



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

SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA HISTORICKÝCH KLAVÍRŮ

SPECTRAL ANALYSIS OF HISTORICAL PIANOS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Pokorný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. et Mgr. Ondřej Jirásek,
Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Marek Pokorný

ID: 240195

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Spektrální analýza historických klavírů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Porovnejte audio vzorky nejméně tří významných historických klavírů. Popište, o jaké exempláře se jedná, kdo na ně hrál nebo pomocí nich komponoval a pro jaký styl hudby byly vyrobeny. V prostředí Matlab proveďte detailní spektrální analýzu vybraných tónů, ve které se zaměříte na průběh barvy v čase. Porovnejte, jak se barva jednotlivých tónů pojí do harmonií a hudebních struktur typických pro daný styl. Proveďte nejen technické, ale hudebně vědecké vyhodnocení.

V semestrální práci proveďte analýzu nejméně dvou exemplářů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN isbn978-80-7331-297-8 [2] KOENING, D.V. Spectral analysis of musical sounds with emphasis on the piano. Oxford: Oxford University Press, 2015. ISBN 978-0-19-872290-8

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 28.5.2024

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

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Bakalářská práce se zaměřuje na spektrální analýzu historických klavírů s cílem identifikovat a porovnat jejich akustické a spektrální charakteristiky. V rámci práce byly analyzovány tři exempláře klavírů, včetně významného klavíru Leoše Janáčka. Analýza byla provedena na základě změřených vzorků klavírů pomocí Fourierovy transformace v prostředí MATLAB, s důrazem na spektrální parametry, jako jsou těžiště, plochost, šikmost, ostrost a drsnost spektra a na vizuální reprezentaci spektra v čase – spektrogramu. Dle výsledků spektrální analýzy byly interpretovány a hodnoceny rozdíly v barvě (témbru) klavírů a jejich pravděpodobné příčiny. Teoretická část práce poskytuje stručný přehled o historii a konstrukci klavíru, vysvětluje použité spektrální deskriptory, zkoumá vlastnosti hudebních tónů a vliv psychoakustiky na vnímání výšky a barvy tónu.

KLÍČOVÁ SLOVA

spektrální analýza, klavír, historický klavír, témbra, barva tónu, spektrum

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the spectral analysis of historical pianos in aim to identify and compare their acoustic and spectral characteristics. Three examples of pianos were analysed, including a significant piano owned by the composer Leoš Janáček. The analysis was performed on measured piano samples using Fourier transformation in MATLAB, with an emphasis on spectral parameters such as spectral centroid, flatness, skewness, sharpness and roughness, and on the visual representation of a spectrum over time – the spectrogram. The results of the spectral analysis were used to interpret and evaluate differences in timbre of the pianos and their probable causes. The theoretical part of the thesis provides a brief overview of the history and design of the piano, explains the spectral descriptors used, and examines the properties of musical tones and the influence of psychoacoustics on the perception of pitch and timbre.

KEYWORDS

spectral analysis, piano, historical piano, timbre, tone color, spectrum

POKORNÝ, Marek. *Spektrální analýza historických klavírů*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2024. Vedoucí práce: MgA. et Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Marek Pokorný
VUT ID autora: 240195
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Spektrální analýza historických klavírů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 autorského 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.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu MgA. et Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za organizaci nahrávání v památníku Leoše Janáčka, odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
1 Historie, stavba a principy klavíru	12
1.1 Klavír jako evoluce cembala	12
1.2 Tvorba tónu	12
1.3 Konstrukce klavíru a části ovlivňující barvu	13
2 Historické exempláře	15
2.1 Klavír Ehrbar Leoše Janáčka	15
2.1.1 Janáčkova teorie sčasovky	15
2.2 Pianina Petrof a Koch & Korselt	15
3 Metody a funkce pro spektrální analýzu	17
3.1 Diskrétní Fourierova transformace	17
3.2 Analýza barvy nástroje pomocí spektrálních parametrů	17
3.2.1 Spektrální těžiště (centroid)	17
3.2.2 Spektrální šikmost	18
3.2.3 Spektrální plochost	18
3.2.4 Spektrogram	18
3.2.5 Ostrost	19
3.2.6 Drsnost	19
3.2.7 Dynamický rozsah	19
3.3 Vlastnosti hudebního tónu	20
3.4 Vliv psychoakustiky na vjem výšky a barvy	20
4 Měření klavírů	22
4.1 Postup analýzy	23
5 Výsledky spektrální analýzy	24
5.1 Klavír F. Ehrbar	24
5.1.1 Tóny B v oktávách	24
5.1.2 Barva v harmonii cyklu „Po zarostlém chodníčku“	28
5.2 Klavír Petrof	33
5.2.1 Tóny g, E1 a G2	33
5.3 Barva v harmonii	35
5.3.1 Akordy A dur a D7, forte a pianissimo	35
5.3.2 Skladba Ballade	36
5.4 Klavír Koch & Korselt	38

5.4.1	Tóny g, E1 a G2	38
5.5	Barva v harmonii	41
5.5.1	Akordy A dur a D7, forte a pianissimo	41
5.5.2	Srovnání hraných souzvuků pianin při zapojených dusítkách	43
5.5.3	Skladba Ballade	43
5.6	Srovnání hlasitosti pianin	45
	Závěr	47
	Literatura	50
	Seznam symbolů a zkratek	53
	A Přílohy	54
A.1	Elektronická příloha	54

Seznam obrázků

1.1	Diagram jedné klávesy klavíru [1]	12
1.2	Otevřené koncertní křídlo [2]	13
4.1	Pozice mikrofonu pro nahrávání vzorků křídla F. Ehrbar	22
4.2	Pozice mikrofonu pro nahrávání vzorků pianin	22
4.3	Frekvenční a polární charakteristiky použitých mikrofonů [16] [17]	23
5.1	Spektrogram tónu subkontra B, forte	24
5.2	Spektrální parametry tónu subkontra B, forte	25
5.3	Spektrogram tónu subkontra B, piano	25
5.4	Spektrogram tónu B1, piano a forte	26
5.5	Spektrogram tónu B3, piano a forte	27
5.6	Spektrální parametry tónů ve vyšších polohách	27
5.7	Spektrogram úryvku skladby „Naše večery“ včetně notového zápisu	28
5.8	Spektrogram úryvku skladby „Nelze domluvit“ včetně notového zápisu	29
5.9	Spektrogram úryvku skladby „Andante“ včetně notového zápisu	30
5.10	Grafy ostrosti, úryvky	31
5.11	Efektivní hodnota akustického tlaku v čase, klavír Ehrbar	32
5.12	Spektrogram tónů g, E1, G2, klavír Petrof	33
5.13	Spektrální parametry tónů g, E1, G2, klavír Petrof	34
5.14	Spektrogramy akordu A dur, Petrof	35
5.15	Spektrogramy akordu D7, Petrof	36
5.16	Notový zápis skladby Ballade (Op. 100, No. 15), Friedrich Burgmüller	37
5.17	Spektrogram, Ballade, 1. část, Petrof	37
5.18	Spektrogram, Ballade, 2. část, Petrof	38
5.19	Grafy ostrosti a drsnosti, skladba Ballade, Petrof	39
5.20	Spektrogram tónů g, E1, G2, klavír Koch & Korselt	40
5.21	Spektrální parametry tónů g, E1, G2, klavír Koch & Korselt	40
5.22	Spektrogramy akordu A dur, Koch & Korselt	41
5.23	Spektrogramy akordu D7, Koch & Korselt	42
5.24	Spektrogramy akordů D7 se zapojeným dusítkem	43
5.25	Spektrogram, Ballade, 1. část, Koch & Korselt	44
5.26	Spektrogram, Ballade, 2. část, Koch & Korselt	45
5.27	Grafy ostrosti a drsnosti, skladba Ballade, Koch & Korselt	45
5.28	Spektrogram, Ballade, 2. část, Koch & Korselt	46

Seznam tabulek

3.1	Dynamika (síla tónu) v hudbě [15]	20
5.1	Dynamický rozsah v tónech, klavír Ehrbar	27
5.2	Průměr parametrů pro úryvky skladeb z cyklu „Po zarostlém chod- níčku“	31
5.3	Ostrost a drsnost tónů, Petrof	35
5.4	Ostrost a drsnost tónů, Koch & Korselt	41
5.5	Dynamický rozsah v akordech, Petrof a Koch & Korselt	42
5.6	Porovnání hlasitosti nástroje bez dusítka a s dusítkem	43

Úvod

Tato práce se věnuje problematice spektrální analýzy tří exemplářů historických klavírů z 19. století a 20. století. Exemplářem z 19. století je koncertní křídlo Leoše Janáčka, značky Fridrich Ehrbar, vyrobené c. 1876, nyní ve vlastnictví Moravského zemského muzea v Brně. Klavír se nachází v památníku s kontrolovaným prostředím. Zbylými dvěma exempláři z 20. století jsou poté pianina značek Petrof (1929) a Koch & Korselt (1915). Klavír Petrof má ve vlastnictví Základní umělecká škola Deblín, Koch & Korselt je sběratelským kouskem v soukromém vlastnictví.

