzv. *pizzicato* neboli drnkání prsty na strunu. Vznikají opět kmity tlumené. Intenzita a tvoření částkových tónů jsou jiné než u tónů, které byly vytvořeny pomocí smyčce. [12]

1.6 Směrové charakteristiky

Směrovost nástroje patří k nejzákladnějším vlastnostem každého hudebního nástroje. Směrové charakteristiky ukazují rozložení akustického pole v okolí hudebního nástroje na různých kmitočtech. [10]

Šíření zvuku není pro všechny směry pro většinu případů stejné, jedná-li se o šíření zvuku od praktických zvukových zdrojů. Směrová charakteristika udává rozložení akustického tlaku v závislosti na úhlu vyzařování zdroje. Obvykle ji určujeme ve vzdáleném poli za předpokladu, že toto pole není rušeno překážkami a odrazovými plochami kromě povrchů a ploch, které jsou přímou součástí měřeného zdroje. [9]

1.6.1 Vyzařovací vlastnosti nástrojů

Neexistuje žádný reálný zdroj zvuku, který vyzařuje svoji akustickou energii do okolního prostoru zcela rovnoměrně ve všech směrech. Omezením při všesměrovém vyzařování zdroje jsou jeho reálné rozměry, které se vztahují k jeho délce (frekvenci vyzařované vlny). Platí pravidlo - čím větší je rozměr zdroje a kratší vlnová délka jím vyzařovaného zvuku, tím směrovější jsou vyzařovací vlastnosti zdroje a naopak. U hudebních nástrojů určují rozměry oscilátoru a rezonátoru velikost zdroje zvuku. Směrové vyzařovací vlastnosti jsou v teorii akustických vysílačů dány rozložením tzv. rychlostního potenciálu v okolí kmitajícího bodu. V případě přibližného výpočtu směrových charakteristik hudebních nástrojů je zapotřebí nahradit jejich aktivně vyzařující části jednoduchými útvary, pro které lze rozložení rychlostního potenciálu vůbec stanovit. [6]

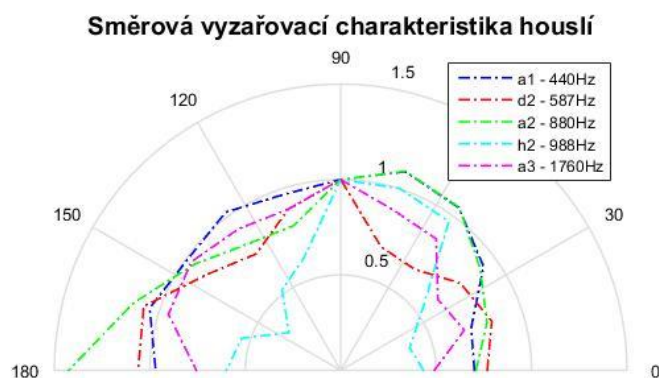
Klasickou podobou směrových charakteristik jsou polární diagramy znázorňující pro daný tón, respektive pro danou frekvenci nejčastěji závislost akustického tlaku na úhlu uvažovaného směru od hudebního nástroje. Průběh charakteristik je na vzdálenosti od nástroje nezávislý, to platí pouze pro vzdálené pole. V blízkém poli jsou směrové charakteristiky na vzdálenosti výrazně závislé a mají mnohem složitější průběh. [6]

Měření obecných směrových charakteristik probíhá v bezodrazové komoře. V reálných prostorech dochází k ovlivňování směrových charakteristik například odrazem od podlahy, dozvukem apod. Polární graf znázorňuje hodnoty akustického tlaku v závislosti na úhlu uvažovaného směru od hudebního nástroje - viz obrázek 1.1. Směrové vlastnosti zdroje lze také vyjádřit pomocí indexu směrovosti a činitele směrovosti.

Z hlediska subjektivního vjemu se odchylky od všesměrového vyzařování projevují - jako změny hlasitosti příslušných harmonických tónů. To znamená, že u směrově vyzařujícího hudebního nástroje se změna vzájemné polohy nástroje a posluchače či snímacího mikrofону projeví jako změna barvy komplexního tónu. [6]

Proto se vymezují ve směrových charakteristikách rovinné či prostorové úhly, jedná se o tzv. úhlové oblasti. Uvnitř těchto oblastí neklesá hladina akustického tlaku o více než 3 dB nebo 10 dB pod maximální hodnotu pro určitou frekvenci nebo celé frekvenční pásmo. Ve společném průniku hlavních směrů vyzařování nedochází ke změně barvy tónu, ale jen pro daná frekvenční pásma a z energetického hlediska odevzdává hudební nástroj tímto směrem maximum svého akustického výkonu. Vyzařovací vlastnosti hudebního nástroje, které určují frekvenční strukturu jeho tónu resp. zvuku v konkrétním bodě okolního prostoru a tím i subjektivní vjem barvy, nejsou důsledkem pouze obecného konstrukčního, tj. tvarového a rozměrového uspořádání nástroje, ale také celé řady kvalitativních aspektů včetně vlivu materiálu. [6]

U smyčcových nástrojů se vyzařovací poměry většinou udávají pro rovinu kobyly a pro horizontální rovinu. Do frekvence 400 Hz v rovině kobyly a 500 Hz v horizontální rovině se neobjevují prakticky žádné směrové závislosti. První výrazná maxima se objevují v obou rovinách na frekvenci 1000 a 1250 Hz. Na frekvenci 1500 a 2000 Hz dochází v rovině kobyly k typickému zdvojení maxim. Na vyšších frekvencích je rovnoměrnější vyzařování situováno do horizontální roviny. Proto také charakter snímaného tónu houslí je závislý zejména na poloze mikrofónu nad nástrojem, protože právě tam se objevuje převažující průnik všech hlavních směrů vyzařování včetně úzkých laloků nejvyšších frekvencí, zejména pak šumového charakteru. Právě proto se pro eliminaci šumů doporučuje u houslí a ostatních smyčcových nástrojů vyvarovat směru snímání zvuku kolmému k vrchní desce nástroje. [6]



Obr. 1.1: Polární graf pro tóny moderních houslí (détaché)

1.6.2 Rychlostní potenciál

Rychlostní potenciál Φ je hypotetická skalární veličina, která je definovaná tak, že její gradient je roven akustické rychlosti. Obecně nám rychlostní potenciál slouží k jednoduššímu řešení vlnové rovnice zvukového pole. Platí pro něj vztah: [8]

$$\text{grad } \Phi = \mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k}, \quad (1.7)$$

kde $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} \dots$ jednotkové vektory ve směru x, y a z , $v \dots$ rychlost.

1.6.3 Činitel směrovosti

Činitel směrovosti Q_z je poměr akustického tlaku p_θ změřeného v daném směru θ (obvykle v akustické ose zdroje zvuku) ve vzdálenosti 1 m ku akustickému tlaku $p_{stř}$ vytvořenému ve stejném místě volného pole všesměrovým akustickým zdrojem se stejným akustickým výkonem. Platí vztah: [8]

$$Q_z = \frac{p_\theta^2}{p_{stř}^2} \quad (1.8)$$

kde $p_\theta \dots$ akustický tlak změřený v daném směru θ , $p_{stř} \dots$ vytvořený akustický tlak ve stejném místě volného pole se stejným akustickým výkonem. Jedná se o bezrozměrné číslo charakterizující směrové vyzařování zvuku akustického zdroje.

1.6.4 Index směrovosti

Index směrovosti I_Q je činitel směrovosti vyjádřený v decibelech, určený jako rozdíl mezi hladinou akustického tlaku v daném směru vyvolanou směrově vyzařujícím zdrojem zvuku a průměrnou hladinou akustického tlaku, kterou by zdroj stejného akustického výkonu vyvolal při všesměrovém vyzařování. Vyjadřuje tvar směrové charakteristiky číselně. Platí pro něj vztah: [8]

$$I_Q = 10 \log Q. \quad (1.9)$$

2 ZVUKOVÉ SPEKTRUM

Zvukové spektrum v grafické podobě představuje nejrozšířenější popis frekvenční struktury analyzovaného tónu. Je také spojováno s příčinností subjektivních vlastností a barvy tónu. [6]

Každý periodický tón lze rozložit v řadu základních složek. Tento rozklad je možný pomocí tzv. Fourierova teorému: [2]

$$a(t) = \frac{1}{2}A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin n \cdot \omega \cdot t + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \cos n \cdot \omega \cdot t, \quad (2.1)$$

kde A_0 ... složka stejnosměrná, A_n, B_n ... koeficienty rozvoje barevného tónu, určující amplitudu harmonických (aliquotních) tónů o kmitočtu, odpovídajícímu $n \cdot \omega$.

Každý signál lze vyjádřit pomocí harmonických signálů - od jediného až po nekonečný počet. Každý dílčí harmonický signál lze popsat dvojčíselným údajem - kmitočtem a efektivní hodnotou. [9]

Vyjádření spektra se děje nejčastěji pomocí grafů, zobrazujeme je do roviny dvou os, z nichž vertikální je osou hladiny L [dB], horizontální je osou kmitočtu f [Hz]. Frekvenční osu cejchujeme v logaritmickém rozdělení po dekadách - v desítkové řadě. Vykreslením dostáváme tři základní druhy spekter: [2]

- Spektrum diskrétní
- Spektrum spojitě
- Spektrum smíšené (kombinované)

Zjišťování spektra se dělá pomocí elektroakustických měřicích zařízení, které se nazývají spektrální analyzátoři. Nejčastěji pomocí nich dostáváme přímo grafické zobrazení.

2.1 Spektrum diskrétní

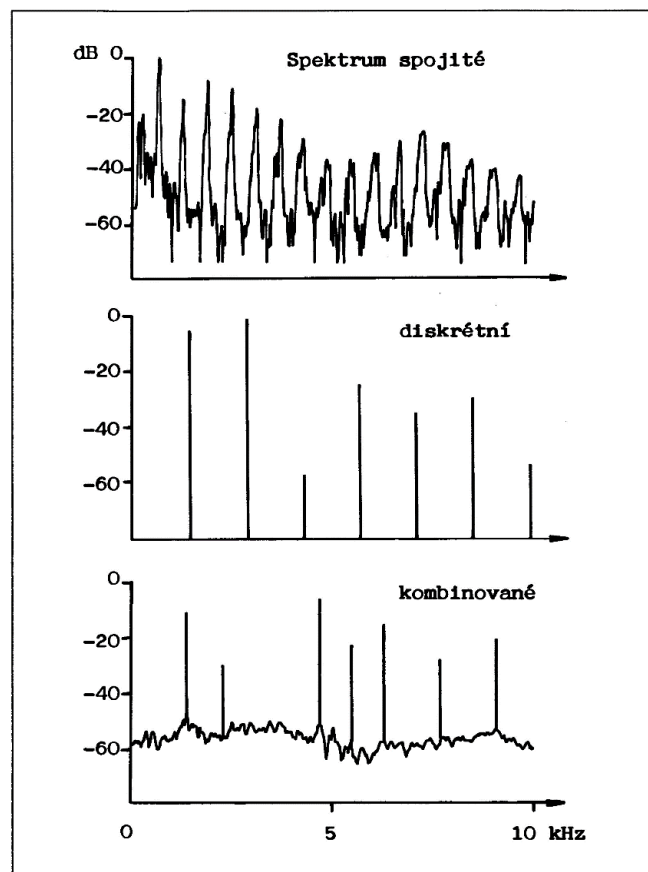
Diskrétní spektrum (viz obrázek 2.1) obsahuje pouze jednotlivé, diskrétní (oddělené) kmitočtové složky, které jsou vyjádřeny úsečkami o délce odpovídající výši hladiny. Toto spektrum je charakteristické jen pro samotné tóny. Pokud se jedná o spektrum jednoho tónu, pak složka s nejnižším kmitočtem je tón základní (fundament) - nejčastěji je nejvýraznější. Další složky odpovídají násobkům základního kmitočtu, takže představují vyšší harmonické složky. [2]

2.2 Spektrum spojité

Obsahuje spojitou řadu kmitočtů, takže vykreslujeme pouze vrcholové body dílčích složek. Spojnice vrcholových bodů tvoří plynulou čáru. Takové spektrum je charakteristické pro hluky a šумы. Spektrum je zobrazené na obrázku 2.1 [2]

2.3 Spektrum smíšené

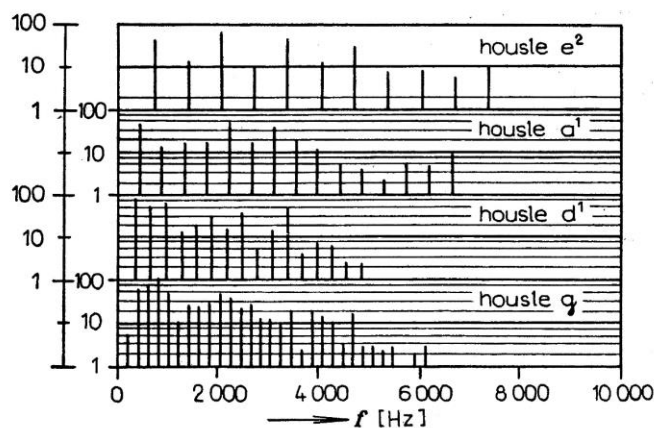
Takové spektrum vzniká spojením obou předešlých spekter: ze spojitého spektra vyčnívá několik výrazných diskretních složek, zobrazený na obrázku 2.1. Smíšené spektrum nacházíme u zvuků různých mechanismů či některých bicích nástrojů. [2]



Obr. 2.1: Základní typy zvukových spekter [6] (str. 171)

2.4 Spektrum houslí

Zvukové spektrum houslí je opravdu velmi bohaté na všechny harmonické složky. Toto spektrum obsahuje i neharmonické příměsi, jsou ale mnohem tišší, než složky harmonické. Základní tón nejhlubších tónů houslí tvoří v celkovém zvuku složku mnohokrát tišší, než jsou jeho vyšší harmonické, což může být způsobeno tím, že vlnová délka nejhlubších tónů u houslí je několikrát větší než rozměry těla nástroje, např.: u malého g je přibližně 2,3x delší. Zvukové spektrum prázdných strun houslí je zobrazeno na obrázku 2.2 [12]



Obr. 2.2: Zvukové spektrum prázdných strun houslí [1] (str. 185)

2.5 Lineární predikce

LPC analýza neboli lineární predikce je metoda, která se hojně využívá v oblasti zpracování signálů. Princip této metody je založen na předpokladu, že k -tý vzorek signálu můžeme popsat pomocí lineární kombinace buzení a předchozích vzorků. Tento princip lze popsat rovnicí [11]:

$$\hat{s}(n) = \sum_{k=1}^p \alpha_k s(n-k), \quad (2.2)$$

kde $\hat{s}(n)$ je odhad n -tého členu v posloupnosti. Je nalezen jako lineární kombinace p předchozích členů, p je počet LPC koeficientů neboli řád prediktoru, α_k jsou predikční koeficienty. Díky hodnotám α_k určíme charakteristiky signálu. Hledáme tedy ideální α_k tak, aby se kterákoliv hodnota signálu co nejvíce blížila lineární kombinaci předchozích hodnot. [11]

3 METODIKA MĚŘENÍ

Kapitola se zabývá jednotlivými metodami měření akustických nástrojů. Taktéž dochází ke srovnání mezi buzením hudebního nástroje člověkem a umělým generováním tónu. V další části jsou uvedeny zahrané tóny na housle a jednotlivé smyky, které byly použity při nahrávání. Současně bylo nutné vytvořit určité podmínky, které musel hráč při nahrávání respektovat.

3.1 Způsoby akustických měření nástrojů

Tato kapitola je výtahem z kapitoly 6.9 zdroje [6]

Akustická měření se zabývají objektivně měřitelnými přenosovými vlastnostmi akustických soustav. Na rozdíl od elektroakustických či elektronických soustav (jejich vlastnosti by neměly ovlivňovat zpracovaný signál) nelze u hudebních nástrojů stanovit jejich optimální podobu přenosu. Je to způsobeno nepřítomností absolutního neměnného zvukového modelu.

Metodika akustických měření nástrojů vychází z podmínky platnosti, přesnosti a opakovatelnosti výsledků měření. U hudebních nástrojů je metodika měření úzce spjata se subjektivním hodnocením jejich kvality - další z důkazů platnosti výsledků měření.

Přesnost použitých přístrojů ovlivňuje platnost naměřených výsledků. První možností, jak korigovat systematické chyby, je změnit měřící metodu. Chyby, které vznikly rušením přístrojů, můžeme minimalizovat opakováním měření a získané výsledky zprůměrovat. Chyby způsobené objektem měření vedou obvykle k nepoužitelným výsledkům. Jedná se o tzv. vstupní podmínky, které ovlivňují spolehlivost měřící metody. Pokud nedojde k dodržení vstupních podmínek (proměnných parametrů), dostáváme značné chyby, které znemožňují jejich další využití.

Vstupní podmínky u smyčcových nástrojů jsou - *místo kontaktu smyčce se strunou, přítláčná síla smyčce, rychlost a směr pohybu smyčce, kvalita a kvantita kalafuny, teplota a vlhkost vzduchu*. Důležité pro účely akustických měření hudebních nástrojů je minimalizovat tyto náhodné vlivy a stabilizovat vstupní podmínky.

Jednou z možností, která se jeví jako nejvhodnější, je použít umělou generaci tónu. Ta ale přináší problém stupně náhrady reálného hráče. Tato náhrada je dána typem vazby mezi excitátorem a oscilátorem nástroje - při těsnější vazbě je náhrada složitější.

Celkem bezproblémové je vytvoření takové náhrady pro smyčcové nástroje. Používá se tzv. Heroldův nekonečný smyčec, u kterého je možné si nastavit tlak na strunu, napětí žíní, místo buzení struny a rychlost pohybu smyčce. Nicméně pro účely této práce byla zvolena metoda buzení nástroje reálným hráčem.

3.2 Zahrané tóny

Pro účely našeho měření bylo vybráno několik tónů v první, třetí, páté a osmé poloze. Tyto tóny byly hrány postupně za sebou od nejnižšího tónu po nejvyšší, u různých smyků. Mezi jednotlivými vzorky byla pětisekundová pomlka. Většina vzorků byla hrána ve třech dynamikách - *piano*, *mezzoforte* a *forte*. Bohužel u některých vzorků nebyla dynamika *piano* a *mezzoforte* možná, bylo to z důvodu vysokého šumu, který by převládal nad užitečným signálem. Obrázky 3.2, 3.3, 3.4 a 3.5 zobrazují všechny nahrané tóny. Nicméně pro účely našeho měření bylo vybráno jen několik zvukových vzorků některých tónů.