Cílem práce je technicky a hudebně-vědecky zhodnotit historické exempláře klavírů za pomoci analýzy jejich frekvenčních spekter, parametrů popisujících tato spektra a jejich následného srovnání. Pro dosažení cílů je v práci využíván program MATLAB.

Teoretické kapitoly zmiňují stručný úvod do historie, stavby a principu klavíru a vysvětlují, jak konstrukce nástroje může ovlivnit jeho tón. Obsahují též popis a technické parametry exemplářů, jsou zmíněny vlastnosti hudebních tónů a vliv psychoakustiky na vjem výšky a barvy tónu.

Postup měření je zdokumentován a popsán v kapitole následující teorii.

Metodika měření je rozdílná pro křídlo a pro pianina. Janáčkův klavír Ehrbar byl měřen se zaměřením na dvoudílný cyklus skladeb „Po zarostlém chodníčku“, který je pro klavír jednak historicky odpovídající a který skladatel také na tomto klavíru složil. Pomocí Fourierovy transformace v prostředí MATLAB jsou zkoumány nejprve charakteristiky spekter vybraných jednotlivých tónů a další podkapitola se zabývá analýzou tónu skladeb.

Pianina byla měřena stejným postupem, avšak byly zvoleny jiné tóny, dva souzvuky (akordy) různé hudební funkce a poté skladba s názvem Ballade skladatele Friedricha Burgmüllera. Vzhledem k identickým vzorkům pro pianina bylo možné tyto dva exempláře přímo porovnat, zatímco křídlo Ehrbar je srovnáváno s pianiny na základě rozdílných vzorců ve spektrech jednotlivých nástrojů. Na konci odpovídajících kapitol byly srovnávány i dynamické rozsahy všech nástrojů, včetně křivek hlasitosti skladeb v dB(SPL).

Text pracuje s pojmy jako je spektrogram, spektrální centroid, psychoakustickými parametry jako je ostrost, drsnost a dalšími pro objektivní analýzu rozdílů v barvě zvuku. Kvality hudebních barev, podložené spektrální analýzou, měřením a literárními zdroji jsou na základě poslechu naměřených vzorků slovně popsány a zhodnoceny.

Závěr práce poskytuje přehled dosažených výsledků a souhrn faktorů ovlivňující barvu, přínos práce a hodnocení nežádoucích vlivů na měření.

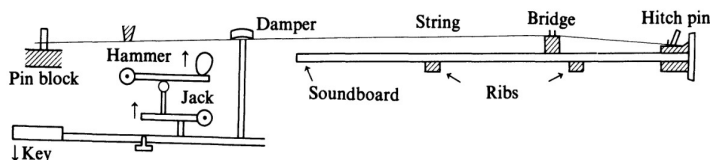
1 Historie, stavba a principy klavíru

1.1 Klavír jako evoluce cembala

Moderní klavír vznikl v důsledku inovace a vývoje cembala. Zásadním zlomem bylo nahrazení hrotů či trsátek kladívky, což umožnilo cembalu vytvářet v tónech dynamiku. Této modifikaci se později, jak již vyplývá z italských názvů označení dynamiky, začalo říkat pianoforte, zkráceně piano. [1] V češtině se obvykle používá název klavír (z latinského claves). Koncertním klavírům říkáme často křídla, kompaktnějším zase pianina.

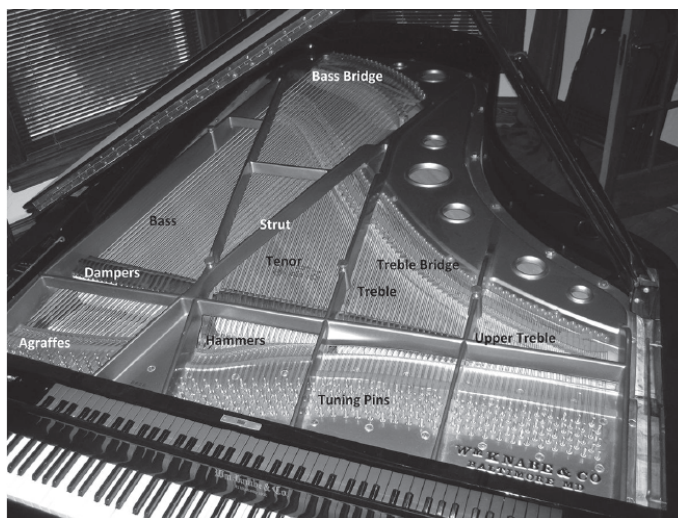
1.2 Tvorba tónu

Diagram pro popis funkce klavíru je na obr. 1.1. Zmáčknutím jedné klávesy dojde ke zvednutí tlumítka struny a vymrštění kladívka na strunu, kterou rozvibruje. Vibrace jsou přenášeny kobylkou (bridge) na ozvučnou desku, dále zesilující a podporující amplitudu, charakter a barvu tónu. Tlumítko se po vypuštění klávesy vrací do původní polohy, tón je zatlučen. Při sešlápnutí pravého pedálu klavíru zůstává tlumítko ve zvednuté poloze a tón doznívá přirozeně, až do zániku kmitů na struně. V barvě zvuku klavíru převládají transienty. Nejen, že harmonické nastupují a doznívají různou rychlostí, ale zvuk úhozu zahrnuje i některé poměrně výrazné mechanické zvuky (včetně "úderu" do kláves) a zvuky vznikající podélnými vibracemi strun. [1]



Obr. 1.1: Diagram jedné klávesy klavíru [1]

Deska koncertního křídla je zobrazena na obrázku 1.2. Lze si povšimnout tři různých kobylek pro basy, středy a výšky, kladívek, tlumítek, která u nejvyšších tónů chybí a křížení basových a středových strun.



Obr. 1.2: Otevřené koncertní křídlo [2]

Struktura vyšších harmonických je ovlivněna rychlostí úderu kladívka do struny, klavírista tedy může manipulovat barvu tónu, ale pouze změnou intenzity hry. Amplitudy harmonických klesají rychleji k nule se zvyšující se frekvencí fundamentu. Největší rozdíl v barvě tónu klavíru je mezi basovým a výškovým registrem – basové tóny jsou nejbohatší na vyšší harmonické, protože účinnost tvorby fundamentu u těchto strun je podstatně nižší. Příčinou je snížená vazba mezi ozvučnou deskou a vzduchem v nízkofrekvenčním pásmu v důsledku relativně malého akustického odporu vyzařování. Z toho také vyplývá, že u větších klavírů s odpovídajícími většími ozvučnými deskami budou nízké tóny reprodukovány s větší účinností, protože s větší ozvučnou deskou se zlepšuje spojení mezi strunami a vzduchem. Zvuková obálka tónu klavíru se skládá z růstu (attack) a poklesu (decay), ale neexistuje žádný ustálený stav (sustain). [3]

1.3 Konstrukce klavíru a části ovlivňující barvu

Typické koncertní křídlo má 243 strun různých délek (od cca 2 m v basech po 5 cm ve výškách). Menší klavíry či pianina mohou mít strun méně. Basové struny se záměrně kříží se strunami středů pro dosažení optimální výchylky v půli ozvučné desky. Výrobci klavírů se snaží dosáhnout nejvyšší napruženosti strun s co nejnižší tloušťkou. Tato síla musí být kompenzována masivním rámem nástroje.

Ozvučná deska bývá téměř exkluzivně ze smrkového dřeva, které je dřevem rezonančním (má nízkou hustotu). Dřevo je ortotrop, tzn. v každém směru je rychlost šíření zvuku jiná. Textura vláken směřuje paralelně se strunami. Výztuž dřeva poskytuje kolmé žebrování, které zpevňuje konstrukci a dále umocňuje přenos vlnění ve dřevě.

U nejranějších klavírů byl zanedbatelný nebo žádný rozdíl mezi kladívky pro basy a výšky. Pro moderní klavíry výrobci implementují větší a těžší kladívka pro basový registr. Podobný trend platí i pro potahy kladívek - dříve používanou kůži vystřídala plst. Dle použité vrstvy plsti lze regulovat tvrdost kladívek a následnou excitaci struny. Zvolená tloušťka a tvrdost potahu zároveň s velikostí kladívek ovlivňují dynamický rozsah klavíru i tvorbu vyšších harmonických při úhozu na strunu. Tvrdost kladívek s plstovými potahy je proměnlivá se silou úhozu. Tvrdší kladívka generují větší počet vyšších harmonických, než kladívka měkčí. Důsledkem příliš tvrdých kladívek může být příliš plechový či ostrý zvuk, naopak příliš měkká kladívka zní tupě a nezajímavě. [1]

2 Historické exempláře

2.1 Klavír Ehrbar Leoše Janáčka

Prvním exemplářem je klavír vídeňského konstruktéra Friedricha Ehrbara, vyrobený c. 1876, s vídeňskou mechanikou¹, litinovým rámem a celkovou délkou 2400 mm. Obložení kláves je ze slonoviny, horní klávesy z hruškového dřeva s dýhou z dřeva ebenového. Klavír má dva pedály, levý pedál „una corda“ posouvá mechaniku pro úder pouze do dvou z celkových tří strun chóru, pravý pedál zvedá dusítka. V roce 2016 proběhlo restaurování klavíru kvůli jeho špatnému stavu. Z rozsáhlého výčtu oprav lze zmínit nahrazení nevhodných strun za nové, jejich naladění na 440 Hz. Pro udržení kvalit nástroje byl zaveden dodatečný monitoring mikroklimatických podmínek v místnosti.

Janáček skládal na tomto exempláři od sedmadvaceti let až do konce života, jiný klavír si nikdy nepořídil. I přes nepříliš vysokou cenu podobných vídeňských křídel v dnešní době se dá tedy označit jako historicky nedocenitelný, protože je spjat s Janáčkem a jeho dílem jako takovým. [4]

2.1.1 Janáčková teorie sčasovky

V závěru své práce „Základy hudebního sčasování“ Janáček dělí teoretické učení hudby na tři oblasti:

- nauku o souzvucích a jejich spojiích,
- nauku o sčasování a nápěvu (sčasovací sloh zastupuje kontrapunkt v tradiční terminologii),
- nauku o formacích a skladebné útvarnosti.

Ve všech těchto disciplínách klade Janáček důraz na časovou složku ve skladbě. V harmonii zdůrazňuje rytmické uspořádání a tempo souzvuků a jejich spojování v závislosti na metrice. Jelikož spojuje rytmus a formu, považuje sčasování za „první a poslední nauku hudební“. [5] Z toho vyplývá, že se lze setkat s pojmem sčasovka a jejím efektem na skladby i v cyklu „Po zarostlém chodníčku“, který byl přímo na dříve zmíněném křídle Ehrbar složen.

2.2 Pianina Petrof a Koch & Korselt

Cílem analýzy byly i dvě historicky hodnotná pianina, vyráběná zejména jako cenově a prostorově úsporné alternativy koncertních křídel. Prvním pianinem je zá-

¹Vídeňská, neboli vymrštovací mechanika, je starším a dnes již nepoužívaným typem klavírní mechaniky, zejména kvůli její pomalejší odezvě na rychlé, opakující se stisky klávesy. [6]

stupce české značky Petrof s opusovým číslem 43187, vyrobený v královéhradeckých závodech kolem roku 1929. Druhým zástupcem je opět český klavír konstruktérů německého původu značky Koch & Korselt (op.č. 16756), zkonstruovaný v roce 1915. Klaviatura je vyrobena ze sloní kosti. Strunný dvojchór začíná na tónu kontra A, od malého D se přidává další struna a tvoří trojchór. Od tříčárkovaného D na struny po uvolnění klávesy či pedálu nemá vliv tlumítko.

Společnost Petrof založil Antonín Petrof v roce 1864 v Hradci Králové. O tři roky později se Antonín Petrof dostal díky privilegii na pozici dvorního dodavatele nástrojů na císařský dvůr a na začátku dvacátého století se společnost stala známou po celé Evropě. V současné době se vyrábí šest modelů křídel a šest modelů pianin. [7]

Značka Koch & Korselt vznikla v roce 1890 v Ruprechticích u Liberce. Po úspěchu na celosvětové výstavě v roce 1900 se značka šířila po celém světě. Výrobce vyráběl osm modelů pianin a pět modelů křídel. Průměrná výroba činila přibližně 550 nástrojů. Po druhé světové válce značka zanikla. [8]

3 Metody a funkce pro spektrální analýzu

3.1 Diskrétní Fourierova transformace

Pro analýzu zvukového signálu ve spektrální doméně (ať jde o ruchy či o zvuky s tónovou složkou) lze využít různé metody. Základem všech těchto metod je Fourierova transformace, pro práci se vzorky její varianta v diskrétním čase (DTFT).

Definujme si diskrétní časovou funkci $g(n)$

$$g(n) = \sum_{k=0}^{N-1} G(k) e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (3.1)$$

a diskrétní spektrální funkci $G(k)$

$$G(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(n) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (3.2)$$

kde $n = 0$ až $N-1$ je odpovídající vzorek v časové doméně,
 $k = 0$ až $N-1$ je odpovídající vzorek v doméně frekvenční,
 N je počet vzorků signálu. [15]

MATLAB a podobné programy umožňující digitální analýzu používají nejčastěji algoritmus FFT. Tento algoritmus využívá váhovacích funkcí, neboli časových okének. V případě MATLABu bude FFT počítána u všech funkcí pomocí obdélníkových okének.

3.2 Analýza barvy nástroje pomocí spektrálních parametrů

3.2.1 Spektrální těžiště (centroid)

Spektrální těžiště je zobrazení váženého průměru frekvencí přítomných v signálu, tj. kde se v daném spektru koncentruje největší množství energie. Centroid odráží vliv vyšších harmonických na barvu zvuku v čase. [9] Funkci v prostředí MATLAB je možné zavolat příkazem `spectralCentroid(AudioIn,fs)`,

$$\mu_1 = \int x p(x) dx \quad (3.3)$$

kde x jsou vzorky signálu a
 $p(x)$ je pravděpodobnost výskytu x .

3.2.2 Spektrální šikmost

Spektrální šikmost charakterizuje míru asymetrie spektrálního výkonu ve frekvenčním spektru signálu vzhledem k těžišti. Zcela symetrické rozdělení je rovno nule. Spektrální šikmost zejména zohledňuje rozložení výkonu v různých frekvenčních složkách, tzn. kladná šikmost signalizuje větší výskyt energie nad spektrálním centroidem a záporná šikmost znamená větší obsah energie pod centroidem. [9]

Pro získání spektrální šikmosti existuje příkaz `spectralSkewness(AudioIn, fs)`, z balíčku Audio Toolbox.

$$\mu_3 = \int (x - \mu_1)^3 f(x) dx \quad (3.4)$$

3.2.3 Spektrální plochost

Spektrální plochost, označovaná také jako tonální koeficient, je poměr mezi geometrickým a aritmetickým průměrem signálu, jinými slovy poměr šumu a tónové složky. Vyjadřuje množství špiček v signálu. U tónů se plochost blíží 0 %, u šumových průběhů se blíží 100 % (neboli 0 až 1), protože frekvenční složky harmonického, nenahodilého charakteru tvoří ve spektru špičky, zatímco např. bílý šum má výkon v celé šíři spektra stejný a spektrum je tedy ploché. [9]

V MATLABu byla použita funkce `spectralFlatness(AudioIn, fs)`, opět z balíčku Audio Toolbox.

3.2.4 Spektrogram

Spektrogram lze definovat jako vizuální znázornění krátkodobé Fourierovy transformace (STFT) – neboli posloupnosti po sobě jdoucích okének FFT, která se používá k analýze rychlých změn v signálu. Okénka se obvykle určitou částí překrývají. [10] Na osu x v grafu je obvykle vynesena čas v sekundách, na osu y frekvence v hertzích a spektrální hustota výkonu je vyjádřena stupnicí barev, nebo odstínů jedné barvy. Pro lepší názornost lze vykreslit graf ve 3D prostoru.

Mezi hlavní atributy lze zařadit typ okénka FFT (Hann, obdélníkové) a rozlišení FFT (2048, 4096, 8192 vzorků). Rámec FFT byl shledán i pro nejkratší šestnáctinové noty ve skladbách jako odpovídající. [11] Příkaz pro vyvolání funkce se zmíněnými parametry vypadá následovně:

```
spectrogram(x, window(), noverlap, nfft, fs),
```

kde x je vstupní signál,
 $window()$ je druh a velikost okénka FFT,
 $noverlap$ míra překrývání okének předchozího parametru,

$nfft$ je počet vzorkovacích bodů STFT a
 fs je vzorkovací kmitočet.

3.2.5 Ostrost

Jednou z důležitých proměnných ovlivňujících pocit ostrosti je spektrální obálka zvuku. Z mnoha srovnání vyplynulo, že jemná spektrální struktura je pro ostrost relativně nedůležitá. Například hluk vytvářející spojité spektrum má stejnou ostrost jako zvuk složený z mnoha jednotlivých složek, pokud jsou spektrální obálky měřené v úrovních kritických pásem stejné. Ostrost spektra má jednotku acum. Referenční zvuk produkující 1 acum je úzkopásmový šum o šířce jednoho kritického (barkového) pásma při středové frekvenci 1 kHz s hladinou 60 dB. [12]

V MATLABu se použitá funkce `acousticSharpness(AudioIn,fs)` odvozuje ze subjektivní hlasitosti v sonech.