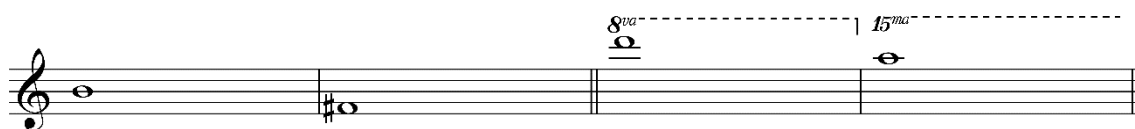
Obr. 3.1: Sled hraných tónů - prázdné struny



Obr. 3.2: Sled hraných tónů - 3. poloha



Obr. 3.3: Sled hraných tónů - 5. poloha



Obr. 3.4: Sled hraných tónů - Vlčí tóny (h1, fis1) a 8. poloha

3.3 Jednotlivé smyky

Po předchozí domluvě s hráčem bylo vybráno několik smyčcových technik, které byly nahrány. Všechny použité smyky jsou popsány v kapitole 1.5. Jako první byl použit dlouhý smyk *détaché*, který byl zahrán ve všech zmíněných polohách a dynamikách. Dále následoval smyk *sul ponticello* a *sul tasto* na prázdných strunách. Taktéž bylo nutné udělat vzorky z vyšších poloh. Následovala třetí, pátá a osmá poloha, ve kterých byly nahrány smyky - *détaché*, *spiccato*, *staccato* a *sautillé*. Po dohodě s hráčem byly nahrány ještě tzv. *vlčí tóny*, viz obr. 3.4.

3.4 Podmínky na hráče při nahrávání

Z důvodu minimálního vlivu lidského faktoru bylo potřeba určit pravidla, která musela být během měření dodržena. Jeden z nejdůležitějších požadavků bylo dodržet přibližně stejnou dynamiku a délku vzorků, bylo to z důvodu obsažení všech složek daného tónu. Taktéž byl kladen důraz na dostatečně dlouhou pauzu mezi jednotlivými tóny, aby se při následné úpravě neprolínaly složky tónu prvního a tónu následujícího.

To vedlo k velkému soustředění. Proto byla interpretovi poskytnuta po nahrání každého cyklu krátká pauza, během které si poslechl nahrané vzorky. Posléze došlo buď k měření dalšího cyklu v jiné dynamice, nebo měření druhého nástroje. V případě jakýchkoliv chyb při nahrávání, jako jsou např.: falešnosti, špatná délka, dynamika nebo artikulace tónu, musel být tón znovu nahrán, poté bylo možné pokračovat.

Dalším důležitým pravidlem, které muselo být dodrženo, bylo, aby hráč držel nástroj během celé doby nahrávání ve stejné výšce vzhledem k mikrofonu. Jako pomocný bod při orientaci sloužila vytvořená značka na podlaze v bezodrazové komoře. Nicméně došlo k menší odchylce ve vzdálenosti a výšce od mikrofonu při změně nástroje, což mohlo způsobit menší odchylky.

Před úplným začátkem nahrávání byly nástroje ponechány asi 15 minut v klidu v bezodrazové komoře, kde byla v průběhu měření teplota 25,2 °C. Bylo to z toho důvodu, aby si nástroje na změnu teploty zvykly.

4 PRAKTICKÁ REALIZACE MĚŘENÍ

Aby bylo zvukové pole co nejméně ovlivněné odrazy, je potřeba provádět měření ve volném poli. Pro účely našeho měření byla použita bezodrazová komora z důvodu téměř nulového dozvuku a minimálního vlivu odražených vln, které by mohly ovlivnit výsledky měření. Pro měření směrového vyzařování houslí bylo použito celkem jedenáct mikrofonů, což vedlo k efektivnějšímu snímání nástroje ve všech směrech současně. Ke snímání houslí pro spektrum byl použit jeden mikrofon, který byl postaven více kontaktně ve směru vyzařování nástroje. Buzení nástroje bylo reálným hráčem, jak již bylo v kapitole 3.1

V průběhu měření bylo pořízeno několik nahrávek, převážně jen samostatných tónů u různých druhů smyků v různých dynamikách. Důraz byl kladen zejména na délku vzorku a na následné pauzy mezi vzorky, aby nástroj dostatečně dozněl a aby byly v tónu obsaženy všechny jeho složky a také aby nedocházelo k prolínání jednotlivých složek tónů při střídání tónů.

Naměřené zvukové soubory ve formátu *.wav* byly dále zpracovány v připraveném programu, který byl vytvořen v prostředí MATLAB (viz kapitola 5).

4.1 Naměřené nástroje

Pro účely mého měření byly použity dva nástroje:

1. *moderní housle Charles Jean Baptiste Collin-Mezin, model Rue du Faubg: Poissonnière No. 10 1894*
2. *barokní housle, bližší informace nejsou známy, protože se jednalo jen o kopii*

Tyto nástroje se lišily typem strun, barokní nástroj byl opředen strunami střevovými a moderní nástroj měl struny se syntetickým jádrem. Další rozdíly mezi nástroji bylo stáří korpusu a velikost korpusu. Měřené nástroje jsou zobrazeny na obrázcích 4.1 a 4.2



Obr. 4.1: Moderní housle



Obr. 4.2: Barokní housle

4.1.1 Mechanické rozměry nástrojů

Při měření mechanických délek nástrojů byl použit svinovací metr, taktéž byl použit při měření tloušťky korpusu. Šířka obou měřených nástrojů se nijak nelišila a délka korpusu byla rozdílná jen v rámci desetin centimetru, viz tabulka 4.1.

Tab. 4.1: Mechanické rozměry měřených nástrojů v cm

	Moderní housle	Barokní housle
Šířka korpusu	4	4
Délka korpusu	35,7	36

Čím je délka a šířka korpusu větší, tím jsou více podporovány basovější frekvence. Nevýhodou u houslí je krátký dozvuk u *pizzicata*, jež způsobuje nedostatečně veliký korpus. Nicméně velikost nástroje (v případě houslí menzura) má podstatný vliv na technickou ovladatelnost. Ideální situace nastává, když rozměry nástroje splňují akustické předpoklady rezonance vlnových délek určité tónové oblasti a také vyhovují svojí menzurou, což právě housle splňují.

4.1.2 Použité struny a jejich vliv na barvu zvuku

Po domluvě s hráčem byly měřeny housle s odlišnými typy strun. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, na moderních houslích byly nataženy struny se syntetickým jádrem. Jednalo se o struny *EvaH Pirazzi* a výrobce uvádí, že se jedná o moderní syntetické struny nejvyšší třídy. Mezi jejich charakteristické vlastnosti patří maximálně barevný, sytý a pevný tón.¹

Tab. 4.2: Materiál strun se syntetickým jádrem¹

Struna	Použitý materiál
E	postříbřená ocel
A	hliník
D	stříbro
G	stříbro

Barokní housle byly opředeny střevovými strunami. Tyto struny se vyrábí z jehněčích, popř. telecích střev. Pro tyto struny je charakteristický barevný zvuk bohatý na vyšší harmonické. Malou nevýhodou těchto strun oproti ostatním je, že ztrácí v síle zvuku. Mezi větší nevýhody je větší reakce strun na změny prostředí (vlhkost a teplota), s čímž jsme během našeho měření měli problém, jelikož byla v bezodrazové komoře poměrně vysoká teplota, nástroj jsme museli nechat delší dobu v klidu, aby si na tyto podmínky zvykl, protože struny byly velice náchylné na tuto teplotu a rozlad'ovaly se. Mezi další

¹ Informace z <http://servisprohudebniky.cz/>

nevýhody těchto strun je jejich kratší trvanlivost.²

4.2 Mikrofonní pole

Měření bylo uskutečněno v bezodrazové komoře na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Hlavním účelem, proč byla zvolena právě bezodrazová komora, bylo eliminovat nežádoucí odrazy zvuku. Pro měření bylo zvoleno kruhové pole o průměru dva metry.

Pro měření směrových charakteristik jsme použili jedenáct všesměrových mikrofonů rozestavených po 18° a ve vzdálenosti jeden metr od hráče. Pro pravidelné rozmístění jednotlivých mikrofonů byl použit laserový úhloměr EPT-SA08. První mikrofon byl tedy umístěn na pozici 0° a poslední na pozici 180° . Tím jsme docílili odečítání hodnot energie z jedenácti rovnoměrně rozmístěných bodů. Toto rozmístění bylo důležité proto, abychom zachytili hlavní směry vyzařování na všech frekvencích. Rozestavení mikrofonů v bezodrazové komoře je zobrazeno na obrázku 4.3.

Mikrofony byly kolem hráče rozestaveny do půlkruhu. Jejich pozice byla zvolena tak, aby byly všechny mikrofony minimálně jeden metr od stěny bezodrazové komory, jinak by mohlo docházet k nepřesnostem v měření způsobené odraženými vlnami. Prostor komory se nedá považovat za dokonale bezodrazový. Během měření se v komoře nacházela měřící technika, která byla zdrojem odrazů.

Dalším parametrem, který byl během nahrávání nastaven, byla výška mikrofonů, ta byla nastavena podle velikosti hráče a výšky, ve které držel nahrávaný nástroj. V případě houslí byly mikrofony nastaveny ve výšce 148 cm. Během nastavování jsme dbali hlavně na to, aby výška mikrofonů byla v poloze, ve kterém nástroj vyzařoval. [4][5]

Všechny tyto parametry (výška a vzdálenost mikrofonů) byly měřeny pomocí svinovacího metru, to vše mohlo způsobit jisté nepřesnosti měření. Další nepřesnost mohlo způsobit použití laserového úhlooměru, bylo to z důvodu špatné stability úhlooměru, který jsme museli během nahrávání vyvažovat, což způsobovalo mírné posuvy jeho osy.

² Informace z <http://servisprohudebniky.cz/>



Obr. 4.3: Rozestavení mikrofonů v bezodrazové komoře

4.3 Popis prvků měřicí soustavy

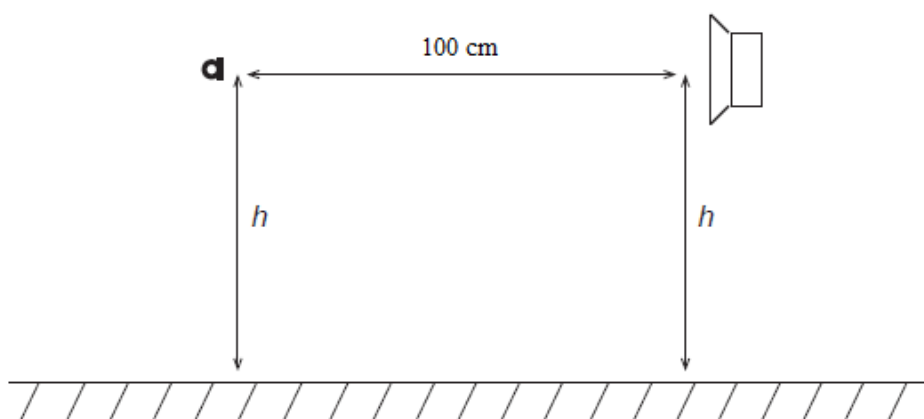
Pro uskutečnění našeho měření bylo k dispozici jedenáct všesměrových, kondenzátorových mikrofonů AUDIX TM1 a jeden referenční mikrofon Brüel&Kjær, typ 4189. Tyto mikrofony byly pomocí XLR konektorů přivedeny na dva A/D převodníky s integrovaným předzesilovačem. Z digitálních výstupů převodníků byl signál veden pomocí optického kabelu ADAT na PCI rozhraní DSP Hammerfall počítače v režijní místnosti. Převodníky byly propojeny rozhraním FireWire s počítačem v bezodrazové komoře, který byl využit k nastavení časové synchronizace těchto převodníků a rozhraní Hammerfall. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 48 kHz a bitová hloubka 24 bitů, bylo to z důvodu omezení maximálního přenosu použitého optického kabelu ADAT. Posléze byl na každý mikrofon nasazen tónový kalibrátor, aby došlo ke kalibraci měřicí soustavy. Tento kalibrátor generuje jednoduchý sinusový tón, který má frekvenci 1 kHz, taktéž má přesně definovaný konstantní tlak ve své komoře. Máme tak jistotu, že jsou všechny mikrofony při nastavení zesílení buzeny stejným signálem. Pro každý mikrofon byl nahrán desetivteřinový kalibrační signál, abychom získali kalibrační konstantu.

Celkový záznam, softwarové zpracování a střih vzorků bylo prováděno v DAW *Cubase 6*. Signály ze všech jedenácti směrových mikrofonů a jednoho referenčního mikrofonu byly zaznamenány do samostatných stop a po konečném zpracování byly jednotlivě exportovány ve formátu *.wav*. Pro následnou analýzu vzorků byla použita aplikace, která byla předpřipravena v prostředí MATLAB.

Vzájemná komunikace s hráčem byla zprostředkována pomocí talkback kanálu, v bezodrazové místnosti byl umístěn reproduktor pro snadnější komunikaci s houslistou. Taktéž byl umožněn video signál z kamery, což usnadnilo a zrychlilo celý průběh nahrávání.

4.4 Průběh měření

Před začátkem nahrávání byla vytvořena pomocí izolační pásky informační značka ve středu kružnice. Tato značka určovala přesnou polohu, na které musel hráč během nahrávání stát. Taktéž byl seznámen s požadavky a průběhem měření, aby nedošlo k nějakým nejasnostem. Muzikant byl informován, že pro potřeby následujícího zpracování je důležité tón nechat plně rozvinout a doznít. Velmi důležité bylo nechat delší pomlku mezi tóny (domluvená byla 5 vteřin), aby nedocházelo k prolínání mezi jednotlivými složkami tónu, což by mohlo způsobit zkreslení hodnot. Hráč byl dále upozorněn, aby během nahrávání neměnil svou polohu a moc se nepohyboval, jinak by mohlo dojít ke změně vzájemné polohy hráče a mikrofonů.



Obr. 4.4: Bokorys bezodrazové komory (upraveno z [10]) (str. 27)

4.4.1 Souhrn naměřených vzorků

V této podkapitole se nachází souhrn naměřených vzorků moderních i barokních houslí ve všech dynamikách a smyčcových technikách.

V první poloze byly nahrány prázdné struny (g, d1, a1, e2) při použití smyčků *détaché* ve všech dynamikách, *sul ponticello* taktéž ve všech dynamikách, *sul tasto* jen

v dynamice *piano*.

Ve třetí poloze byly nahrány tóny d1 (na struně g), a1 (na struně d1), e2 (na struně a1), h2 (na struně e2). Pro tyto tóny byly zvoleny smyky - *détaché*, *spiccato*, *staccato*, *sautillé* v dynamice *forte*. Dále *détaché* v dynamice *mezzoforte* a *piano*.

V páté poloze byly nahrány tóny g1 (na struně g), d2 (na struně d1), a2 (na struně a1), e3 (na struně e2). Zvolené smyky a dynamiky jsou stejné jako ve třetí poloze.

Dále jsme zkusili nahrát dva tóny z osmé polohy tj. tón a4 (na struně e2) a tón d4 (na struně a1), jako technika byl použit dlouhý smyk *détaché* ve znělé dynamice.

Jako poslední jsme nahráli tzv. vlčí tóny, jimž je tón fis1 (na strunách g, d1) a tón h1 (na strunách a1, d1) v dynamikách *piano* a *forte* při použití *détaché*.

Jednotlivé tóny jsou zobrazeny na obrázcích 3.1, 3.2, 3.3 a 3.4.

5 REALIZACE V PROSTŘEDÍ MATLAB

Pro vykreslení jednotlivých spekter vybraných tónů houslí je realizována aplikace v prostředí MATLAB. Aplikace obsahuje hlavní čtyři *.m file* skripty - Spektrogram, FFT a LPC, Porovnání vyšších harmonických složek a Směrové charakteristiky. Dále byly vytvořeny pomocné skripty, které jsou nedílnou součástí pro správnou funkčnost aplikace.

Hlavním důvodem, proč byla zvolena tato volba, je jednoduchost realizace jednotlivých funkcí, jako je např.: vykreslení grafů, načítání zvukových souborů, výpočet *FFT* a *LPC*.

5.1 Aplikace

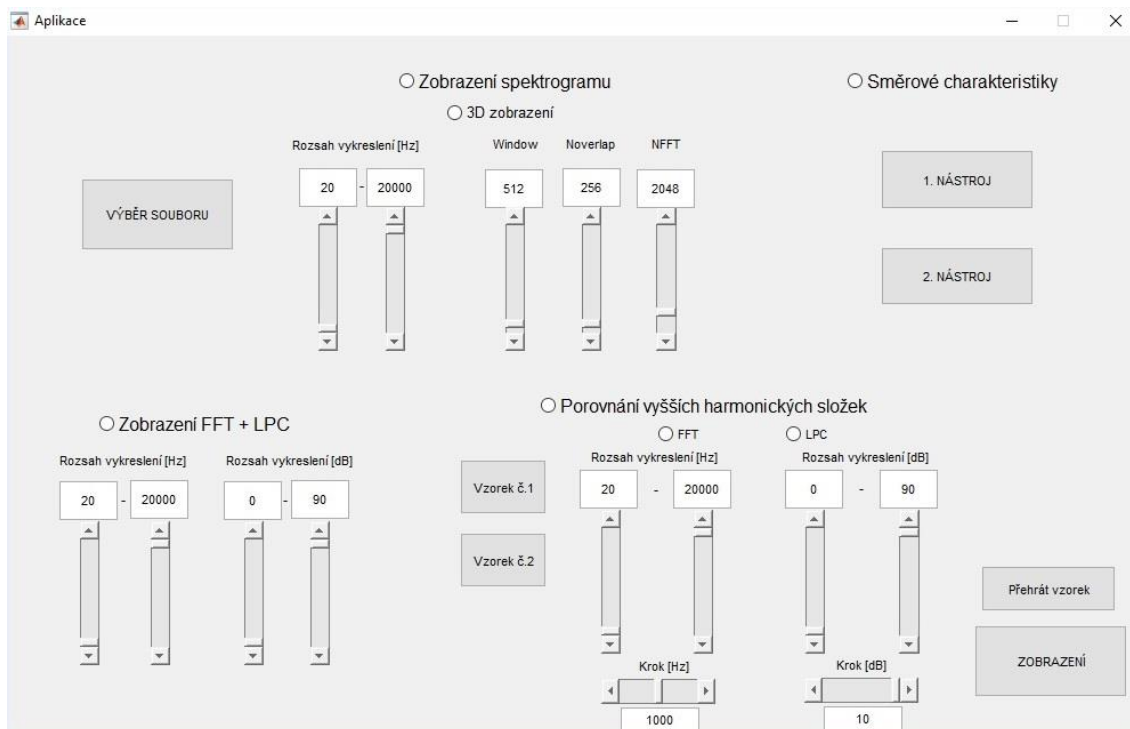
Jedním z úkolů práce bylo vytvořit aplikaci pro zobrazení časově proměnného spektra, pro zobrazení směrových charakteristik, zobrazení *FFT* a *LPC* a porovnání vyšších harmonických složek. Pro tvorbu aplikace bylo z části použito vývojové prostředí *GUIDE* - při změně parametrů nemusí uživatel zasahovat do zdrojového kódu. Aplikace má více možností analýzy zvukových souborů ve formátu *.wav* a jejich zobrazení.

Spuštění aplikace se provádí příkazem spuštění přes *Command Window*. Pro přehlednější zobrazení výsledků může uživatel změnit parametry zobrazení, nebo nechat parametry přednastavené. Aplikace je ošetřena tak, aby nedošlo k chybnému zadání těchto parametrů např.: zadáním záporné hodnoty.

Ve vytvořené aplikaci je možné si zvolit tyto možnosti zobrazení:

- *Zobrazení spektrogramu*
- *Porovnání vyšších harmonických složek*
- *Zobrazení FFT + LPC*
- *Směrové charakteristiky*

V první části aplikace musí uživatel zvolit požadovanou operaci. Posléze načte zvukový vzorek k analýze a dále nastaví příslušné parametry zobrazení. V poslední řadě zobrazí výsledek. Každá z funkcí bude podrobněji popsána níže. Do programu byla přidána také možnost si zvukový vzorek přehrát. Při tvorbě grafického rozhraní *GUIDE* bylo čerpáno z literatury [13] a [15].

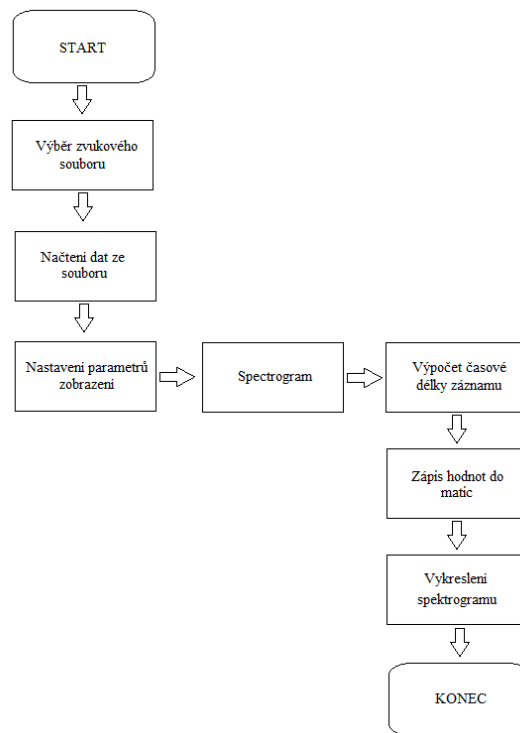


Obr. 5.1: Aplikace v prostředí MATLAB

5.1.1 Funkce Spektrogram

Hlavní částí programu je funkce Spektrogram. Uživatel musí zvolit možnost - Zobrazení spektragramu a následně nahrát zvukový vzorek. Poté si může nastavit různé parametry zobrazení např.: WINDOW SIZE (počet vzorků na jedno okno), NOVERLAP (počet překrývajících se vzorků mezi okny - míra překrytí) a NFFT (z kolika bodů bude vypočítána STFT - Short Time Fourier Transform), nebo nechat tyto parametry již přednastavené. Následně musí zvolit možnost - Zobrazení. Posléze dochází k výpočtu spektragramu pomocí funkce *spectrogram*, která je v programu MATLAB zabudována. Tato funkce využívá tzv. STFT - krátkodobou Fourierovu transformaci. V dalším kroku se vykreslí a zobrazí spektragram. Taktéž je možné nahrát více zvukových vzorků dohromady, dochází k vykreslení spektragramů pro každý vzorek zvlášť. Další možností je zobrazení 3D spektragramu.

Jako materiál při vytváření aplikace spektragram sloužila literatura [14]. Zjednodušený průběh je znázorněn na obrázku 5.2

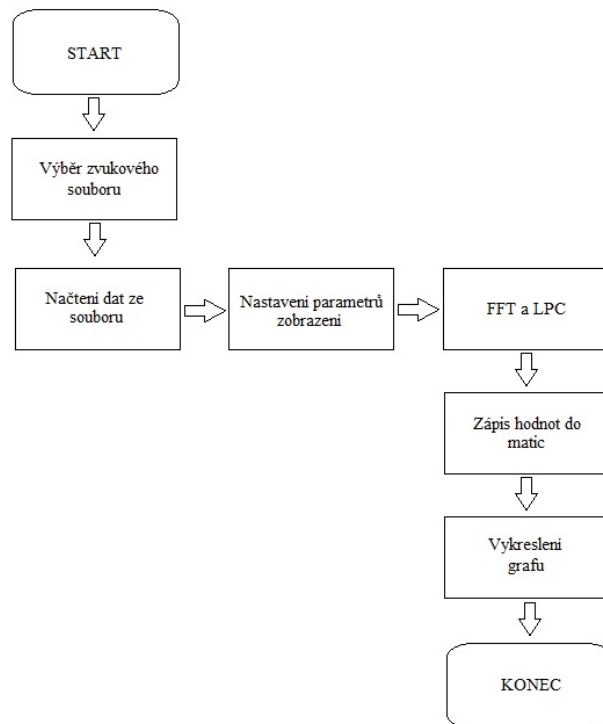


Obr. 5.2: Zjednodušený průběh skriptu spektrogramu v programu MATLAB

5.1.2 Funkce FFT a LPC

Tato funkce má za úkol zobrazit FFT spektrum a LPC vybraného zvukového souboru. Uživatel musí nejprve zvolit možnost - Zobrazení FFT + LPC. Jestliže ještě neučinil, musí nahrát zvukový vzorek a posléze nastavit příslušné parametry vykreslení, jako je rozsah zobrazení v Hz a v dB.

Tato funkce pracuje tak, že po načtení zvukového vzorku je vypočítána jeho časová délka. Následně dochází k výpočtu funkce *fft* a výpočtu její absolutní hodnoty. Následně dochází k výpočtu řádu LPC pomocí funkce *lpc*. Dále jsou nalezeny lokální maxima pomocí funkce *findpeaks*. Všechny zmíněné funkce jsou v programu MATLAB zabudovány. Nakonec dojde k zobrazení grafu.



Obr. 5.3: Zjednodušený průběh skriptu FFT a LPC v programu MATLAB

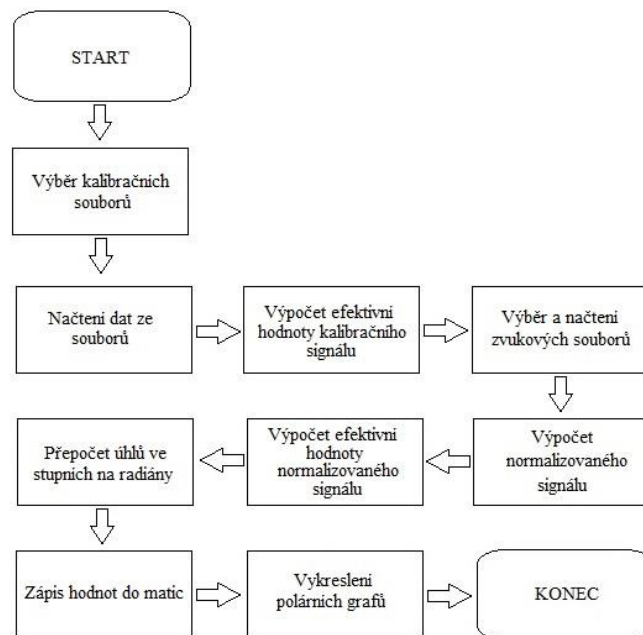
5.1.3 Funkce Směrové charakteristiky

Hlavním úkolem této funkce je zobrazit směrové vyzařování nástroje pomocí polárních grafů. V první řadě musí uživatel zvolit možnost - Směrové charakteristiky. Dále zvolí možnost 1. NÁSTROJ, kde je vyzván nejprve k zadání cesty ke kalibračním souborům, posléze k cestě jednotlivých vzorků. Následně to stejné udělá i při volbě 2. NÁSTROJ. Tyto vzorky i kalibrační soubory musí být stejně pojmenovány až na číselnou koncovku, která značí číslo mikrofону. Tím dojde ke správnému zobrazení charakteristik. V poslední řadě dojde k zobrazení dvou polárních grafů, kde jednotlivé křivky jsou od sebe barevně odlišeny.

Program pracuje tak, že na samém začátku je vypočítána efektivní hodnota kalibračního signálu. Tento signál byl nahrán pro každý mikrofon zvlášť. Dále dochází k výpočtu převrácené hodnoty, díky čemuž je získán koeficient. Ten se nadále využívá k normalizaci záznamu z hlediska citlivosti. Následně dochází k opětovnému výpočtu efektivní hodnoty, tentokrát ale u normalizovaného signálu. V dalším kroku dochází k uložení efektivní hodnoty ve směru vyzařování nástroje. V posledním kroku dochází k vykreslení polárního grafu.

Tato aplikace dokáže vykreslit směrové charakteristiky pro pět vzorků současně pro každý nástroj. Uživatel si však může zobrazit i menší množství vzorků tím, že dialogové

okno pro výběr souborů zavře. Taktéž si může zobrazit směrové charakteristiky jen pro jeden měřený nástroj.



Obr. 5.4: Zjednodušený průběh skriptu Směrová charakteristika v programu MATLAB

5.1.4 Funkce Porovnání vyšších harmonických složek

Náplní této funkce je zobrazit vyšší harmonické složky více zvukových vzorků do jednoho grafu. To se provádí pomocí Rychlé Fourierovy transformace nebo Lineárního prediktivního kódování. Pokud chce uživatel zobrazit tyto složky, musí nejprve vybrat možnost - Porovnání vyšších harmonických složek a následně možnost zobrazení mezi FFT a LPC. Poté musí vybrat dva zvukové vzorky, které chce zobrazit a nastavit příslušné parametry zobrazení, jako je rozsah zobrazení v Hz a v dB. Taktéž lze nastavit pro obě osy krok zobrazení. V poslední řadě jen zvolí možnost - Zobrazení.

Samotný program pracuje tak, že v případě zvolení možnosti FFT dochází po načtení zvukového vzorku k výpočtu časové délky záznamu. Následuje výpočet FFT pomocí funkce *fft*, která je v MATLABU již zabudována. Dále dochází k výpočtu absolutní hodnoty z FFT, aby nedocházelo k zobrazování záporných hodnot.

V případě zvolení možnosti LPC pracuje program tak, že po načtení zvukového souboru dochází k výpočtu řádu lineárního prediktivního kódování pomocí funkce *lpc*, která je v MATLABU již zabudována. Následně dochází k nalezení lokálních maxim pomocí funkce *findpeaks*, která je taktéž v MATLABU obsažena. V posledním kroku dochází k zobrazení grafu. Zjednodušený průběh skriptu je zde obdobný, jako u skriptu FFT a LPC, viz kapitola 5.1.2.

6 NAMĚŘENÁ DATA

Tato kapitola zobrazuje a zhodnocuje naměřené výsledky, které jsem získal při nahrávání zvukového spektra, viz kapitola 4. Jednotlivé zvukové nahrávky byly zpracovány v připravené aplikaci, která je popsána v páté kapitole. Následné grafické zobrazení spekter a jednotlivé zhodnocení se nachází v této kapitole.

Všechny zmíněné vzorky byly nahrány reálným hráčem, viz kapitola 3.1. Nejideálnější by bylo nahrát zvukové vzorky pomocí tzv. Heroldova nekonečného smyčce, u kterého je možné nastavit tlak na strunu, napětí žíní, místo buzení struny nebo také rychlost pohybu žíněné smyčky. Měření pomocí tohoto smyčce by eliminovalo dynamické rozdíly mezi jednotlivými tóny. Jelikož se nepovedlo takové zařízení sehnat, musí se tato práce bohužel spokojit s chybami, které jsou způsobeny hráčem (lidským faktorem).

6.1 Výběr vzorků

Pro jednotlivé spektrogramy, porovnání FFT, porovnání LPC a jejich zobrazení bylo vyčleněno několik tónů v různých dynamikách a smyčcových technikách. Mezi vzorky byly vybrány např.: prázdná struna g v dynamice *piano* při použití *détaché*, dále *sul ponticello* na prázdné struně a1 v dynamice *forte* a *sul tasto* na prázdné struně e2 v dynamice *piano*. Ze třetí polohy byl vybrán vzorek na struně g, jedná se o tón d1 v technice *spiccato* a znělé dynamice - *forte*. Jako další vzorek byl vybrán tón a2, který se nachází v páté poloze na struně a1 v dynamice *mezzoforte*.

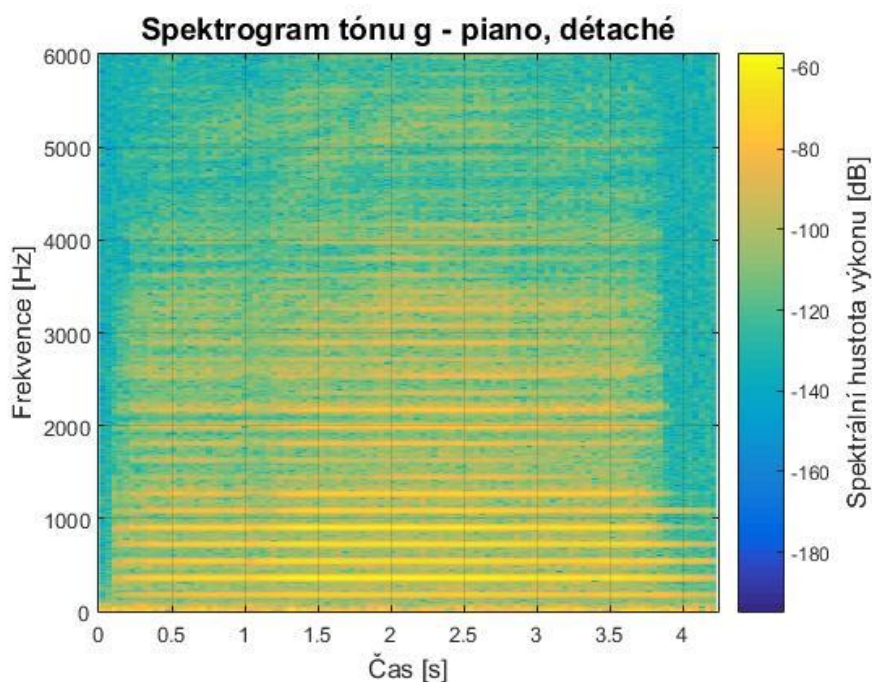
Směrové charakteristiky zobrazují jednotlivé smyčcové techniky, ze kterých byly vybrány tónové vzorky. Ty jsou dále analyzovány. Pro techniku *détaché* byly vybrány tóny - a1, d2, a2, h2, e3. Pro techniku *sautillé*, *spiccato* a *staccato* byly vybrány vzorky - a1, d2, e2, a2, h2. Pro techniku *sul ponticello* byly vybrány prázdné struny - g, d1, a1, e2.

6.2 Spektrogramy

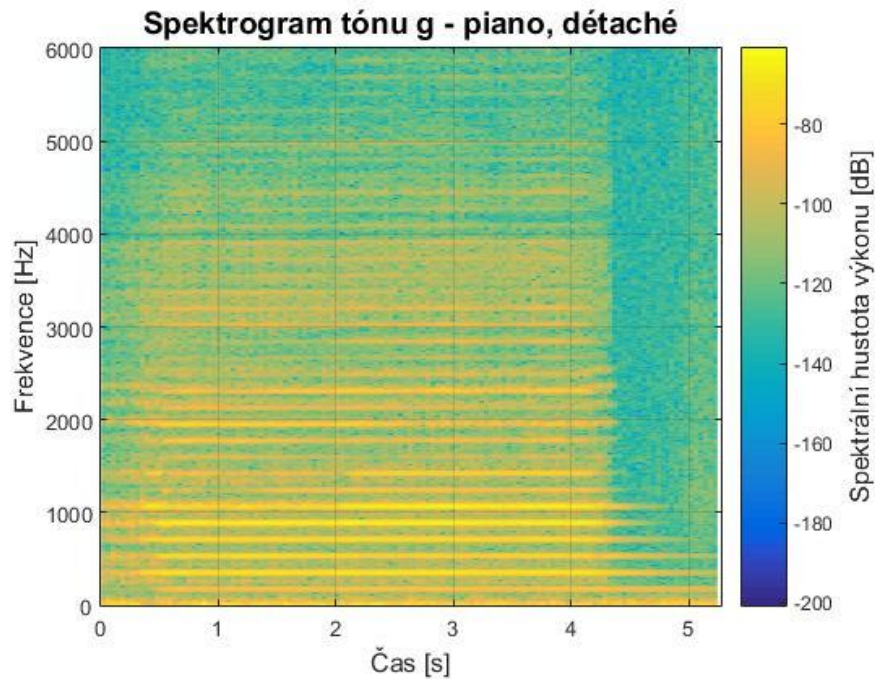
Tato podkapitola zobrazuje jednotlivé spektrogramy u vybraných tónových vzorků. U každého vzorku byla vybrána jiná smyčcová technika a dynamika. Jednotlivé vzorky budou dále popsány.