3.2.6 Drsnost

Při použití 100% amplitudově modulovaného tónu o frekvenci 1 kHz a zvyšování modulační frekvence od nízkých hodnot k vysokým se prochází třemi různými oblastmi vjemů – při velmi nízkých modulačních frekvencích se hlasitost mění pomalu, vzniká pocit kolísání. Tento pocit dosahuje maxima při modulačních frekvencích blízkých 4 Hz a klesá při vyšších modulačních frekvencích. Při frekvenci přibližně 15 Hz začíná narůstat další typ vjemu, **drsnost**. Dosahuje maxima v blízkosti modulačních frekvencí 70 Hz a klesá při vyšších modulačních frekvencích. S klesající drsností se zvyšuje pocit slyšení tří samostatně slyšitelných tónů.

Drsnost má jednotku asper. Pro určení drsnosti 1 asperu Zwicker zvolil tón s hladinou 60 dB a frekvencí 1 kHz, který je 100% amplitudově modulován při modulační frekvenci 70 Hz. [12] Podobně jako ostrost, funkce `acousticRoughness(AudioIn,fs)` využívá subjektivní hlasitosti v sonech.

3.2.7 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah je obecně definován jako poměr nejsilnější složky a nejslabší složky, často šumu. [13] V kontextu dynamického rozsahu klavírů měřených v této práci byl změřen a vypočítán dynamický rozsah mezi špičkovou hodnotou tónu či akordu ve forte a efektivních hodnot vzorků v pianu (pianissimo), pro úplnost i dynamický rozsah v počáteční fázi tónu (špička/špička). Maximální dynamický rozsah nástroje kvůli chybějícím vzorkům *pp* a *ff* tedy nemůže být stanoven.

$$DR = 20 \log_{10} \frac{Peak_{forte}}{RMS_{piano(pp)}}, DR_{perc} = 20 \log_{10} \frac{Peak_{forte}}{Peak_{piano(pp)}}. \quad (3.5)$$

3.3 Vlastnosti hudebního tónu

Z hlediska sluchového vjemu má tón zpravidla čtyři vlastnosti [14]:

- **výška** – U tónů a částečně i ruchů měřitelná frekvence s jednotkou Hertz, avšak výška tónu je spjata s psychoakustikou a nelze ji považovat za ekvivalentní.
- **síla** – Amplituda, nebo intenzita akustického tlaku. Při měření je to velikost napětí ve Voltech a po převodu A/D převodníkem digitální úroveň vyjádřena bity. Zpravidla uváděna v logaritmickém měřítku jednotkou decibel (dB), popřípadě jako subjektivní hlasitost jednotkou fon. V hudbě se síla značí dynamickými značkami.
- **délka** – Měřena v sekundách (milisekundách), nebo relativní délka pomocí notového systému, počínaje notou celou, přičemž každá další nota (půlová, čtvrtová. . .) má poloviční dobu trvání.
- **barva** – Tón je složen z konečného počtu složek harmonické řady, inharmonicit a ruchů; v kombinaci se všemi předchozími parametry a dalšími vlivy jako např. ADSR obálka, spektrální obálka, modulace tvoří vjem tónu neboli barvy tónu.

Italský výraz	Značka	Hlasitost	Úroveň (dB SPL)
fortissimo	<i>ff</i>	velmi silně	90-100
forte	<i>f</i>	silně	80-90
mezzoforte	<i>mf</i>	středně silně	70-80
mezzopiano	<i>mp</i>	středně slabě	60-70
piano	<i>p</i>	slabě	50-60
pianissimo	<i>pp</i>	velmi slabě	40-50

Tab. 3.1: Dynamika (síla tónu) v hudbě [15]

3.4 Vliv psychoakustiky na vjem výšky a barvy

Objektivní vlastnosti (frekvence, intenzita) jsou na sobě nezávislé, zatímco subjektivní vlastnosti (výška, hlasitost a barva) na sobě závislé jsou. Měřením spektra lze zjistit výsledný vliv výše uvedených subjektivních vlastností na zvukový vjem a do určité míry i jejich důsledek. [15]

Reálné akustické nástroje u tónů vždy vykazují odchylky od celočíselných násobků fundamentu. Tón s čistě harmonickým spektrem zní níže, než reálný tón klavíru se spektrem obsahujícím frekvenční odchylky – z toho vyplývá, že frekvenční vztah jednotlivých vyšších harmonických výrazně ovlivňuje vnímanou výšku tónu. [15]

Při zařazení souzvuků začínají hrát roli intervaly a jejich vzájemná konsonance nebo disonance. Například u oktávy (frekvenční poměr 2:1 a 1:2) se u perfektně harmonického spektra počítají vyšší harmonické vyššího tónu s vyššími harmonickými tónu nižšího. U reálného nástroje se opět projeví inharmonicity v podobě nepřesných násobků fundamentu a mezi blízkými kmitočty dvou harmonických začnou vznikat rázy, které na úrovni harmonických obohacují vnímanou barvu celkového zvuku. V intervalech kvinty, kvarty a tercie (3:2, 4:3 a 5:4) a zejména čistě disonantních intervalů jako velká sekunda a malá septima (9:8, 9:5) se shoda harmonických postupně snižuje a vzniká větší množství rázů na různých kmitočtech. To má za důsledek změny vjemu z bohatší barvy na nelibozvučný souzvuk, ve kterém vnímáme napětí. [15]

Vjem barvy tónu je určován hlavně poměry intenzit jednotlivých harmonických složek při uplatnění psychoakustického maskování a nelineárního zkreslení. S větším počtem harmonických složek ve spektru a jejich vzrůstající intenzitou dochází objektivně k obohacování zvukové informace.

Dle Syrového dělíme vyšší harmonické složky od 1. do 64. na 4 základní pásma:

- 1. až 8. složka – vnímáme jako barvu složenou z intervalů,
- 9. až 16. složka – vnímáme jako klastry (shluky) složené z diatoniky; důležité pásmo pro ostrost,
- 17. až 32. složka – spojitá spektra, zvuk podobný řinčení skla a kovu (mikrointervalů),
- 33. až 64. složka – i přes harmonický poměr tvoří šumovou složku, zcela neharmonickou.

Osm harmonických složek prvního pásma lze poté charakterizovat dále dle jejich barevných příspěvků ve spektru [14]:

1. harmonická: fundament – nosnost tónu – základní frekvence,
2. harmonická: mohutnost tónu, zesiluje fundament, často jej převyšuje v síle,
3. harmonická: barvotvorná, tvoří dutou a tupou barvu (podobnou klarinetu),
4. harmonická: podporuje jas tónu,
5. harmonická: přidává nazální témbr,
6. a 8. harmonická: jasnost,
7. harmonická: tvoří drsnost a rázy (interval velké sekundy).

4 Měření klavírů

Klavír Ehrbar skladatele Janáčka byl nahráván pro potřeby spektrální analýzy jedním kondenzátorovým mikrofonom AKG SE 300B s všesměrovou polární charakteristikou. Poloha mikrofону vůči klavíru je na obr. 4.1: horní deska klavíru otevřena, mikrofón je namířen na střed ozvučné desky ve vzdálenosti 0,5 metru. Signál z mikrofónu byl poté zesílen zvukovou kartou a přenášen v počítače.

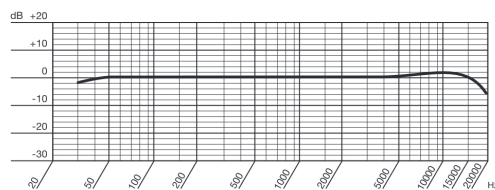
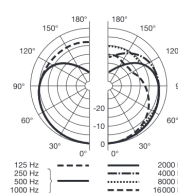
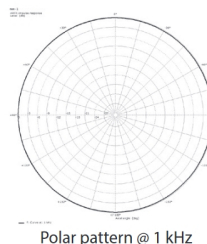
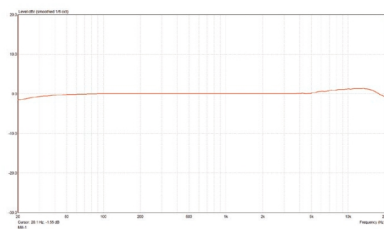


Obr. 4.1: Pozice mikrofónu pro nahrávání vzorků křídla F. Ehrbar

Nahrávky pianin Petrof a Koch & Korselt byly pořízeny podobným způsobem – úlohu měřicího mikrofónu plnil opět kondenzátorový T-Bone MM-1 s 1/4 palcovou kapslí ve vzdálenosti 0,5 m od středu skříně klavíru s odklopenou horní deskou. Nahrávání zajistil rekordér Zoom H4n Pro. Pozice mikrofónu pro pianina je vyobrazena na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Pozice mikrofónu pro nahrávání vzorků pianin

Frequency Response Curve**Polar Pattern****(a) AKG se 300B****(b) T-Bone MM-1****Obr. 4.3:** Frekvenční a polární charakteristiky použitých mikrofonů [16] [17]

4.1 Postup analýzy

Pro srovnání kvalit barvy pianin byly vybrány tóny G v malé oktávě, E1 a následně G2. Tóny jsou primou a tercií akordu E moll. V této části vyhodnocení analýzy byly klávesy stisknuty s dynamikou fortissimo. Druhá část se zaměřuje na akordy A dur a D7 ve dvou rozdílných dynamikách (forte a pianissimo) a jak se jednotlivé tóny pojí v harmonie.