6.2.1 Detaché v dynamice piano - 1. poloha

Ze spektrogramů prázdné struny g v dynamice *piano* a při použití smyčcové techniky *détaché* lze vyčíst, že moderní housle mají bohatší spektrum než housle barokní. Nevýhoda dynamiky *piano* je ta, že nahrávky obsahují mnoho šumu, jak lze vidět hlavně na spektrogramu u barokních houslí. Moderní housle mají výraznější prvních sedm harmonických složek, zatímco barokní housle mají výraznější jen prvních pět harmonických. Moderní housle mají v této poloze plnější a průraznější barvu než housle barokní, které mají tón zastřenější. To mohou způsobovat rozdílné struny na obou nástrojích.



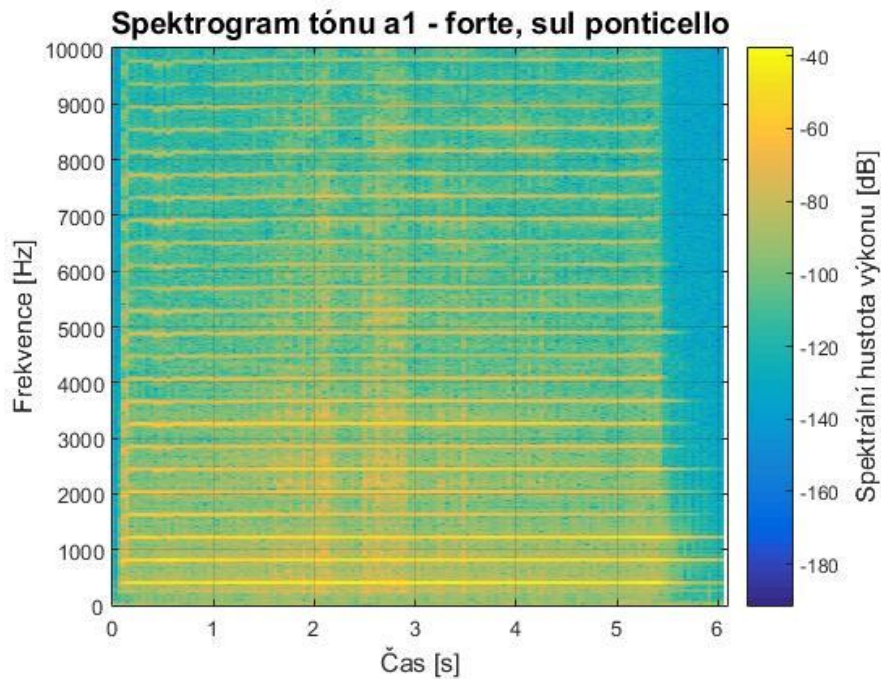
Obr. 6.1: Spektrogram prázdné struny g - moderní housle



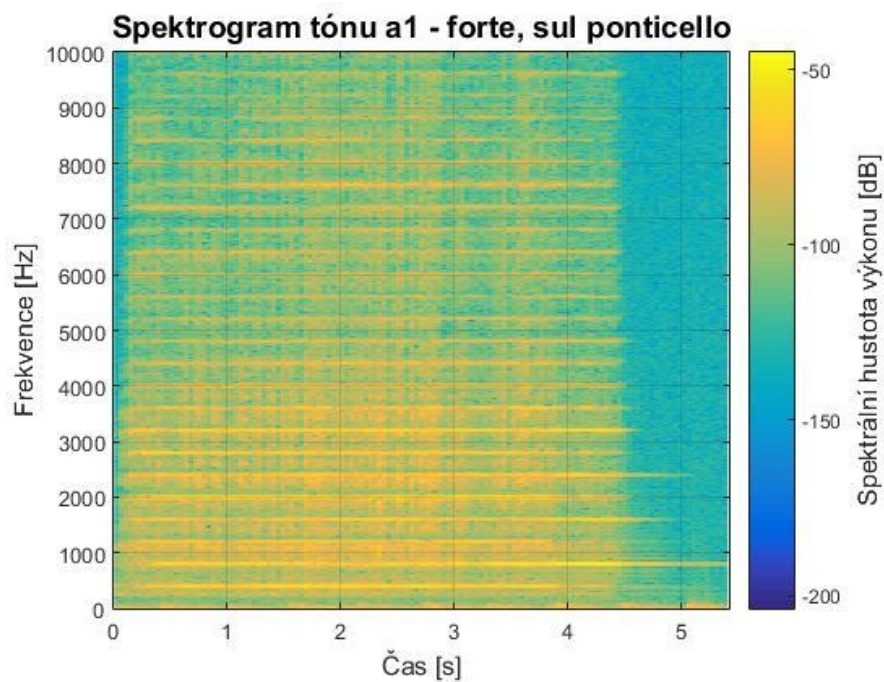
Obr. 6.2: Spektrogram prázdné struny g - barokní housle

6.2.2 Sul ponticello v dynamice forte - 1. poloha

Následující dva spektrogramy zobrazují spektra tónu a1 v dynamice *forte* a při použití techniky *sul ponticello*. Jak lze rozeznat na první pohled, tyto spektrogramy jsou mnohem hustší. U moderních houslí je tón více konkrétnější, lze to i vidět na spektrogramu, kde jsou i konkrétnější vyšší harmonické složky, zatímco u houslí barokních je tón více zastřenější a méně konkrétní. U moderního nástroje lze vidět, že kolem kmitočtu 3300 Hz dominuje jeden výraznější alikvótní tón (osmý harmonický).



Obr. 6.3: Spektrogram prázdné struny a1 - moderní housle

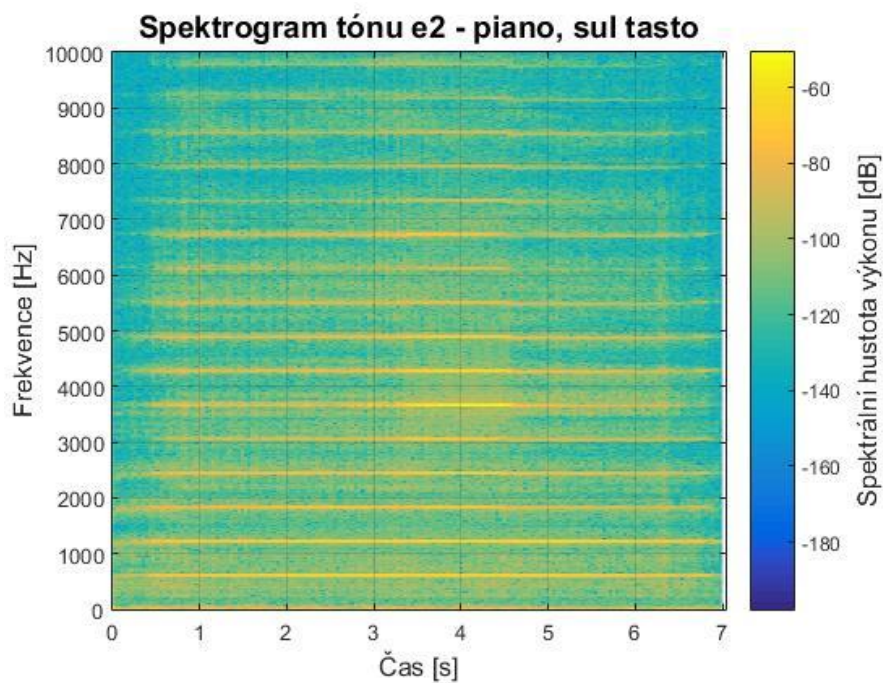


Obr. 6.4: Spektrogram prázdné struny a1 - barokní housle

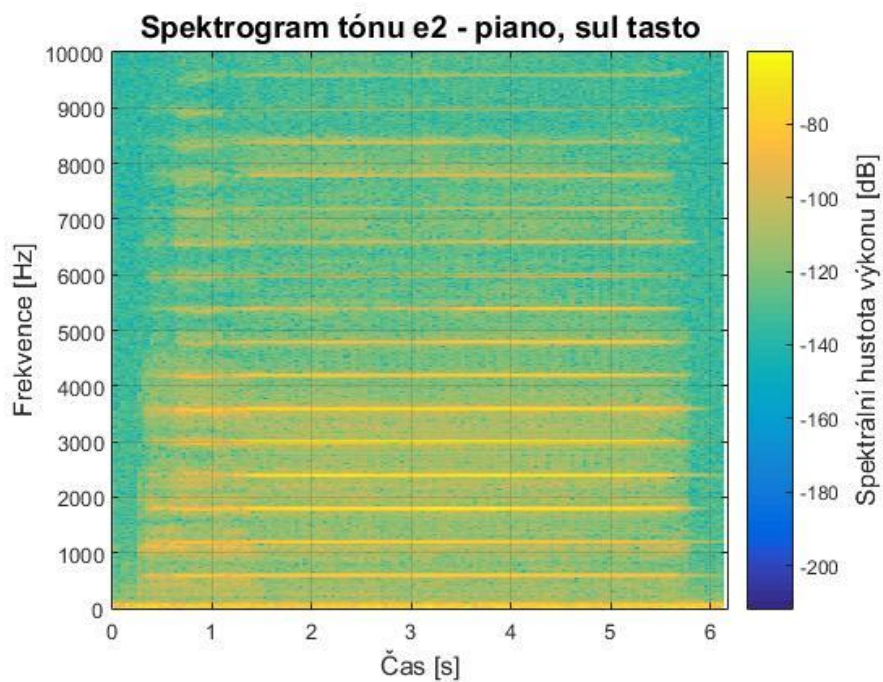
6.2.3 Sul tasto v dynamice piano - 1. poloha

Další spektrogramy zobrazují prázdnou strunu e2 v dynamice *piano* a při použití smyčkové techniky *sul tasto*, bohužel tato technika se nedá hrát za vyšší dynamiky, než

je zmíněno. Jinak by došlo k drhnutí struny o *hmatník* nástroje a tím ke vzniku šumu. I při použití této techniky a dynamiky jsou moderní housle barevně plnější, což lze vidět na spektrogramech. Tón je celkově pronikavější a kulatější, než je tomu u houslí barokních.



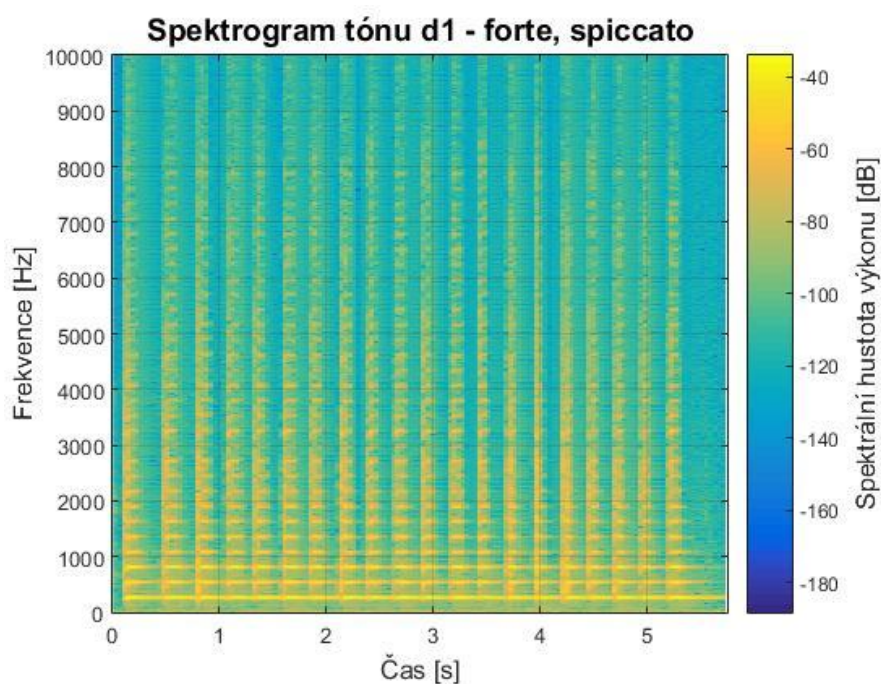
Obr. 6.5: Spektrogram prázdné struny e2 - moderní housle



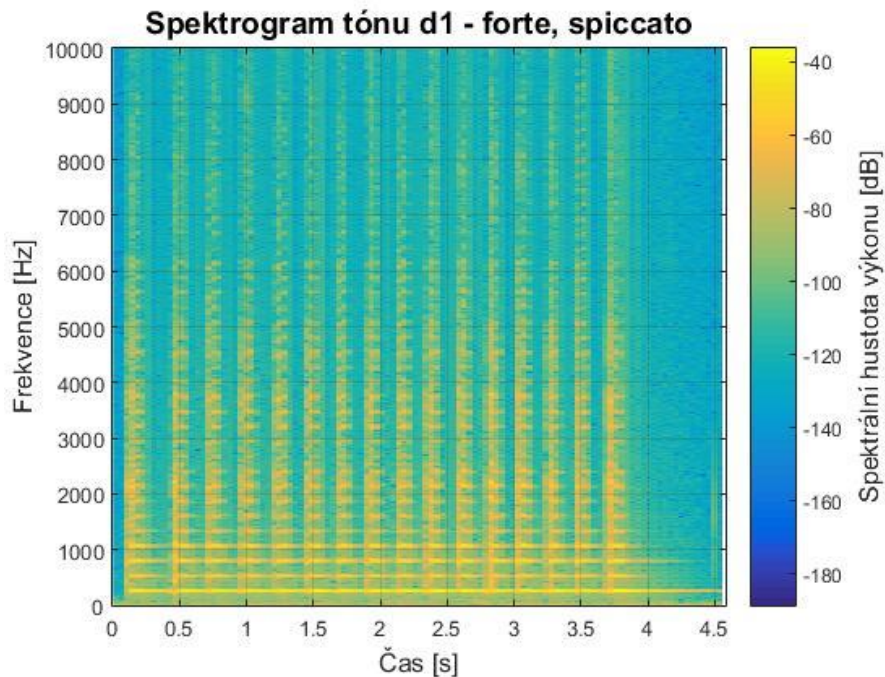
Obr. 6.6: Spektrogram prázdné struny e2 - barokní housle

6.2.4 Spiccato v dynamice forte - 3. poloha

Další použitou technikou bylo *spiccato* v dynamice *forte*. Jako vzorek byl vybrán tón d1, který byl ale zahrán na struně g ve třetí poloze. Z uvedených spektrogramů lze vypořadovat, že moderní housle mají sytější zvukové spektrum a zahráný tón obsahuje více vyšších harmonických složek, tón má více plný a pronikavější tónbr. Jak lze z obrázku 6.8 vidět, tak u barokních houslí dochází ve vyšších kmitočtech ke zřídnutí vyšších harmonických složek.



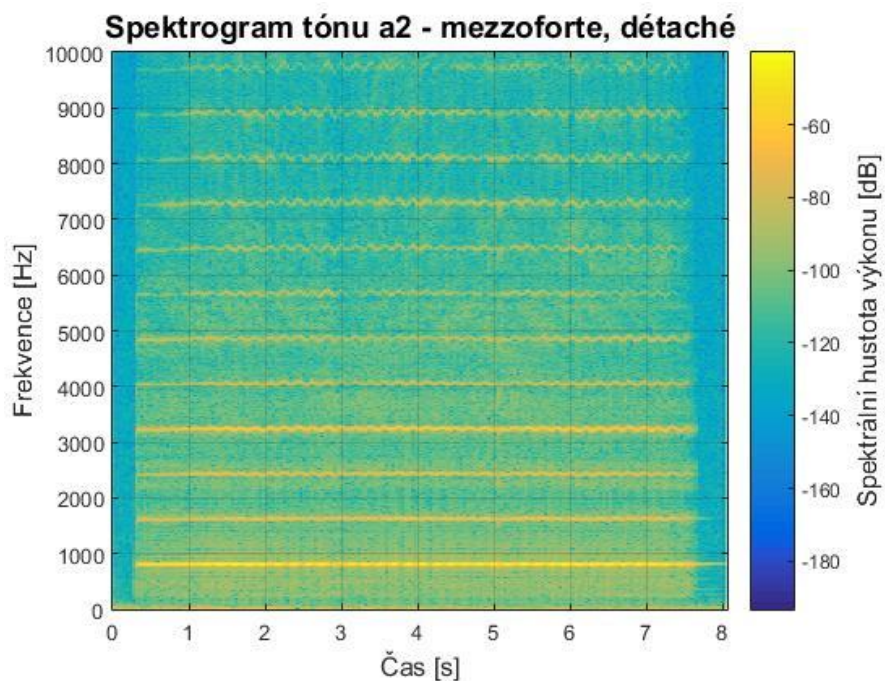
Obr. 6.7: Spektrogram tónu d1 - moderní housle



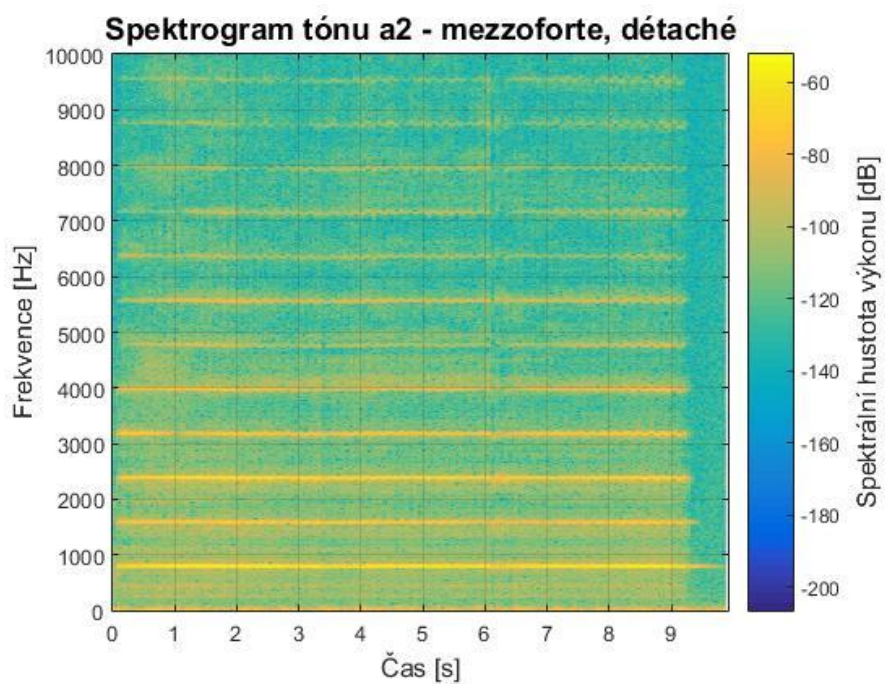
Obr. 6.8: Spektrogram tónu d1 - barokní housle

6.2.5 Detaché v dynamice mezzoforte - 5. poloha

Následující spektrogramy zobrazují tón a2, který je zahrán na struně a1 v páté poloze. Jako smyčcová technika bylo zvoleno *détaché* v dynamice *mezzoforte*. U moderních houslí lze rozpoznat hustější spektrum, tón je celkově silnější, průraznější a konkrétnější, zatímco u houslí barokních je tón více zastřenější a méně pronikavější. Taktéž bylo použito *vibrato*, což lze na spektrogramech vyzorovat. Jedná se o pravidelné kolísání výšky tónu. Literatura [7] (str. 111) udává: *vibrující tón je po zvukově estetické stránce evidentně bohatší než nevibrující „rovný“ tón*. K obohacení dochází ve frekvenčním spektru, zde vznikají tzv. postranní pásma. Dochází k intenzivnějšímu nárůstu nových složek.



Obr. 6.9: Spektrogram tónu a2 - moderní housle



Obr. 6.10: Spektrogram tónu a2 - barokní housle

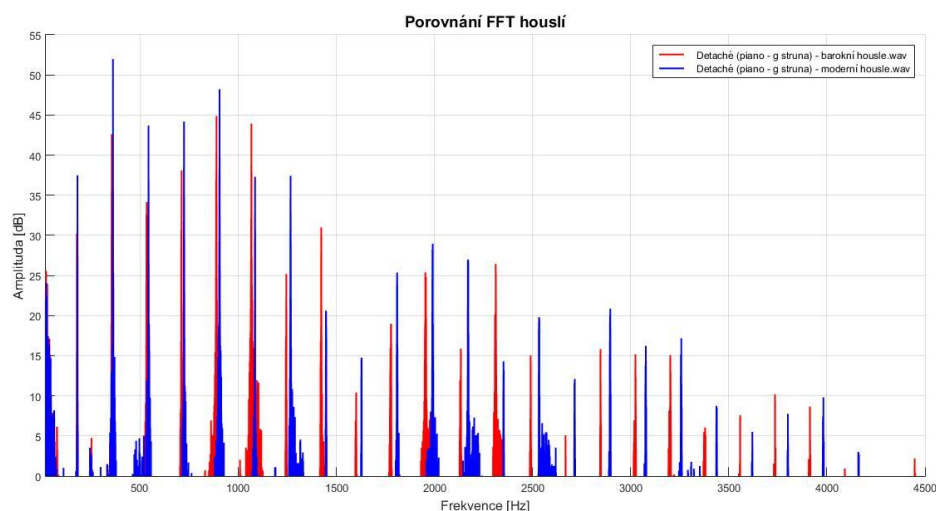
6.3 Porovnání FFT

V následující podkapitole jsou zobrazeny jednotlivé FFT spektra u vybraných tónových vzorků houslí. U každého vzorku byla vybrána jiná smyčcová technika při použití různé dynamiky v různé poloze. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.4 - barva zvuku souvisí se strukturou kmitočtu zvuku, který vytváří příslušný hudební nástroj. Poměrně rozdílný charakter v barvě udávají vyšší harmonické složky. Obecně lze říci, že tón, který ve svém spektru obsahuje menší počet vyšších harmonických složek, se jeví jako měkký až dutý. Naopak tóny, které obsahují ve svém spektru větší obsah vyšších harmonických složek, náleží plná a ostrá barva [2]. Jednotlivé grafy budou porovnány a popsány níže. Při popisu jednotlivých spekter jsem čerpal z literatury [2] (str. 63 - 65).

6.3.1 Détaché v dynamice piano - 1. poloha

Následující graf zobrazuje porovnání FFT při použití smyku *détaché* v dynamice *piano* prázdné struny g. Na první pohled si lze všimnout, že moderní housle mají výraznější FFT spektrum, mají větší odstup užitečného signálu od šumu, viz tabulka 6.1. První harmonická je u obou měřených nástrojů potlačena, tato harmonická však nemá výraznější vliv při rozlišování výšky tónu, díky tomuto potlačení se může tón jevit trochu „úzce“. Tento pokles je způsoben díky rozměrové nedostatečnosti nástroje s porovnáním vlnové délky nejhlubšího tónu. [6]

Moderní housle mají z celého spektra nejvýraznější druhou a pátou harmonickou složku. Stejně tak i housle barokní mají tyto složky z celého svého spektra nejsilnější. Druhá harmonická složka dodává tónu plnost, jelikož se jedná o interval oktávy. Pátá harmonická složka dodává tónu jas a bohatost. U barokních houslí je výraznější i šestá a osmá harmonická složka oproti houslím moderním. Obecně tyto vyšší harmonické složky vytvářejí tón měkký a zastřenější. Frekvence fundamentů obou měřených vzorků se liší o 3,2 Hz.



Obr. 6.11: FFT spektrum prázdné struny g - moderní a barokní housle

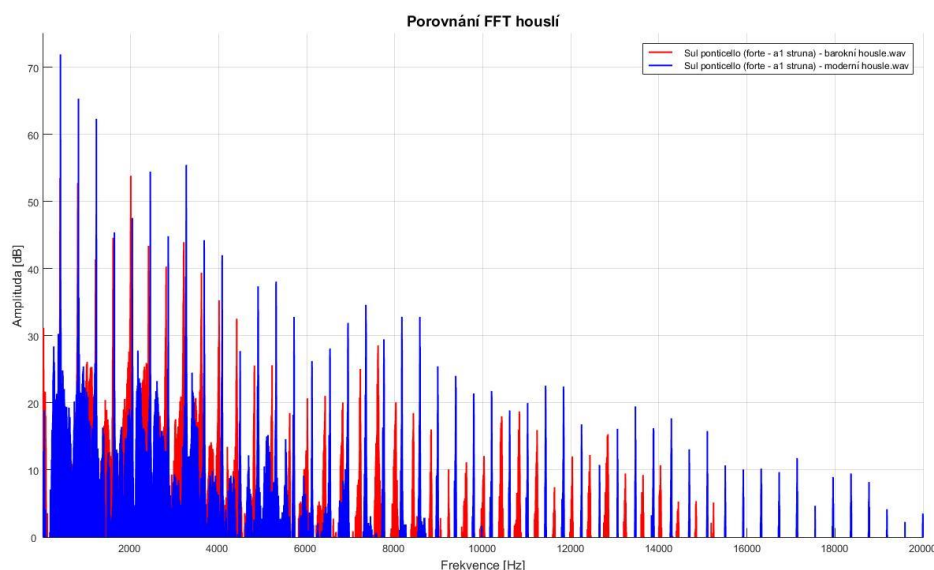
Tab. 6.1: Porovnání hlasitosti pro prvních osm harmonických složek

Typ houslí	Barokní	Moderní	Rozdíl hlasitostí ($L_2 - L_1$) [dB]
Použité struny	Sřevové	Syntetické	
Analyzovaný vzorek	Prázdná struna g - <i>détaché</i>		
Základní harmonická f_0 [Hz]	177,90	181,10	
Hlasitost vyšších harmonických složek			
	L_1 [dB]	L_2 [dB]	
1. harmonická	30,23	37,48	7,25
2. harmonická	42,60	51,97	9,37
3. harmonická	34,14	43,68	9,54
4. harmonická	38,11	44,19	6,08
5. harmonická	44,88	48,21	3,33
6. harmonická	43,93	37,30	-6,63
7. harmonická	25,19	37,43	12,24
8. harmonická	31,00	20,62	-10,38

6.3.2 Sul ponticello v dynamice forte - 1. poloha

Další graf zobrazuje FFT spektrum prázdných strun a1 při použití techniky *sul ponticello* v dynamice *forte* u obou měřených nástrojů. Na první pohled lze spatřit větší zastoupení vyšších harmonických složek u obou měřených nástrojů. Tóny se tedy jeví jako plnější a ostřejší. To je ale bezpochyby částečně způsobeno použitou smyčcovou technikou. Moderní housle mají výraznější první tři harmonické složky oproti houslím barokním. Tón se jeví více jasný. Třetí harmonická složka mění barvu tónu - činí jej dutým a hrdelním. Docela patrný je zde propad u čtvrté harmonické složky, což může mít za následek sníženou pronikavost tónu, nicméně tato vyšší harmonická složka téměř nijak neovlivňuje barvu tónu. Následný růst dochází u šesté a osmé vyšší harmonické. Tyto

složky tón změkčují a zjemňují. Barokní housle mají výraznější pátou harmonickou, která tón zjasňuje. Frekvence fundamentů obou měřených vzorků je rozdílná o 10,73 Hz.



Obr. 6.12: FFT spektrum prázdné struny a1 - moderní a barokní housle

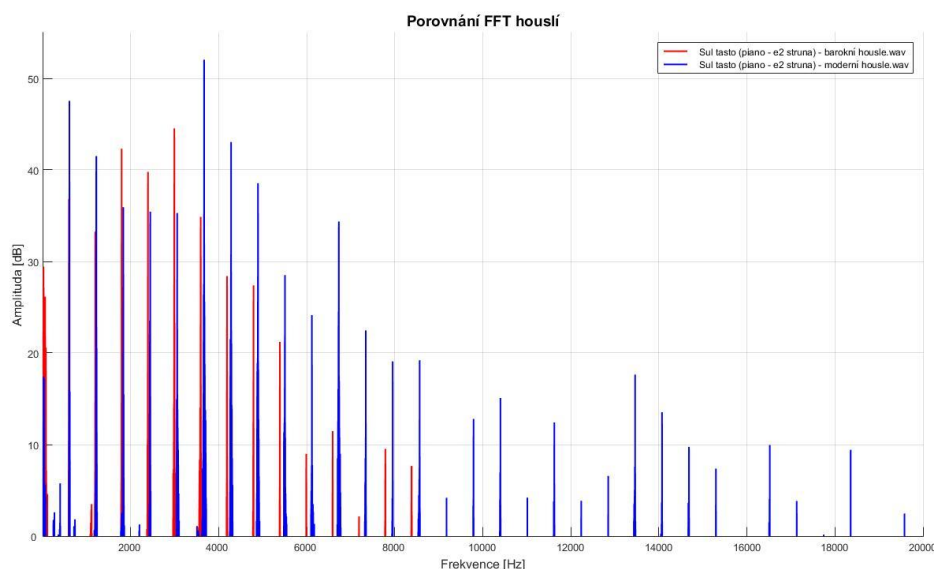
Tab. 6.2: Porovnání hlasitosti pro prvních devět harmonických složek

Typ houslí	Barokní	Moderní	Rozdíl hlasitosti ($L_2 - L_1$) [dB]
Použité struny	Střevové	Syntetické jádro	
Analyzovaný vzorek	Prázdná struna a1 - <i>sul ponticello</i>		
Základní harmonická f_0 [Hz]	394,61	405,34	
Hlasitost vyšších harmonických složek [dB]			
	L_1 [dB]	L_2 [dB]	
1. harmonická	53,49	71,89	18,40
2. harmonická	52,73	65,30	12,57
3. harmonická	41,37	62,30	20,93
4. harmonická	44,60	45,39	0,79
5. harmonická	53,83	47,53	-6,30
6. harmonická	43,40	54,45	11,05
7. harmonická	40,29	44,81	4,52
8. harmonická	43,93	55,44	11,51
9. harmonická	39,38	44,22	4,84

6.3.3 Sul tasto v dynamice piano - 1. poloha

Následující FFT spektrum zobrazuje prázdnou strunu e2 při použití techniky *sul tasto* v dynamice *piano*. Na první pohled je zřejmé, že moderní housle mají bohatější spektrum, které obsahuje více vyšších harmonických složek. Díky tomuto je tón plnější. Lze si také všimnout toho, že barokní housle mají výraznější třetí, čtvrtou a pátou vyšší harmonickou

složku. Třetí harmonická tón zjasňuje a činí tón dutým. Čtvrtá vyšší harmonická tón dělá pronikavějším a pátá harmonická dodává tónu jas. U houslí moderních je nejvýraznější šestá vyšší harmonická, ta dodává tónu jas. Frekvence fundamentů obou měřených vzorků se liší o 10,87 Hz.



Obr. 6.13: FFT spektrum prázdné struny e2 - moderní a barokní housle

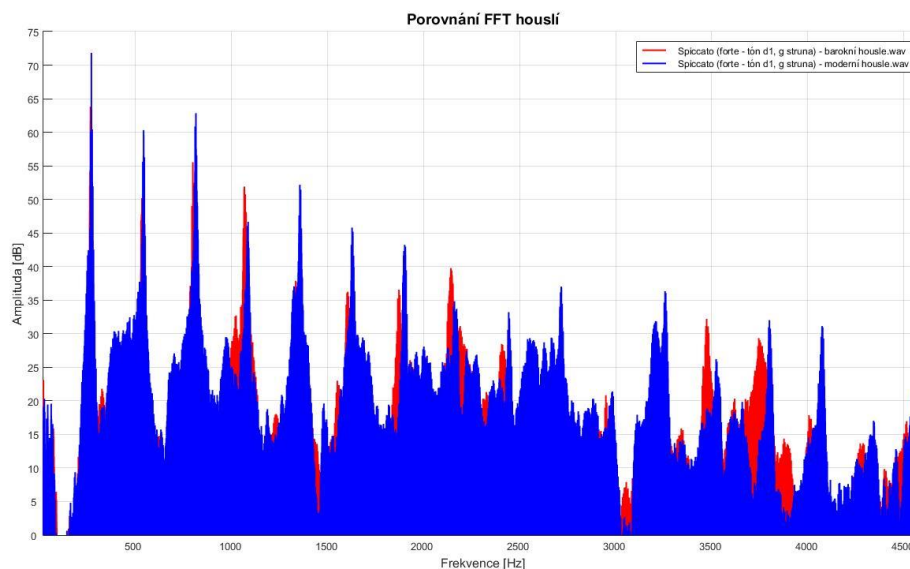
Tab. 6.3: Porovnání hlasitosti pro prvních pět harmonických složek

Typ houslí	Barokní	Moderní	Rozdíl hlasitostí (L ₂ - L ₁) [dB]
Použité struny	Střevové	Syntetické jádro	
Analyzovaný vzorek	Prázdná struna e2 - <i>sul tasto</i>		
Základní harmonická f ₀ [Hz]	598,85	609,72	
Hlasitost vyšších harmonických složek [dB]			
	L ₁ [dB]	L ₂ [dB]	
1. harmonická	36,82	47,54	10,72
2. harmonická	33,26	41,50	8,24
3. harmonická	42,32	35,93	-6,39
4. harmonická	39,79	35,44	-4,35
5. harmonická	44,54	35,29	-9,25

6.3.4 Spiccato v dynamice forte - 3. poloha

Další graf zobrazuje FFT spektrum tónu d1 zahraného ve třetí poloze. Jako smyčcová technika bylo použito *spiccato* v dynamice *forte*. Z následujícího grafu lze vyčíst, že nahrané vzorky obsahují více ruchových složek. Moderní housle mají výraznější spektrum, které obsahuje i více harmonických složek. Díky tomu se tón jeví plnější a více kulatější. Hodně výraznou mají první harmonickou. Dále druhou vyšší harmonickou, která tónu dodává jasnost a třetí harmonickou, ta tón taktéž zjasňuje a výrazněji mění

celkovou barvu tónu, ten se jeví více dutým nebo hrdelním. K dalším výraznějším složkám patří i pátá, šestá a sedmá. Všechny tyto složky tón zjasňují a obohacují. Frekvence fundamentů obou měřených vzorků je rozdílná o 4,78 Hz.



Obr. 6.14: FFT spektrum tónu d1 ve 3. poloze - moderní a barokní housle

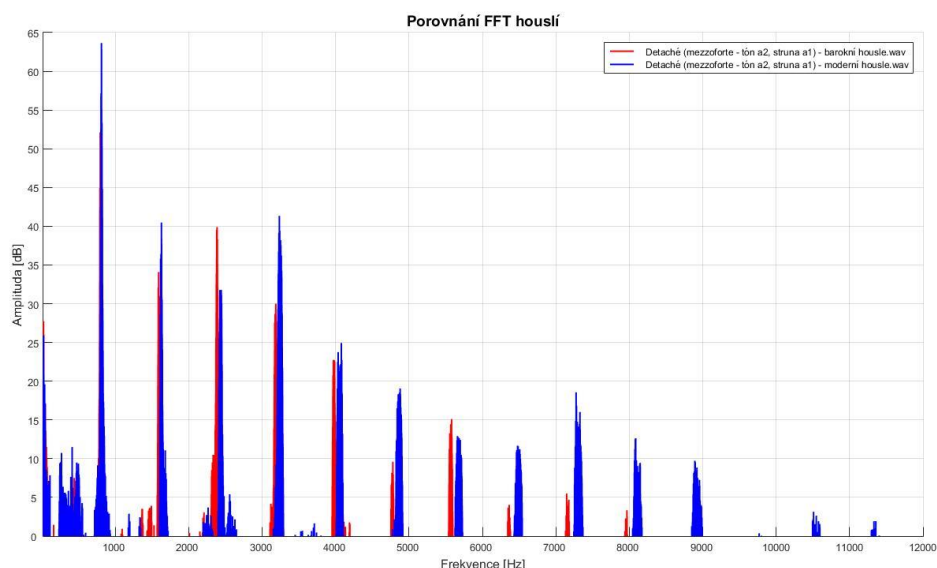
Tab. 6.4: Porovnání hlasitosti pro první devět harmonických složek

Typ houslí	Barokní	Moderní	Rozdíl hlasitosti (L ₂ - L ₁) [dB]
Použité struny	Střevové	Syntetické jádro	
Analyzovaný vzorek	Tón d1 (3. poloha) - <i>spiccato</i>		
Základní harmonická f ₀ [Hz]	265,12	269,90	
Hlasitost vyšších harmonických složek [dB]			
	L ₁ [dB]	L ₂ [dB]	
1. harmonická	63,80	71,82	8,02
2. harmonická	50,20	60,32	10,12
3. harmonická	55,55	62,85	7,30
4. harmonická	51,91	46,67	-5,24
5. harmonická	37,88	52,18	14,30
6. harmonická	36,25	45,80	9,55
7. harmonická	36,57	43,23	6,66
8. harmonická	39,76	34,84	-4,92
9. harmonická	28,46	33,20	4,74

6.3.5 Détaché v dynamice mezzoforte - 5. poloha

Následující FFT spektrum ukazuje tón a2 zahráný v páté poloze. Použito bylo *détaché* v dynamice *mezzoforte*. Moderní housle mají výraznější a bohatší spektrum, které obsahuje více harmonických složek. Hodně výraznou mají první harmonickou složku.