Část třetí spojuje dohromady všechny charakteristiky nástroje v kontextu historicky odpovídající skladby Ballade (Op. 100, No. 15) od německého romantického skladatele Friedricha Burgmüllera, která byla zvolena na základě výskytu různých hráčských technik.

Komplexněji byl změřen klavír Ehrbar: izolovaný tón B byl zahrán v každé oktávě zvlášť (subkontra až třetí oktáva) a v harmonii byl klavír ověřován na dvojdílném cyklu Leoše Janáčka pro klavír, inspirovaného moravskými lidovými písněmi, s názvem Po zarostlém chodníčku. [18] Z prvních deseti skladeb byly nahrány krátké úryvky obouřučně i rozděleně, v této práci jsou cílem analýzy skladby Naše večery, Nelze domluvit a Andante. Zahrádka píše o cyklu: „Obdobná setrvačnost zvuku, upřednostňování faktury cimbálu a její aplikace v klavírní miniatuře ho přivedou později k počátkům specifického *impresionismu* (Po zarostlém chodníčku)“, při komentáři vývoje Janáčkových skladeb. [19] Analýza exemplářů probíhala dle relevance na základě parametrů v sekci 3.2.

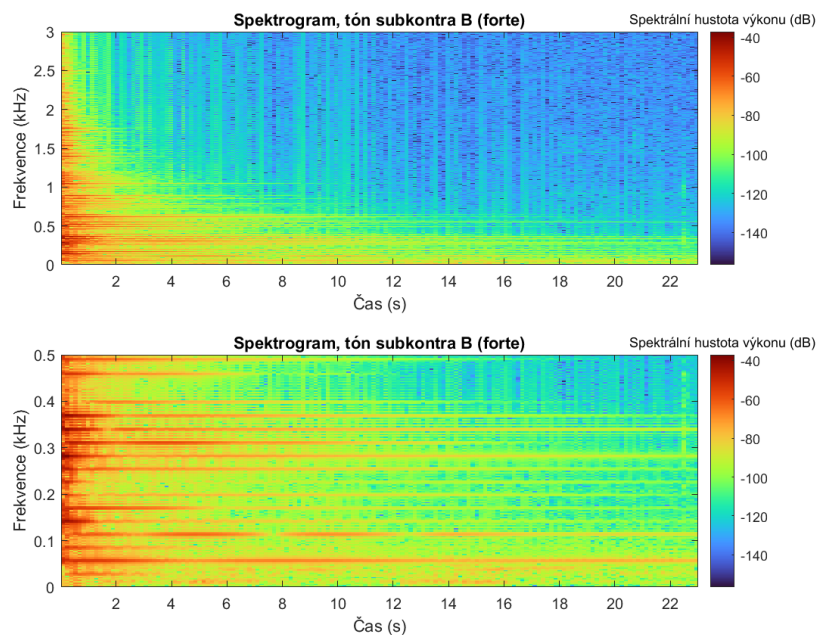
5 Výsledky spektrální analýzy

5.1 Klavír F. Ehrbar

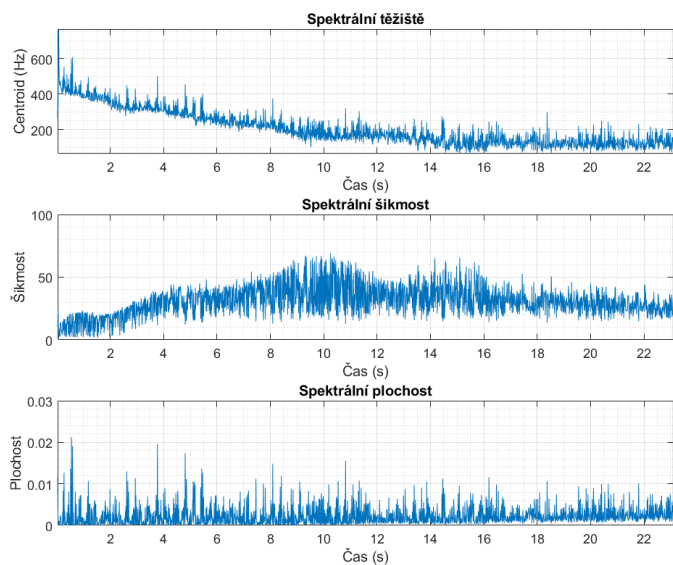
5.1.1 Tóny B v oktávách

Nejbohatší spektrum pozorujeme v basech na tónu subkontra B s fundamentem 29,1 Hz. Kladívko zde rozkmitává jedinou strunu s velkým průměrem. V dynamice forte se na struně tvoří harmonické ve všech pásmech (fundament se nachází na nízkém extrému frekvenčního rozsahu lidského ucha). Zejména v počátku tónu při úderu kladívka se podílí na barvě 103 harmonických. Většina z těchto šumově a kovově znějících mikrointervalů zaniká v čase $t = 0,5$ s. Klastrové pásmo 9. až 16. harmonické je přítomno až v poloviny délky dozvuku. Na detailu spektrogramu v $f = 0,5$ kHz lze vidět velmi rychlý úbytek výkonu fundamentu, nosnost tónu nahrazuje poté 2. harmonická (58 Hz, kontra oktáva). V případě tohoto klavíru hustota výkonu jednotlivých harmonických klesá pozvolně, výjimkou je 4. harmonická složka (116 Hz, velká oktáva). Ve spektru dominují sudé harmonické, klavír vykazuje určitou nazalitu přítomností 5. harmonické na počátku tónu.

Vysoký počet harmonických dokazuje spektrální těžiště 500 Hz v momentu úderu kladívka, klesající s časem k převládající 2. a 4. harmonické v závěru tónu. Šikmost je ve spektru nejvyšší v čase $t = 10$ s, vlivem velké tercie v první oktávě (D1, 291 Hz). Inharmonicity se ve spektru vyskytují v počátku tónu.

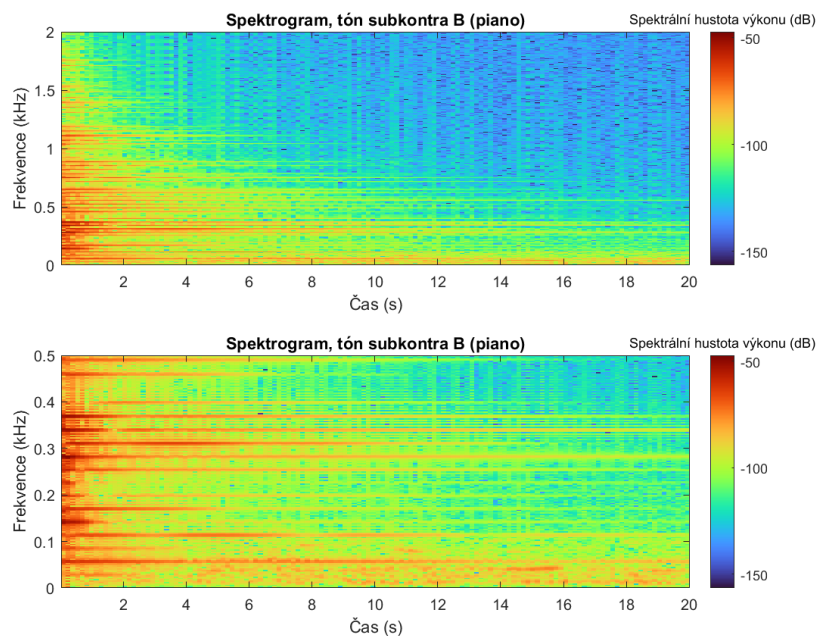


Obr. 5.1: Spektrogram tónu subkontra B, forte



Obr. 5.2: Spektrální parametry tónu subkontra B, forte

Stejný tón ve slabší dynamice zmenšuje šířku spektra téměř na polovinu, protože je struna excitována nižší rychlostí kladívka. Vyšší šumová a klastrová pásma klesají na výkonu a tedy svém vlivu na barvu. Složka fundamentu zaniká ještě rychleji a definice jednotlivých harmonických složek klesá (barva je ucelenější).