Potom druhou a čtvrtou vyšší harmonickou, tyto složky činí tón více pronikavějším a jasným, nemění však nijak podstatně barvu zvuku. Barokní housle mají výraznější první harmonickou a dále třetí vyšší harmonickou. Tato složka způsobuje změnu barvy tónu, celkový tón zjasňuje. Patrnou změnou ve spektru je počet vyšších harmonických složek, který se se zvyšujícím se rozsah směrem nahoru zmenšuje. Tón je v této poloze pronikavější a jasný. Frekvence fundamentů obou měřených vzorků se liší o 9,12 Hz.



Obr. 6.15: FFT spektrum tónu a2 v 5. poloze - moderní a barokní housle

Tab. 6.5: Porovnání hlasitosti pro prvních pět harmonických složek

Typ houslí	Barokní	Moderní	Rozdíl hlasitosti (L ₂ - L ₁) [dB]
Použité struny	Střevové	Syntetické jádro	
Analyzovaný vzorek	Tón a2 (5.poloha) - <i>détaché</i>		
Základní harmonická f ₀ [Hz]	794,91	804,03	
Hlasitost vyšších harmonických složek [dB]			
	L ₁ [dB]	L ₂ [dB]	
1. harmonická	52,13	63,65	11,52
2. harmonická	34,09	40,47	6,38
3. harmonická	39,90	31,78	-8,12
4. harmonická	30,00	41,34	11,34
5. harmonická	22,75	24,93	2,18

6.4 Porovnání LPC

V následující kapitole jsou zobrazeny formantové oblasti u tónových vzorků. Důležité je zde zmínit, že LPC analýza se využívá hlavně pro zpracování řeči. Jedním z nejdůležitějších faktorů při volbě LPC analýzy bylo správně zvolit predikční

koeficienty pro správný výpočet a zobrazení LPC spektra. Jako optimální řád se mi jevilo použití pravidla $p = 4 + \frac{f_{vz}}{1000}$, které se v praxi využívá právě pro zpracování řeči. Důvodem, proč byl zvolen tento řád, bylo malé rozkolísání spektra a zároveň jasné určení prvních tří formantových oblastí. Nicméně pro větší rozkolísání spektra a správné zobrazení prvních tří formantových oblastí byl řád experimentálně navýšen na hodnotu $p = 4 + 0,97 * (\frac{f_{vz}}{1000})$. Bohužel se ani při použití tohoto řádu nepovedlo získat pro všechny zvukové vzorky stejný počet formantů. Nejméně se našly tři formanty pro každý ze vzorků, u některých vzorků se našly i formanty čtvrté a páté (např.: Obr. 6.18).

Z uvedených FFT spekter v kapitole 6.3 lze z lineární frekvenční stupnice v rozsahu zhruba do 5 kHz určit výraznější formantové oblasti. *Obecně jsou tyto oblasti spojovány s vlivem vlastních rezonančních módů ozvučných skříněk nástrojů, např.: u houslí s Helmholtzovou rezonancí (260 - 300 Hz), hlavní rezonancí skřínky (cca 470 Hz), rezonancí vrchní desky (cca 560 Hz) s vlivem krku (cca 1100 Hz) a kobytky (2 - 4 kHz), jak je popsáno v literatuře [6] (str. 293).* Na polohu formantových oblastí má vliv hned několik činitelů - tlak, poloha, rychlost, sklon a nakalafunování smyčce. Obecně lze říci, že technika hry má největší vliv na rozmístění těchto oblastí, které jsou u smyčcových nástrojů velmi proměnné a úroveň je oproti nástrojům dechovým méně výrazná [6].

Formanty u houslí lze identifikovat v několika frekvenčních zónách a rozdělit do určitých oblastí. Jak již bylo rozlišeno v publikaci [6], existuje až 6 frekvenčních zón pro případ kvalitních mistrovských nástrojů:

Tab. 6.6: Formantové oblasti [6]

Oblast	Frekvence [Hz]	Úroveň vyšších harmonických
A	190 - 650	A > B
B	650 - 1300	B < A, C, D
C	1300 - 1640	C > B
D	1640 - 2580	D > B, F
E	2580 - 4200	E > F
F	4200 - 7000	F < D, E

Literatura [6] uvádí, že první formant u houslí je situován kolem kmitočtu 400 Hz, druhý formant v oblasti mezi 800 - 1200 Hz a třetí formant mezi 1200 - 1600 Hz tónu. Další formant se vyskytuje v oblasti od 2000 - 2600 Hz a poslední je v rozmezí mezi 3000 - 4000 Hz.

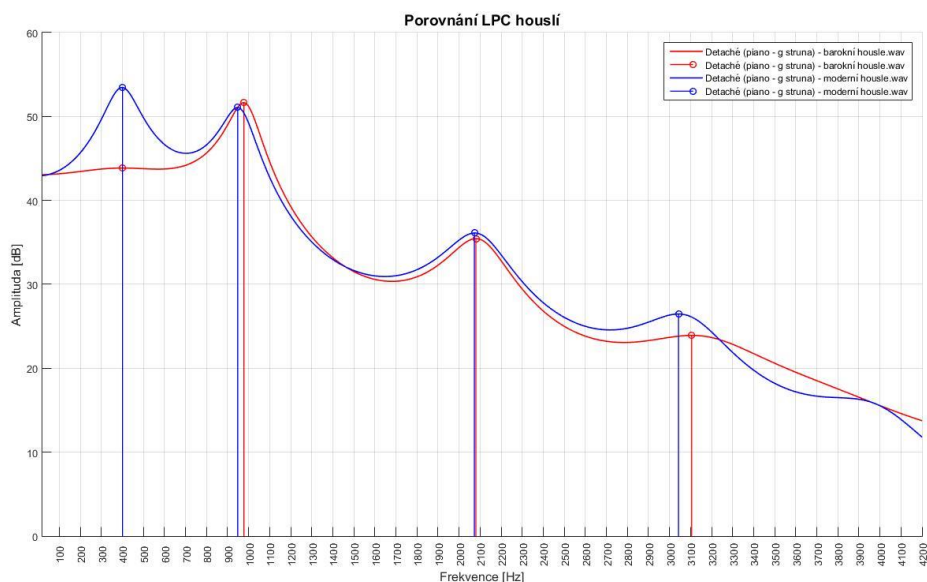
Jednotlivé šířky pásem byly stanoveny pro pokles o 3 dB a určeny odečtem z grafů. Tato šířka nešla bohužel určit pro všechny formanty, jelikož pro ně pokles nebyl dostatečný (např.: Obr. 6.18). Při popisu jednotlivých formantových oblastí, jaký charakter tónu podporují, jsem vycházel z literatury [6] (str. 294).

6.4.1 Détaché v dynamice piano - 1. poloha

Následující graf zobrazuje LPC analýzu prázdné struny g v dynamice *piano* při použití *détaché*. Nachází se zde tři formantové oblasti. První z nich je v rozmezí od 100 do 1600 Hz. Zde se nachází dva formanty pro oba měřené nástroje. První formant má shodnou frekvenci pro obě housle, tj. 401 Hz. Tento formant je spojován se sytostí až sonoritou tónu. Jedná se o vokál „O“. Moderní housle jej mají silnější a širší. Dále se zde nachází druhý formant, který má pro barokní housle kmitočet 978 Hz a pro housle moderní 948 Hz. Tento formant je spojován s nasalitou tónu, jedná se o vokál „A“. Barokní housle mají tento formant silnější, ale užší než housle moderní.

Druhá se nachází v rozmezí od 1600 do 2600 Hz. V této oblasti se nachází pro každý z nástrojů další formant. Housle barokní jej mají na kmitočtu 2080 Hz a housle moderní na kmitočtu 2073 Hz. Obecně formanty v této oblasti podporují jasnost a světlost tónu, jedná se o vokál „E“. Moderní housle mají tento formant silnější a o 30 Hz širší.

Třetí formantová oblast se nachází v rozmezí od 2600 do 4000 Hz. Barokní housle zde mají jeden formant na kmitočtu 3105 Hz a housle moderní na kmitočtu 3043 Hz. Formanty v této kmitočtové oblasti přispívají k ostrosti tónu. Jedná se o vokál „I“. Moderní housle jej mají silnější.



Obr. 6.16: LPC analýza prázdné struny g

Tab. 6.7: Hodnoty LPC analýzy prázdné struny g

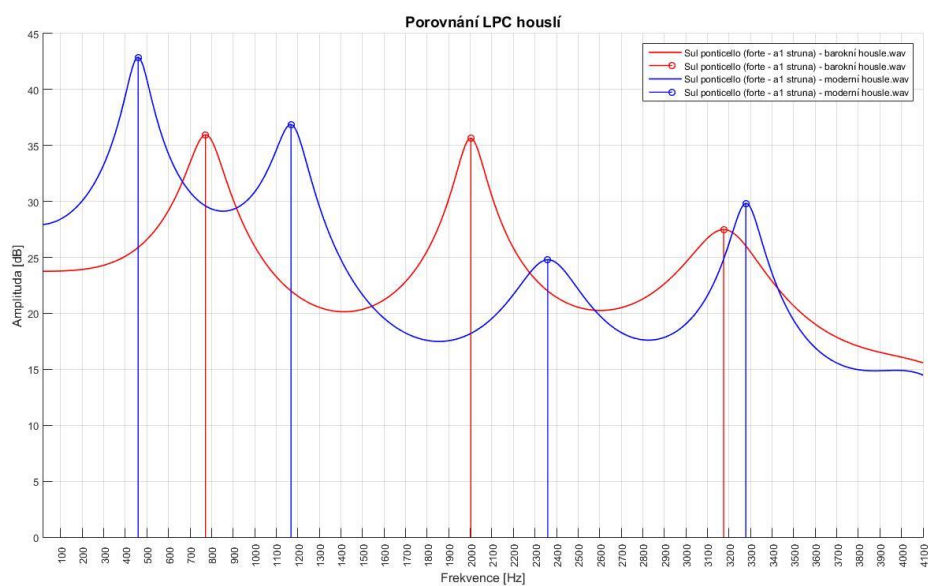
Typ houslí	Barokní	Moderní	Rozdíl hlasitostí ($L_2 - L_1$) [dB]
Použité struny	Střevové	Syntetické jádro	
Analyzovaný vzorek	Prázdná struna g - <i>détaché</i>		
Amplituda nalezených formantů			
	L_1 [dB]	L_2 [dB]	
1. formant	43,86	53,46	9,6
2. formant	51,65	51,07	-0,58
3. formant	35,45	36,12	0,67
4. formant	23,92	26,47	2,55
Kmitočet nalezených formantů			Rozdíl frekvencí ($f_2 - f_1$) [Hz]
	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	
1. formant	401	401	0
2. formant	978	948	-30
3. formant	2080	2073	-7
4. formant	3105	3043	-62
Šířka nalezených formantů [Hz]			
	Barokní	Moderní	
1. formant	-	320 - 490	
2. formant	885 - 1045	850 - 1025	
3. formant	1910 - 2210	1888 - 2218	
4. formant	-	-	

6.4.2 Sul ponticello v dynamice forte - 1. poloha

Na obr. 6.17 je zobrazena LPC analýza prázdné struny a1 při použití techniky *sul ponticello* v dynamice *forte*. Z grafu je patrné, že první formantová oblast se nachází od kmitočtu 100 Hz do 1600 Hz. Zde se pro barokní housle vyskytuje jeden formant na kmitočtu 772 Hz. U houslí moderních zde leží dva formanty, první je na kmitočtu 459 Hz, který podporuje sytost tónu. A druhý je na kmitočtu 1169 Hz, tento formant podporuje nasalitu tónu. Moderní housle mají první formant silnější, ale užší o 50 Hz.

Druhá formantová oblast se nachází od frekvence 1600 Hz do 2900 Hz. Oba nástroje zde mají jeden svůj formant. V případě houslí barokních je formant na kmitočtu 2003 Hz, u moderních houslí je na kmitočtu 2359 Hz. Formanty v této kmitočtové oblasti podporují jasnost a světlost tónu.

Třetí formantová oblast se nachází od 2900 Hz po 4000 Hz. Opět zde mají oba měřené nástroje své formanty. Barokní housle jej mají na kmitočtu 3175 Hz a housle moderní na 3278 Hz. Tyto formanty podporují ostrost. Moderní housle mají tento formant silnější, ale užší.



Obr. 6.17: LPC analýza prázdné struny a1

Tab. 6.8: Hodnoty LPC analýzy prázdné struny a1

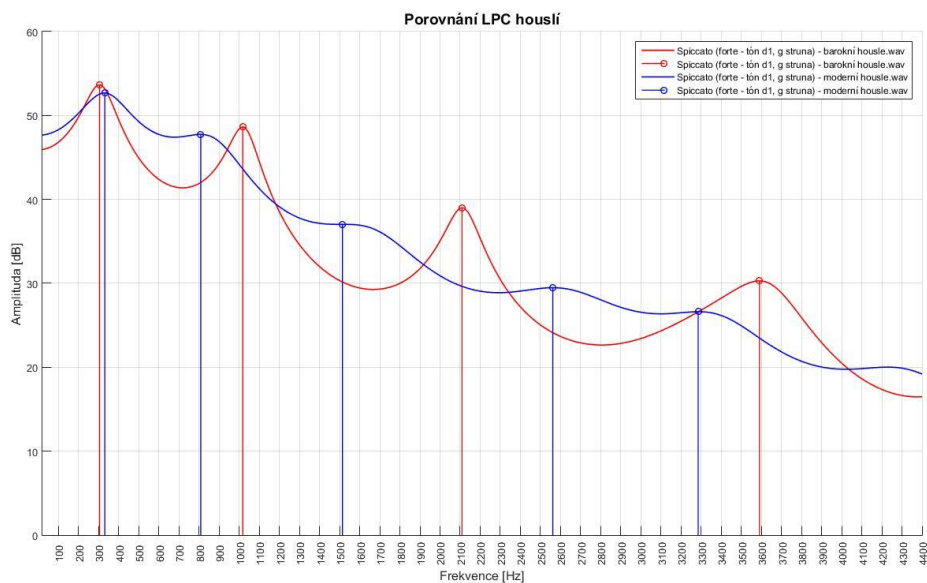
Typ houslí	Barokní	Moderní	Rozdíl hlasitostí ($L_2 - L_1$) [dB]
Použité struny	Střevové	Syntetické jádro	
Analyzovaný vzorek	Prázdná struna a1 - <i>sul ponticello</i>		
Amplituda nalezených formantů			
	L_1 [dB]	L_2 [dB]	
1. formant	35,95	42,88	6,93
2. formant	35,64	36,87	1,23
3. formant	27,49	24,79	-2,7
4. formant	-	29,82	29,82
Kmitočety nalezených formantů			
	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	Rozdíl frekvencí ($f_2 - f_1$) [Hz]
1. formant	772	459	-313
2. formant	2003	1169	-834
3. formant	3175	2359	-816
4. formant	-	3278	3278
Šířka nalezených formantů [Hz]			
	Barokní	Moderní	
1. formant	694 - 854	405 - 515	
2. formant	1935 - 2068	1084 - 1236	
3. formant	2995 - 3335	2200 - 2515	
4. formant	-	3210 - 3346	

6.4.3 Spiccato v dynamice forte - 3. poloha

Další graf zobrazuje LPC analýzu tónu d1 ve třetí poloze zahráný technikou *spiccato* v dynamice *forte*. Z obrázku jsou opět parné tři hlavní formantové oblasti. První je v rozmezí od 100 Hz do 1100 Hz, ve které se nachází dva formanty u moderních i barokních houslí. První formant u houslí barokních je na 305 Hz a druhý na 1018 Hz, housle moderní jej mají na kmitočtu 331 Hz a 809 Hz. Tyto formanty tvoří tón sytější, až sonorní. Barokní housle mají oba formanty silnější, ale užší.

Druhá formantová oblast je v rozmezí od 1100 Hz do 2900 Hz. Moderní housle zde mají dva své formanty, první na kmitočtu 1514 Hz a druhý na 2561 Hz, který podporuje jasnost tónu. Barokní housle jeden, ten leží na kmitočtu 2109 Hz, který taktéž přispívá k jasnosti a světlosti tónu.

Třetí formantová oblast se nachází od kmitočtu 2900 Hz do 4000 Hz. Oba nástroje zde mají jeden svůj formant. Housle barokní ho mají na kmitočtu 3590 Hz a housle moderní na 3285 Hz. Tyto formanty podporují ostrost tónu.