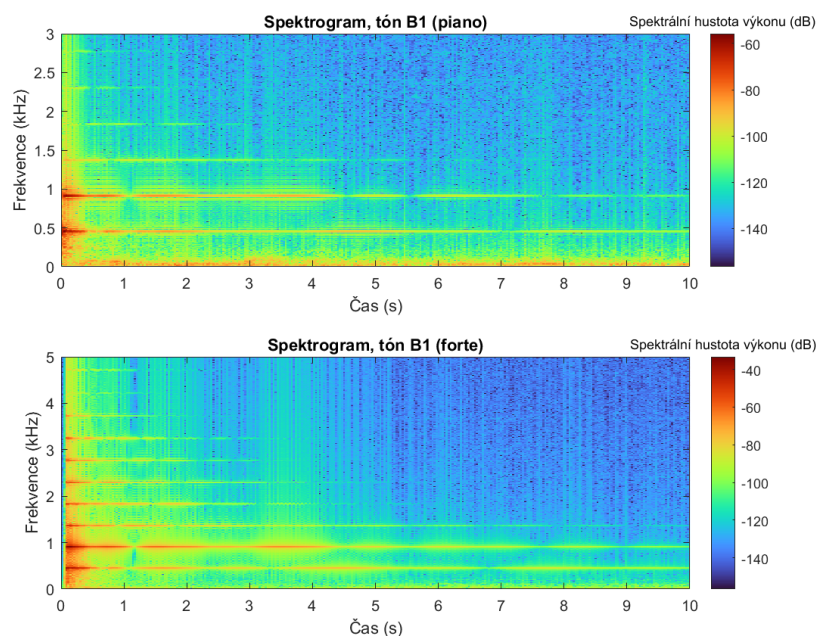


Obr. 5.3: Spektrogram tónu subkontra B, piano

S rostoucím kmitočtem fundamentu se spektrum stává chudším, kmity na strunách zanikají rychleji. Uprostřed rozsahu klavíru (tón B1, 466,2 Hz) jsou harmonické redukovány na jejich první pásmo – v p má spektrum pouhé dvě harmonické, stále se projevuje dominance 2. harmonické nad fundamentem, délka tónu je poloviční oproti tónu B v basech. V dynamice f je vyšších harmonických sedm, liché jsou zastoupeny výrazněji, barva je o něco dutější (harmonická řada prvních tří lichých harmonických by nám vytvořila akord B dur). Výrazněji se projevuje amplitudová modulace jednotlivých složek v čase.

Tón B3 v p (1865 Hz) je poté tvořen téměř výhradně základním kmitočtem a podobá se čistému sinusovému tónu, s desetinovou délkou oproti B1.

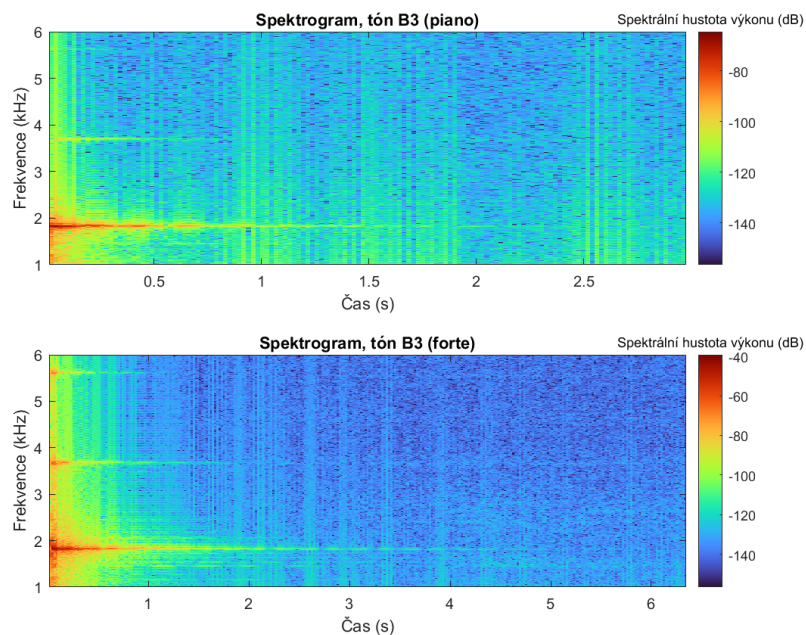
Ve f je v grafu patrný určitý druh šumu, pravděpodobně způsobený odrazy v těle nástroje a lehce rozezněnými sousedními strunami.



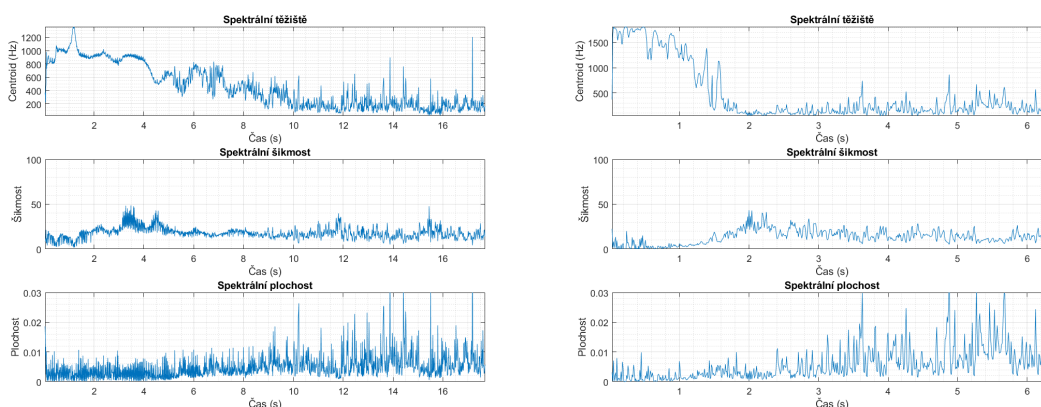
Obr. 5.4: Spektrogram tónu B1, piano a forte

Spektrum B1 se vychyluje vůči úrovni centroidu 2. harmonické a podobně jako u předchozího tónu klesá. Chudost spektra ve vysokých polohách klavíru poté potvrzují parametry tónu B3 – kompletní symetrie kolem těžiště (fundament) bez náznaku jiných složek, posléze nárůst plochosti, indikující přítomnost šumu.

Dynamický rozsah klavíru Ehrbar mezi dynamikou piano a forte se liší dle výšky tónu v oktávě. Výpočet proběhl dle metodiky popsané v sekci 3.2.7. Nejvyšší dynamika je ve čtvrté oktávě a široce využívané první oktávě, nejnižší poté v druhém extrému rozsahu v subkontra oktávě. Zúžením analýzy na nejsilnější vzorky jednotlivých dynamik (tedy na perkusivních špičky) se trend nemění.



Obr. 5.5: Spektrogram tónu B3, piano a forte



(a) Spektrální parametry, B1, forte

(b) Spektrální parametry, B3, forte

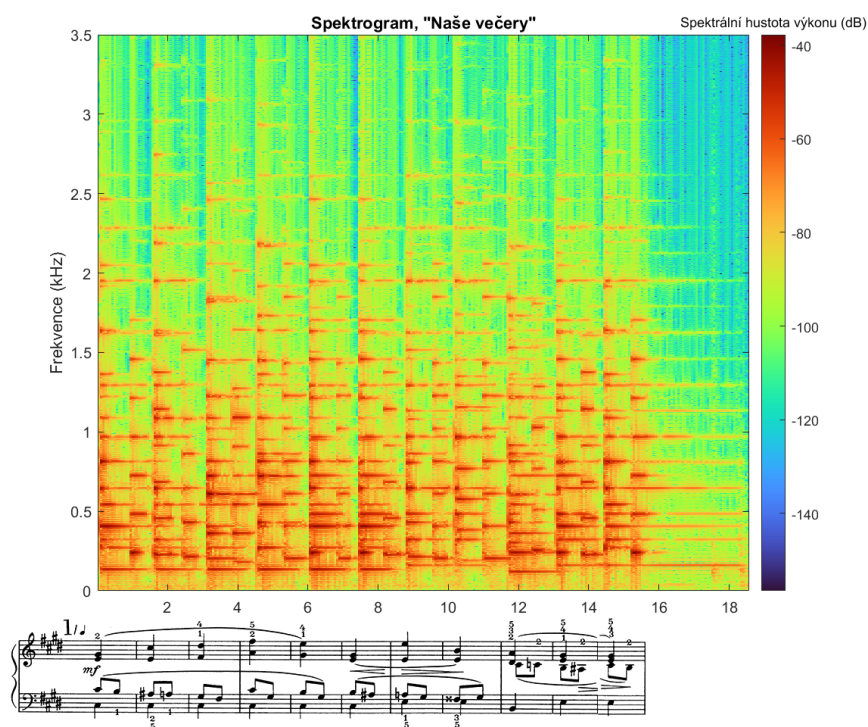
Obr. 5.6: Spektrální parametry tónů ve vyšších polohách

	Dynamický rozsah (dB)	Dynamický rozsah – fáze attack (dB)
Subkontra B	36,99	12,22
Kontra B	39,41	14,32
Velké B	39,49	16,18
Malé B	38,77	10,80
B1	51,41	23,07
B2	42,75	18,55
B3	45,17	22,67
As4	51,81	29,94