Obr. 6.18: LPC analýza tónu d1 ve 3. poloze

Tab. 6.9: Hodnoty LPC analýzy tónu d1 ve 3. poloze

Typ houslí	Barokní	Moderní	Rozdíl hlasitostí ($L_2 - L_1$) [dB]
Použité struny	Střevové	Syntetické jádro	
Analyzovaný vzorek	Tón d1 ve 3. poloze - <i>Spiccato</i>		
Amplituda nalezených formantů			
	L_1 [dB]	L_2 [dB]	
1. formant	53,65	52,68	-0,97
2. formant	48,64	47,74	-0,9
3. formant	39,00	37,03	-1,97
4. formant	30,29	29,48	-0,81
5. formant	-	26,62	26,62
Kmitočet nalezených formantů			
	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	Rozdíl frekvencí ($f_2 - f_1$) [Hz]
1. formant	305	331	26
2. formant	1018	809	-209
3. formant	2109	1514	-595
4. formant	3590	2561	-1029
5. formant	-	3285	3285
Šířka nalezených formantů [Hz]			
	Barokní	Moderní	
1. formant	217 - 382	167 - 487	
2. formant	930 - 1085	-	
3. formant	2020 - 2194	-	
4. formant	3330 - 3760	-	
5. formant	-	-	

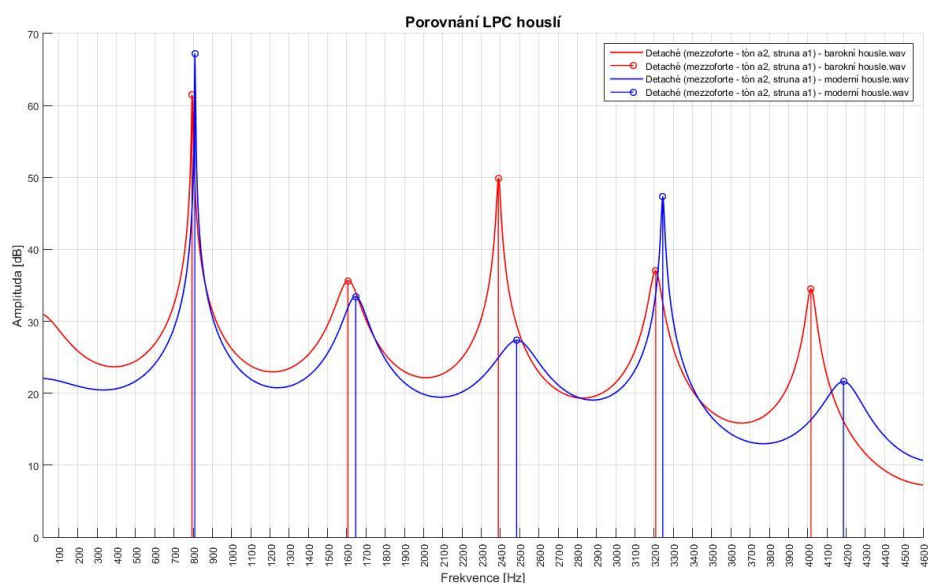
6.4.4 Détaché v dynamice mezzoforte - 5. poloha

Posledním vzorkem LPC analýzy je tón a2 zahráný v páté poloze v *détaché* a dynamice *mezzoforte*. Na grafu lze spatřit, že první formantová oblast se nachází v rozmezí od 300 Hz po 1200 Hz. Zde se nachází jeden formant pro oba měřené nástroje. Housle moderní jej mají na kmitočtu 809 Hz a barokní na kmitočtu 794 Hz. Tento formant podporuje nasalitu tónu. Moderní housle jej mají silnější a o 2 Hz užší.

Druhá formantová oblast je v rozsahu od 1200 Hz do 2800 Hz, ve které se nacházejí dva formanty pro oba nástroje. U houslí barokních je první formant v této oblasti na kmitočtu 1606 Hz a na kmitočtu 1646 Hz jej mají housle moderní. Housle moderní ho mají slabší, ale širší o 3 Hz. Druhý formant v této oblasti se nachází na kmitočtu 2389 Hz pro barokní housle a 2484 Hz pro moderní housle. Tyto formanty podporují jasnost a světlost tónu. Moderní housle jej mají slabší, ale širší.

Třetí formantová oblast je od kmitočtu 2800 Hz do 4200 Hz. Zde mají oboje housle také dva své formanty. Barokní jej mají na kmitočtu 3208 Hz, který je slabší než u houslí moderních, ale je širší. A druhý na kmitočtu 4017 Hz, který mají silnější oproti

houslím moderním, ale užší. Moderní housle mají první formant na kmitočtu 3245 Hz a druhý na kmitočtu 4186 Hz. Tyto formanty obecně podporují ostrot tónu.



Obr. 6.19: LPC analýza tónu a2 v 5. poloze

Tab. 6.10: Hodnoty LPC analýzy pro tón a2 v 5. poloze

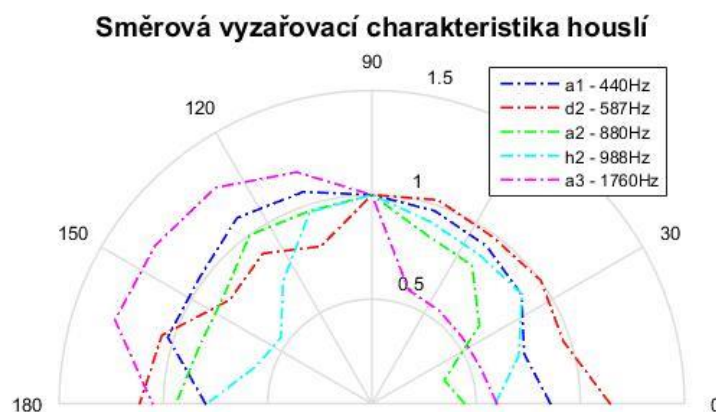
Typ houslí	Barokní	Moderní	Rozdíl hlasitostí ($L_2 - L_1$) [dB]
Použité struny	Střevové	Syntetické jádro	
Analyzovaný vzorek	Tón a2 v páté poloze - <i>détaché</i>		
Amplituda nalezených formantů			
	L_1 [dB]	L_2 [dB]	
1. formant	61,46	67,17	5,71
2. formant	35,66	33,44	-2,22
3. formant	49,89	27,35	-21,54
4. formant	37,06	47,32	10,26
5. formant	34,54	21,62	- 12,92
Kmitočet nalezených formantů			
	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	Rozdíl frekvencí ($f_2 - f_1$) [Hz]
1. formant	794	809	15
2. formant	1606	1646	40
3. formant	2389	2484	95
4. formant	3208	3245	37
5. formant	4017	4186	169
Šířka nalezených formantů [Hz]			
	Barokní	Moderní	
1. formant	793 - 799	807 - 811	
2. formant	1551 - 1666	1587 - 1705	
3. formant	2389 - 2399	2370 - 2597	
4. formant	3178 - 3234	3237 - 3253	
5. formant	3997 - 4040	4108 - 4259	

6.5 Směrové charakteristiky

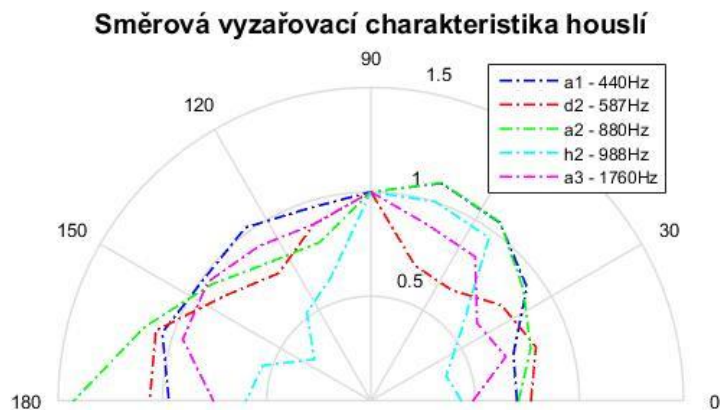
Tato podkapitola zobrazuje jednotlivé polární grafy směrových charakteristik u vybraných smyčcových technik. U všech vzorků byla zvolena dynamika *forte*. Jednotlivé grafy budou dále popsány. Na zobrazených polárních diagramech jdou vrstevnice po 30 dB.

6.5.1 Détaché v dynamice forte

Následující diagram zobrazuje směrové vyzařování houslí jednotlivých tónových vzorků při použití techniky *détaché*. U obou měřených nástrojů se do frekvence 440 Hz neobjevují téměř žádné směrové závislosti, oba vyzařují nejvíce své energie do prostoru. Na nižších kmitočtech se objevuje jeden výraznější širší lalok. Výraznějšího směrového maxima si lze všimnout u kmitočtu 988 Hz, jedná se o tón h2. Moderní housle zde mají jeden užší lalok, který svědčí o větší směrovosti nástroje do pravé strany.



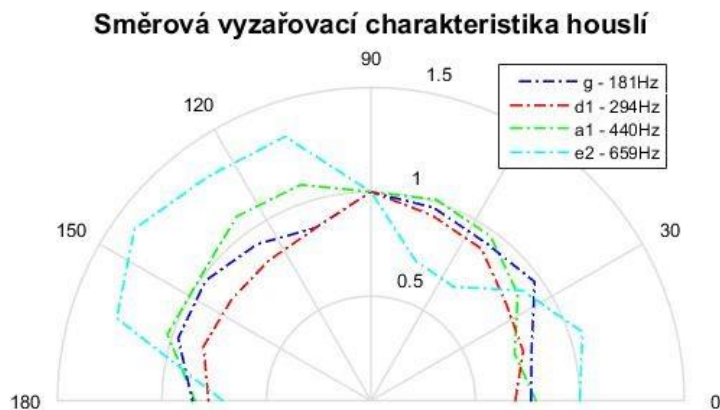
Obr. 6.20: Směrové charakteristiky tónů barokních houslí - *détaché*



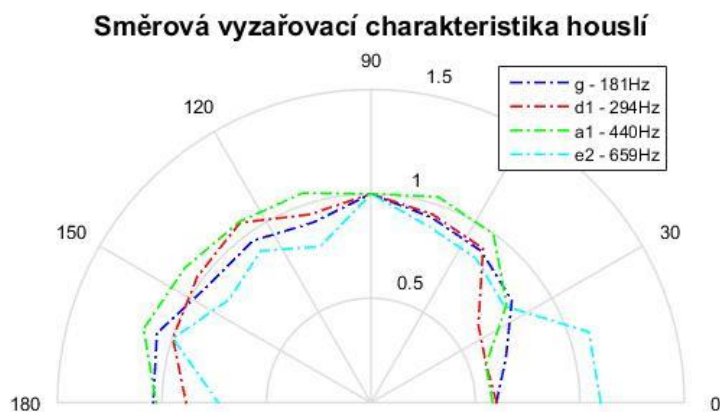
Obr. 6.21: Směrové charakteristiky tónů moderních houslí - détaché

6.5.2 *Sul ponticello* v dynamice forte

Další měřenou technikou bylo *sul ponticello*. Tato technika byla nahrána jen pro prázdné struny. Na grafech si lze všimnout, že od frekvence 181 Hz (tón g) po 440 Hz (tón a1) se nevyskytují žádné směrové závislosti u obou měřených nástrojů. Výraznějších změn si lze všimnout od kmitočtu 659 Hz, kdy se jedná o tón e2. U barokních houslí dochází k výraznějšímu vyzařování energie do levé strany.



Obr. 6.22: Směrové charakteristiky tónů barokních houslí - sul ponticello

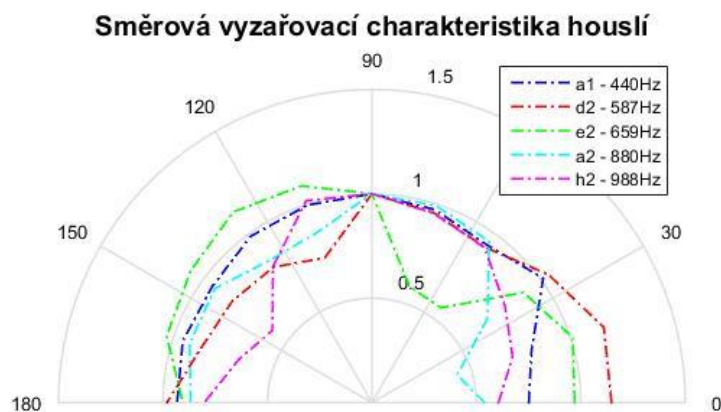


Obr. 6.23: Směrové charakteristiky tónů moderních houslí - sul ponticello

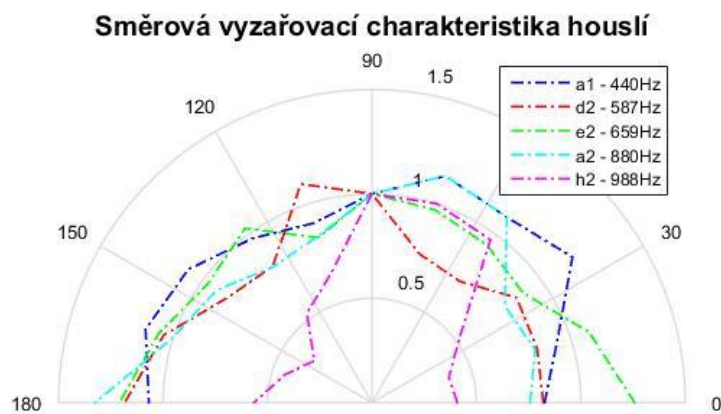
6.5.3 Staccato v dynamice forte

Další polární diagram zobrazuje směrové charakteristiky houslí při použití techniky *staccato*. U kmitočtu 440 Hz si lze všimnout, že se okolo 30° vytváří lalok pro oba měřené nástroje, který housle moderní mají větší. Další změny si můžeme všimnout i při kmitočtu 587 Hz, kdy housle moderní vyzařují více své energie do levé strany okolo 110°. Také lze spatřit výrazné změny u barokních houslí při kmitočtu 659 Hz. Zde nástroj vyzařuje

více své energie do levé strany a od 50° po 90° má výrazný pokles. Poslední výrazné maximum je na kmitočtu 988 Hz. Barokní housle zde mají větší lalok oproti houslím moderním, které jsou při tomto kmitočtu více směrovější do pravé strany.



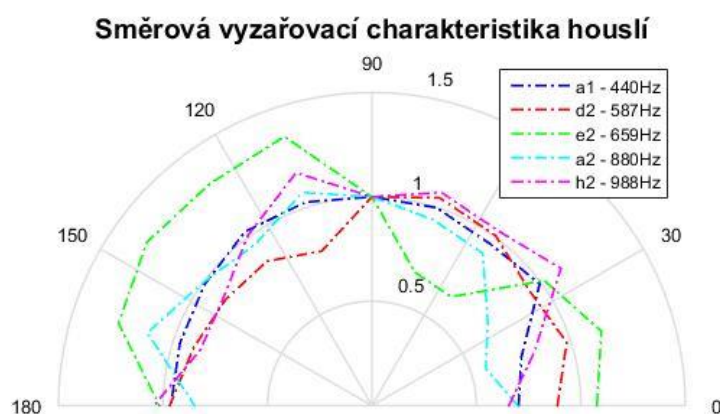
Obr. 6.24: Směrové charakteristiky tónů barokních houslí - staccato



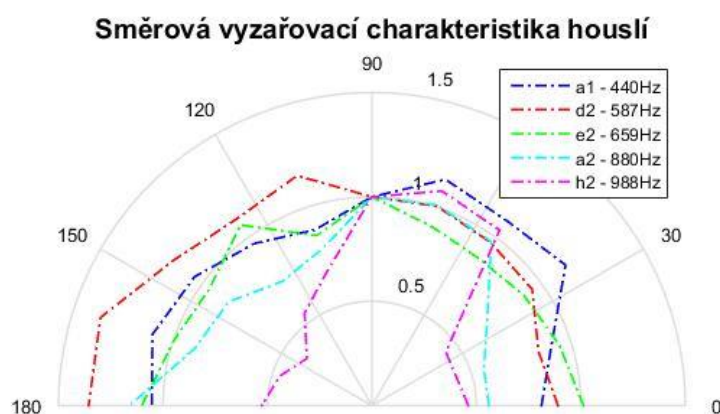
Obr. 6.25: Směrové charakteristiky tónů moderních houslí - staccato

6.5.4 Sautillé v dynamice forte

Následující polární diagram zobrazuje smyčcovou techniku *sautillé*. U nižších kmitočtů se opět nevyskytují žádné směrové závislosti. Prvního výraznějšího maxima si lze všimnout u tónu e2 (659 Hz) u barokních houslí. Zde tento nástroj vyzářuje více své energie do levé strany a dochází k výraznějšímu poklesu vyzářené energie od 40° po 90°. Další maximum se nachází na kmitočtu 988 Hz. Moderní housle jsou zde více směrovější



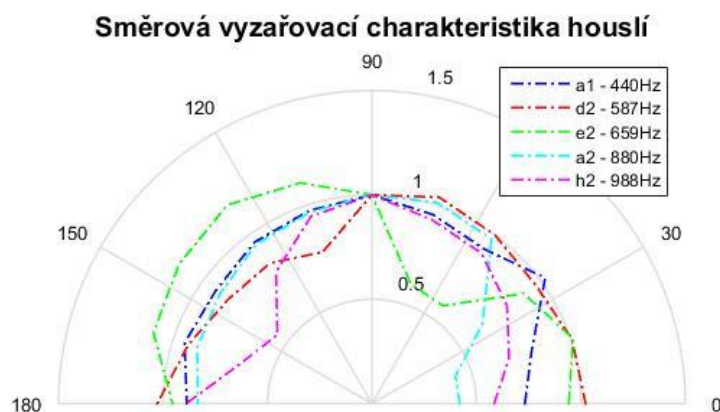
Obr. 6.26: Směrové charakteristiky tónů barokních houslí - sautillé



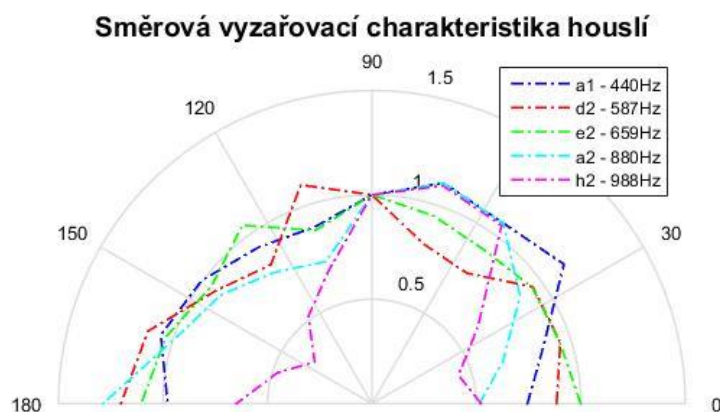
Obr. 6.27: Směrové charakteristiky tónů moderních houslí - sautillé

6.5.5 Spiccato v dynamice forte

Poslední polární diagram zobrazuje naměřené vzorky při použití techniky *spiccato*. Opět se zde potvrzuje, že se u obou měřených nástrojů nevyskytují žádné směrové závislosti na nižších kmitočtech. První náznak směrové závislosti se objevuje u moderních houslí při kmitočtu 587 Hz, kde se lalok začíná více formovat. Výraznější změna ve tvaru laloku se nachází na tónu e2 (659 Hz) u barokních houslí. A také na kmitočtu 988 Hz u houslí moderních dochází k vytvoření menšího laloku, který směřuje více do pravé strany.