Tab. 5.1: Dynamický rozsah v tónech, klavír Ehrbar

5.1.2 Barva v harmonii cyklu „Po zarostlém chodníčku“

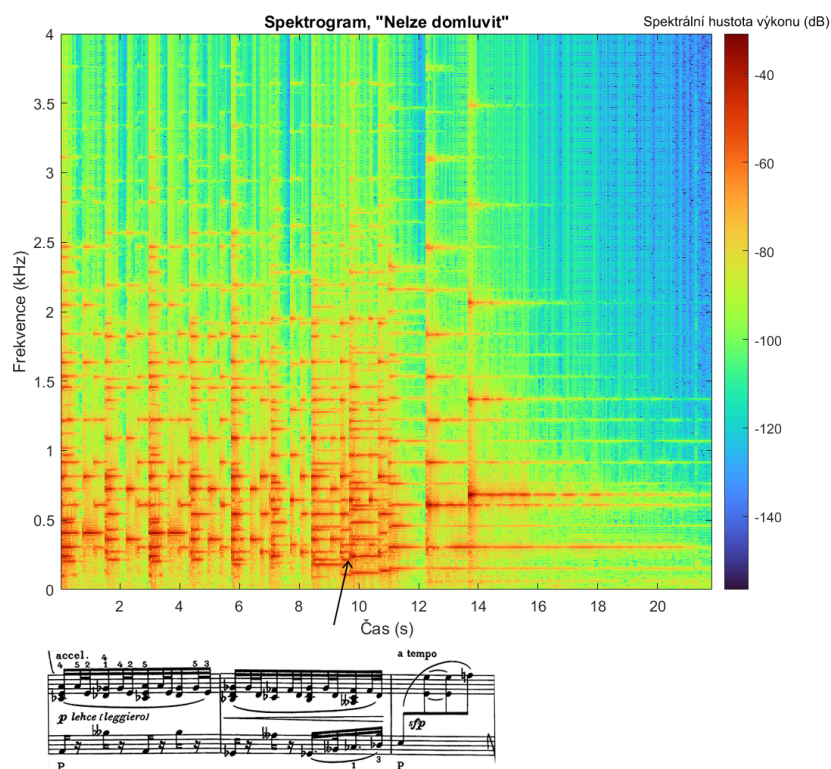
Fráze ve skladbě Naše večery by měly znít spojeně (legato) dle notového zápisu. [20] Spektrogram odhaluje transienty v podobě svislých čar, souzvuky navíc často netrvají ani u základní frekvence tak dlouho, aby plynule navázaly v fráze další. Nejvyšší počet harmonických složek si lze povšimnout u čtyřzvuků široké harmonie, zejména když melodie stoupá. Neméně mají vliv na šíři spektra intervaly velké sekundy (např. v čase 10 sekund). Silně se skrz celou skladbu projevuje třetí, šestá a dvanáctá harmonická od tónu E (kolem kmitočtu 1974 Hz). V čtyřzvucích se již výrazně podepisuje na barvě rozladěnost těchto harmonických, náležející různým tónům – všechny se blíží tónu H2, ale jsou různě rozladěné o několik centů. Projevuje se to téměř neslyšitelnými rázy, které obohacují barvu klavíru, a tím tvoří jeho charakter.



Obr. 5.7: Spektrogram úryvku skladby „Naše večery“ včetně notového zápisu

Ve srovnání s předchozí skladbou je ve skladbě Nelze domluvit soustředěno méně energie kolem fundamentů, a vzhledem ke slabší dynamice (piano oproti mezzo-forte) je definice jednotlivých tónů a jejich harmonických na jedné frekvenci nižší. Levá ruka pouze nedoprovází, ale sama vytváří důležitou melodickou linku. [20]. Šipka v grafu naznačuje bod potenciálního maskování melodie v pravé ruce melodií v levé ruce – spektra se přibližují a výsledná barva je rozmanitější, ale klesá čitelnost. Očividné je přeznívání posledního tónu Es v levé ruce, jehož fundament a dal-

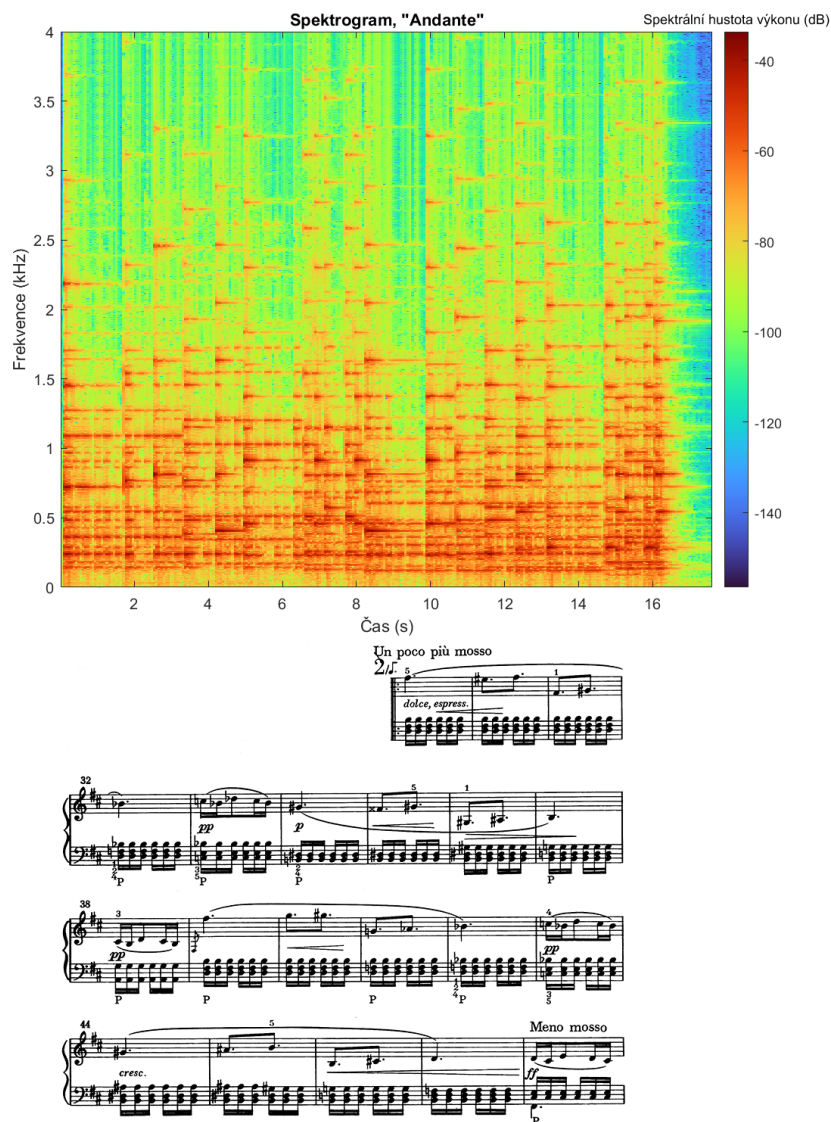
ších 7 harmonických pozvolně ubývá na amplitudě a poté jsou posíleny ve vyšších oktávách, finální tón dotváří napětí (velká sekunda).



Obr. 5.8: Spektrogram úryvku skladby „Nelze domluvit“ včetně notového zápisu

Ze spektrogramu poslední analyzované skladby Andante je dobře viditelná plnost spektra v basech, protože levá ruka nepřetržitě vede melodii šestnáctinovými notami v malé a velké oktávě. Čistě z úryvku vystupuje střídá melodie v první a druhé oktávě, harmonické se poté opět viditelně vrství na blízkých frekvencích a vytváří bohatou barvu jejich interakcí. I v pásmu nad 3,5 kHz mají harmonické dostatečnou energii na ovlivnění celkové barvy harmonie. Šířka spektra basových dvou a trojzvuků překrývá fundamente a druhou harmonickou melodie v druhé a zejména první oktávě. Melodie je oproti předchozí skladbě ve výsledné barvě dobře čitelná, částečně vlivem vyšší ostrosti této melodie ve srovnání s basovým doprovodem a také vlivem dynamiky *pp* (*p*). K maskování barvotvorných složek však stále může docházet.

Důležitým faktorem vysokého výkonu basového pásma bude větší velikost křídla oproti pianinu (tedy i jejich ozvučných desek), protože jejich větší rozměry umožňují vyšší množství rezonance napříč nástrojem a efektivnější vyzáření zvuku. Spektrální obálka je dle Galemba vysoce závislá na průběhu dozvuku v nástroji, který začíná na ozvučné desce a pokračuje do zbytku skříně klavíru. U basových tónů se vyšší harmonické nachází v nejcitlivějším pásmu slyšení, budou mít tedy vyšší vliv na



Obr. 5.9: Spektrum úryvku skladby „Andante“ včetně notového zápisu

vnímanou barvu nástroje. Efekt inharmonicit bude také vyšší u tónů s širokým spektrem (první a třetí skladba). Kvalitní ozvučná deska z tónového dřeva ovlivňuje barvu výrazněji u křídla, než u pianina. [21]

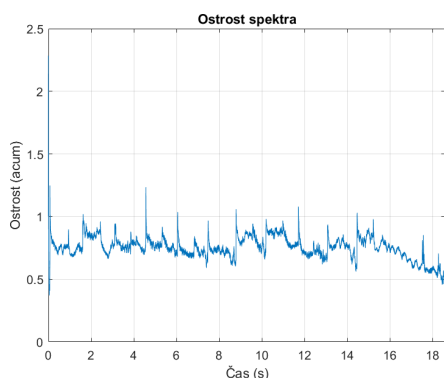
Následující tabulka obsahuje průměry spektrálních deskriptorů napříč celými úryvky. Spektrální těžiště leží kolem 500 Hz u všech úryvků, z toho vyplývá, že frekvence středního pásma jsou ve zvuku zastoupeny nejhojněji. Kladná šikmost značí přítomnost frekvencí nad těžištěm. To odpovídá nemalému výskytu vyšších harmonických ve zvuku klavíru. Frekvenční rozdělení je ale vzhledem k harmonickým poměrům relativně symetrické.