Obr. 6.28: Směrové charakteristiky tónů barokních houslí - spiccato



Obr. 6.29: Směrové charakteristiky tónů moderních houslí - spiccato

6.5.6 Shrnutí naměřených výsledků

V následující podkapitole bych chtěl shrnout a zhodnotit naměřené výsledky. Z naměřených výsledků lze vyvodit, že se zvuková barva pro jednotlivé naměřené nástroje mění. Tato změna je způsobena např.: dynamikou nebo použitou smyčcovou technikou. Největší podíl na změně barvy mají dle mého názoru použité struny na nástrojích. Nechtěl bych však zobecňovat a stanovovat, které z použitých strun nebo nástrojů mají jakou barvu, to hlavně kvůli subjektivnosti vlastního popisu.

Z různých zvukových spekter lze vidět, že moderní housle mají bohatší spektrum ve všech vybraných technikách a dynamikách. Velkou roli hrají použité struny na obou nástrojích. Struny se syntetickým jádrem disponují lepšími barevnými vlastnostmi a také větší odolností na okolní podmínky, taktéž lépe reagují na různé smyčcové techniky. Barokní housle, na nichž byly nataženy střevové struny, mají zvukové spektrum řidší a tón je méně pronikavý i hlasitý.

Z porovnání FFT spektrem jednotlivých vzorků lze vyvodit, že moderní housle mají bohatší spektra, to se také odráží v barvě zvuku. Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.3, tak obecně lze říci, že tón, který ve svém spektru obsahuje menší počet vyšších harmonických složek, se jeví jako měkký až dutý. Naopak tónům, které obsahují ve svém spektru větší obsah vyšších harmonických složek, náleží plná a ostrá barva. Z pohledu zvukové barvy mají velmi zjednodušeně řečeno pronikavější a průraznější barvu housle moderní. U houslí barokních je spektrum řidší, což se taky projevuje v celkové barvě nástroje, která je měkkí a méně pronikavá. Tyto rozdíly jsou způsobeny použitými strunami. Na FFT spektrech si lze všimnout toho, že se jednotlivé vyšší harmonické složky u moderních a barokních houslí ve vyšších kmitočtech více „rozbíhají“ - nemají stejný kmitočet. To bylo způsobeno tím, že měřené nástroje nebyly naladěny na stejnou frekvenci ($a_1 = 440$ Hz). V tabulkách 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 a 6.5 lze vidět, že se liší kmitočty i pro jejich první harmonické složky. Barokní housle více podléhaly teplotě v bezodrazové komoře, za což mohly právě použité struny.

Dále byla provedena LPC analýza u vybraných tónových vzorků. U každého ze vzorků byly nalezeny minimálně tři formanty, ale u některých vzorků byly nalezeny formanty čtyři. U předposledního a posledního měřeného vzorku se našly i formanty páté. Bylo zde popsáno, jak jednotlivé formanty ovlivňují barvu zvuku a k jakým vokálům se přibližují. Dále zde byly porovnány hlasitosti, kmitočty a šířka jednotlivých formantů. Obecně lze říci, že čím má formant větší amplitudu (hlasitost), tím je jeho šířka menší. Také pokud leží formanty blízko sebe, vzájemně se posilují a tím dochází ke zúžení pásma. Amplituda tedy závisí na pozici mezi jednotlivými formanty. Průměrná hlasitost párových vzorků se liší řádově o několik dB, tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 6.7, 6.8, 6.9 a 6.10. Přesto ale srovnání tiššího a hlasitějšího *piana* umožňuje relativně

srovnávat sytost spektra - normalizace nebyla použita, protože by byla zvýšena hladina šumu. Taktéž byl vytvořen popis formantových oblastí na klaviatuře, tj. jakým notám odpovídají jednotlivé formanty a jakým tónům odpovídají jednotlivé formantové oblasti. Tyto popisy byly vloženy do příloh.

Poslední oblast praktické části se věnovala směrovým charakteristikám měřených nástrojů. Obecně lze říci, že na nižších kmitočtech (do 500 Hz) se u houslí nevyskytují žádné směrové závislosti, čímž se potvrdily výsledky z literatury [6], které беру jako výchozí. Obecně lze říci, že se zvyšujícím se kmitočtem se stávají nástroje více směrovějšími - dochází k vytváření menších směrovějších laloků. První výraznější maxima vyzařování se objevují u kmitočtu 988 Hz, kdy oba měřené nástroje vyzařují více své energie do pravé strany. Z naměřených výsledků lze usoudit, že housle moderní vytvářejí na vyšších kmitočtech směrovější laloky, které jsou situovány více do pravé strany. Barokní housle na vyšších kmitočtech vyzařují více své energie do prostoru.

7 ZÁVĚR

Následující kapitola shrnuje celkovou strukturu práce.

7.1 Shrnutí

Na začátku této práce byla stručně popsána historie houslí od prvních strunných nástrojů až po nástroj v takové podobě, jaký je nám dnes známý. Taktéž zde byla obecně rozebrána barva nástroje, smyčcové techniky hry a směrové charakteristiky.

Druhá kapitola se zabývala zvukovým spektrem, jaké typy spektrem existují a jejich popis, čím se zvukové spektrum měří a jak probíhá jeho analýza. Také zde byla obecně rozebrána lineární predikce.

Třetí kapitola se věnovala metodice měření, došlo zde k porovnání mezi umělou generací tónu nebo buzením nástroje reálným hráčem.

Součástí zadání bylo pořídit zvukové nahrávky houslí s odlišným stářím korpusu a rozdílnými typy strun. O tom pojednávala kapitola čtvrtá. Byl zde popsán rozdíl mezi střevovými strunami a strunami se syntetickým jádrem, celkový popis měřicí soustavy a průběh měření.

Dalším úkolem bylo vytvořit aplikaci pro analýzu časově proměnného spektra houslí, aplikaci pro analýzu formantových oblastí a aplikaci pro zobrazení směrových charakteristik. Všechny tyto aplikace byly vytvořeny v prostředí MATLAB, o tom pojednávala pátá kapitola.

V šesté kapitole se nacházel výběr vzorků, které byly následně podrobeny analýze. Byly zde taktéž vloženy spektrogramy jednotlivých vzorků s krátkým komentářem. Dále jsem se zde zabýval porovnáním FFT spektry a LPC analýzou vybraných tónových vzorků. Snažil jsem se zde vysvětlit vlivy vyšších harmonických složek na barvu nástroje. Dále jsem zde identifikoval a popsal jednotlivé formanty a jejich oblasti. V poslední řadě jsem se zde věnoval směrovému vyzařování obou měřených nástrojů při použití různých smyčcových technik v dynamice *forte*.

Jako poslední se zde nachází celkové shrnutí naměřených výsledků a jejich vyhodnocení.

8 DOPORUČENÍ

Téma analýzy spektra houslí je opravdu široké a velmi obsáhlé. Podle mého názoru může být velmi užitečné, hlavně v souvislosti mezi použitými strunami a výsledným zvukem. Dále by mohlo objasnit problémy se směrovým vyzařováním nástroje. Jak již bylo řečeno, tato problematika je velmi obsáhlá, ale pro formu úvodní studie v bakalářské práci je toto téma zcela vyhovující. Pro další měření by bylo účelnější brát v úvahu dílčí části více podrobněji - jak po stránce teoretické, tak praktické. Zjednodušeně řečeno, nebylo by vhodné zabývat se tímto tématem pod širokým úhlem záběru.

Pro potřeby této práce byla kvalita a výpovědní hodnota měřených vzorků dostačující, nicméně bych ale pro další měření doporučil použít tzv. Heroldův nekonečný smyčec, který byl zmíněn v kapitole 3.1 a následně v kapitole 6. Bylo by tak zajištěno nastavení konstantního tlaku působícího na strunu, napětí žíní, místo buzení struny nebo také rychlost pohybu žíněné smyčky. Měření pomocí tohoto smyčce by tak eliminovalo dynamické rozdíly mezi jednotlivými tóny. Vzorky by tím dosáhly větší výpovědní hodnoty, nevznikly by chyby způsobeny lidským faktorem. U směrových charakteristik by bylo lepší využití více mikrofonů s menšími rozestupy, jak pro horizontální, tak pro vertikální rovinu. Získalo by se tím více odečtů energie pro více směrů vyzařování pro obě roviny.

Myslím si, že by toto téma mohlo být dále užitečné pro další zkoumání hlavně z hlediska formantů a formantových oblastí. Podle mého názoru práce na toto téma nejsou příliš do hloubky zkoumané.

LITERATURA

- [1] GEIST, Bohumil. *Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: Muzikus, c2005. ISBN 80-862-5331-7.
- [2] JANOUŠEK, Ivo. *ABC akustiky pro hudební praxi*. 1. vyd. Praha: Supraphon, 1979. Příručky ABC.
- [3] JIRÁNEK, Jaroslav a Tomáš HEJZLAR. *Světlem hudebních nástrojů: o jejich vzniku a výrobě*. 1. vyd. Praha: Panton, 1979.
- [4] OTČENÁŠEK, Zdeněk a Jan ŠTĚPÁNEK. *Změna barvy zvuku houslí při změně polohy v prostoru kolem nástroje*; Proceedings of the 6th International Colloquium ACOUSTICS '01. Zvolen-Blanská Štiavnica, 2001. str. 35-38. ISBN 80-228-1048-7.
- [5] OTČENÁŠEK, Zdeněk a Václav SYROVÝ. *Directivity of violin radiation*; CDROM of Joint Meeting 137th ASA, 2nd EAA Forum Acusticum 1999, 25th DAGA. Berlin, 1999.
- [6] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-297-8.
- [7] SYROVÝ, Václav. *Hudební zvuk: příspěvek k teorii zvukové tvorby*. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2014. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-323-4.
- [8] SCHIMMEL, J. *Elektroakustika*. Elektronická skripta, VUT v Brně, 2014.
- [9] SMETANA, Ctirad. *Praktická elektroakustika*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [10] USTOHALOVÁ, Iveta. *Měření směrových charakteristik akustických hudebních nástrojů*. Brno, 2014, 53 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce byl Ing. Václav Mach.
- [11] WALACH, Jan. *Aplikace Fourierovy analýzy na rozpoznávání kvality samohlásek podle jejich formantů*. Olomouc, 2013, 46 s. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra matematické analýzy a aplikací matematiky. Vedoucí práce RNDr. Tomáš Fürst, Ph.D.
- [12] ZAMAZAL, V. *Hudební nástroje před mikrofonem*, 1. vydání, Praha: Editio Supraphon, 1975. 183. s.
- [13] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: tvorba uživatelských aplikací*. Praha: BEN, 2004. ISBN 80-730-0133-0.
- [14] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: začínáme se signály*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0200-0.
- [15] ZAPLATÍLEK, Karel. *MATLAB®: tvorba grafického uživatelského rozhraní*. Brno: Tribun EU, 2014. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-263-0861-4.

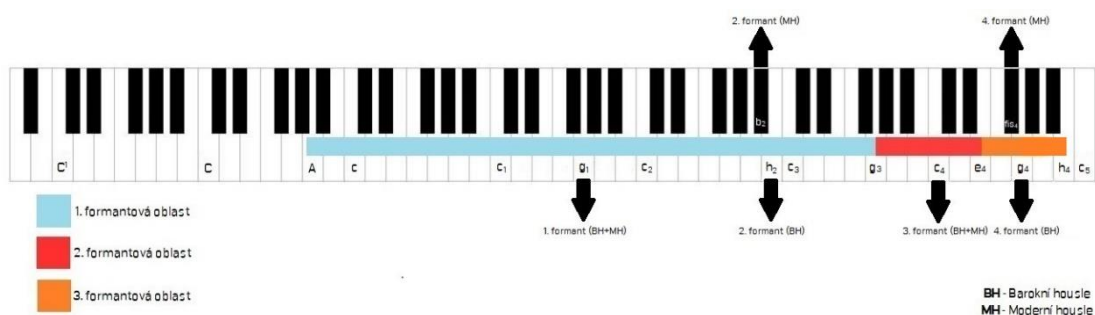
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

WAV	Waveform audio file format
I_Q	Index směrovosti
Q_Z	Činitel směrovosti
Φ	Rychlostní potenciál
FFT	Fast Fourier Transform - Rychlá Fourierova Transformace
LPC	Linear Predictive Coding - Lineární prediktivní kódování
BR	Brightness - Jas
f_T	Frekvenční poloha těžiště
RMS	Root Mean Square - Efektivní hodnota
V	Objem spektra
STFT	(Short Time Fourier Transform) - krátkodobou Fourierovu transformaci

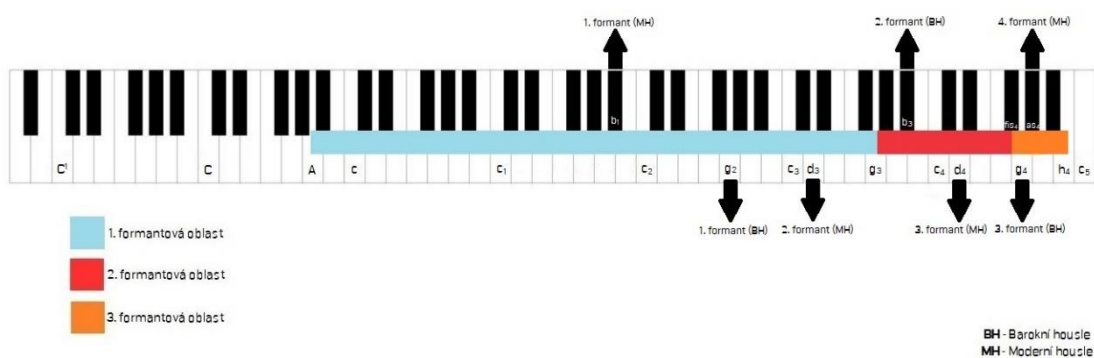
SEZNAM PŘÍLOH

- A Formantové oblasti
- B Obsah přiloženého CD

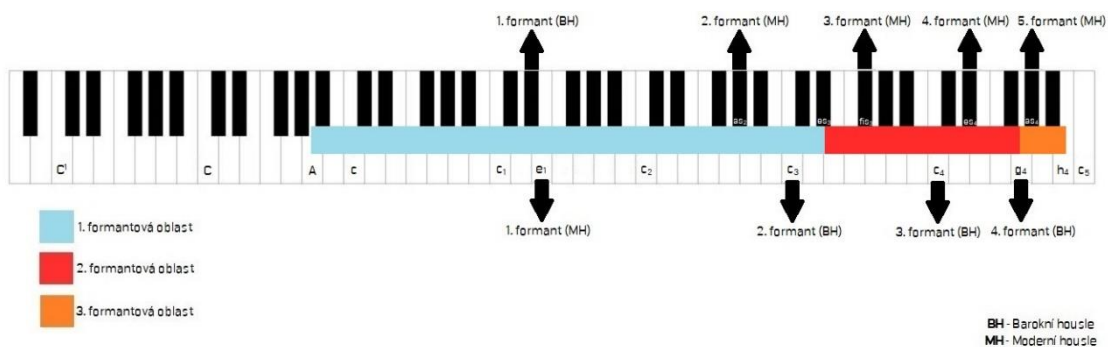
A FORMANTOVÉ OBLASTI



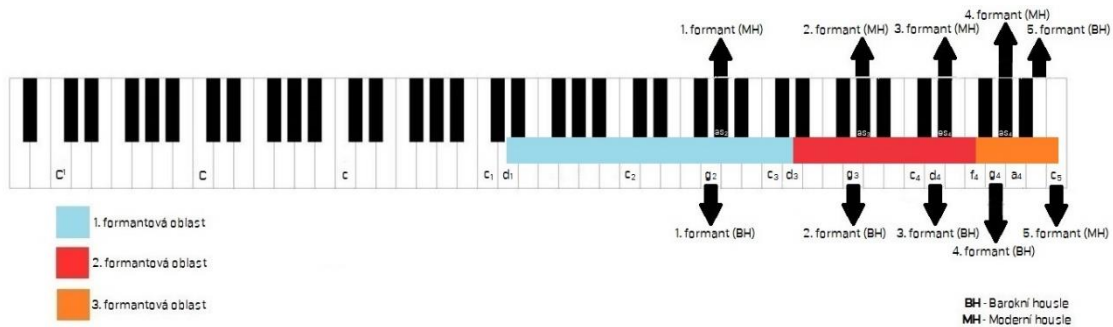
Obr. A.1: Zobrazení formantových oblastí a formantů na klaviatuře - détaché (prázdná g)



Obr. A.2: Zobrazení formantových oblastí a formantů na klaviatuře - sul ponticello (prázdná a1)



Obr. A.3: Zobrazení formantových oblastí a formantů na klaviatuře - spiccato (d1 - 3. poloha)



Obr. A.4: Zobrazení formantových oblastí a formantů na klaviatuře - détaché (a2 - 5. poloha)

B OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Přiložené CD obsahuje:

- elektronickou verzi bakalářské práce pod názvem xhanza03BP.pdf
- jednotlivé skripty v programu Matlab ve složce ./matlab, kde je 14 souborů:
 - o Aplikace.fig,
 - o Aplikace.m,
 - o Aplikace.prj,
 - o fftlpc.m,
 - o nacteni.m,
 - o nacteni_kalibrace.m,
 - o nacteni_vzorek1.m,
 - o nacteni_vzorek2.m,
 - o Porovnani_FFT.m,
 - o Porovnani_LPC.m,
 - o Smerove_charakteristiky_komplet1.m
 - o Smerove_charakteristiky_komplet2.m
 - o Spektrogram.m
 - o Spektrogram_3D.m
- nastřížené vzorky v různých dynamikách a smyčkových technikách pro zobrazení spektrogramů, FFT a LPC spekter a směrových charakteristik, ve složce ./vzorky
- jednotlivé spektrogramy ve složce ./spektrogramy
- jednotlivé FFT a LPC spektra ve složce ./fft a lpc
- jednotlivé směrové charakteristiky ve složce ./směrové charakteristiky