Hodnoty spektrální plochosti se blíží nule, spektrum je tedy vysoce tonální, náhodné šumové špičky se mohou vyskytovat v nahrávkách v tichých pasážích vli-

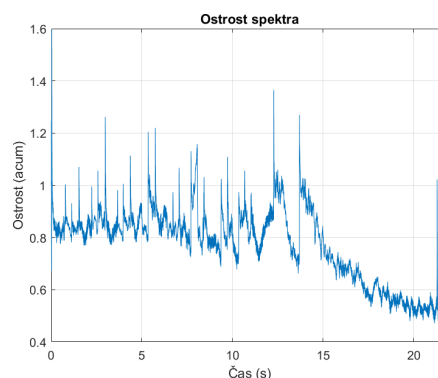
vem šumu mikrofonu. Ostrost je zpravidla pod úrovní 1 acum, na nejvyšší špičky ostrosti mají vliv zejména transientní inharmonicity při úderu všech kladívek současně a také vyšší harmonické složky v pásmu výšek, které mají ovšem krátké trvání a celková ostrost klavíru není výrazná. Nejprominentnější ostrost vlivem silně uhozených kláves pravé ruky vykazuje skladba Andante, a to v rychlých špičkách. Podobné špičky v grafu ostrosti lze pozorovat u skladby Nelze domluvit. Barva klavíru ve skladbě Naše večery při nižších špičkách ostrosti zaoblenější a celistvá. Pečlivým výběrem dynamiky jednotlivých frází mohl ve výsledku Janáček na klavíru Ehrbar výrazně ovlivnit dojem skladby tvarováním spektra nástroje.

	Těžiště [Hz]	Šikmost	Pločnost	Ostrost (acum)
Naše večery	464	13,897	0,0017	0,786
Andante	519	12,045	0,0018	0,901
Nelze domluvit	529	17,787	0,0018	0,864

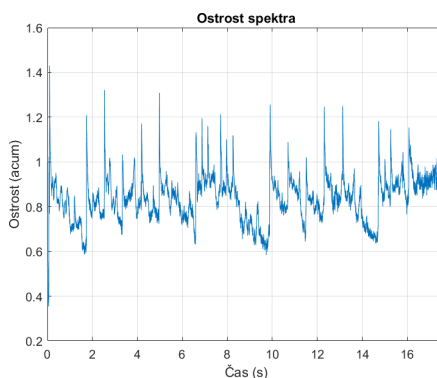
Tab. 5.2: Průměr parametrů pro úryvky skladeb z cyklu „Po zarostlém chodníčku“



(a) Ostrost, „Naše večery“



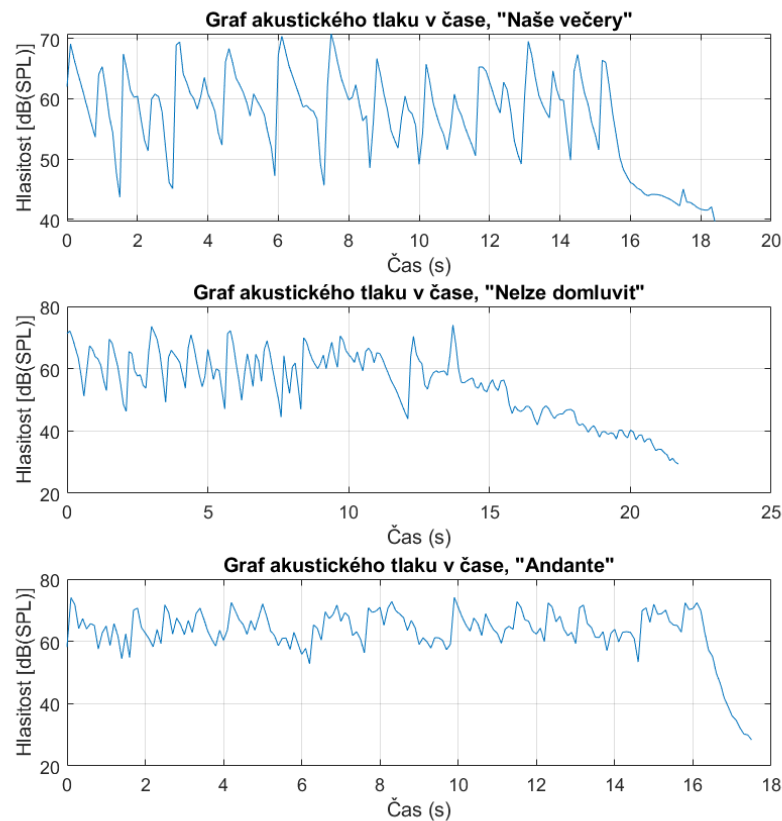
(b) Ostrost, „Nelze domluvit“



(c) Ostrost, „Andante“

Obr. 5.10: Grafy ostrosti, úryvky

Poslední bod analýzy je integrovaná (RMS) hlasitost vzorků klavíru, vyjádřená v dB(SPL), ve vzdálenosti 0,5 m od klavíru, zvyrazňující rozdíly mezi skladbami. Udržované legato akordy a souzvuky první skladby způsobují velké dynamické rozpětí – až 25 dB(SPL), zatímco u dvou zbylých skladeb, které sestávají spíše ze staccata, rozsah klesá na 20 a 10 dB(SPL). Svou roli na subjektivním vjemu tohoto akustického tlaku bude v reálném poslechu mít charakteristika a následná odezva prostoru, ve kterém se klavír nachází.



Obr. 5.11: Efektivní hodnota akustického tlaku v čase, klavír Ehrbar

5.2 Klavír Petrof

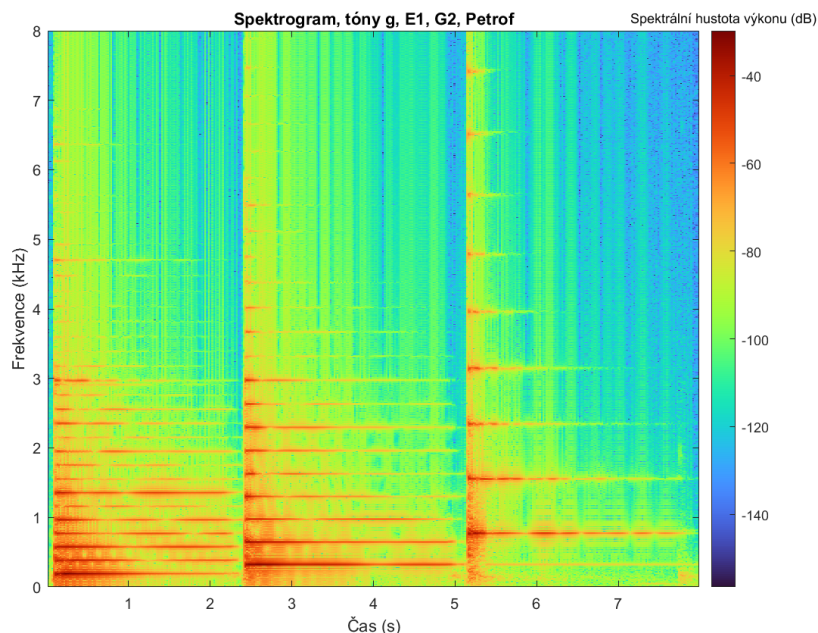
5.2.1 Tóny g, E1 a G2

Na obr. 5.12 byly spektrogramem analyzovány 3 tóny, počínající tónem g v malé oktávě a končící tónem G2, hrány fortissimo. Fundamenty jsou 196, 330 a 784 Hz. Spektrum je velice bohaté a vyrovnané v malé oktávě – jsou zastoupeny všechny barvotvorné harmonické, zejména prominentní je třetí (dutá barva), kolísající pátá (nazální) a sedmá, drsně znějící složka (interval velké sekundy, F3). Překvapivě velkou energii má také 15. složka (Fis4). V tomto tónu znějí zároveň kmitočty odpovídající tónům F, Fis a G, které by zněly v souzvuku silně nelibozvučně. Celkově má tón 30 harmonických složek.

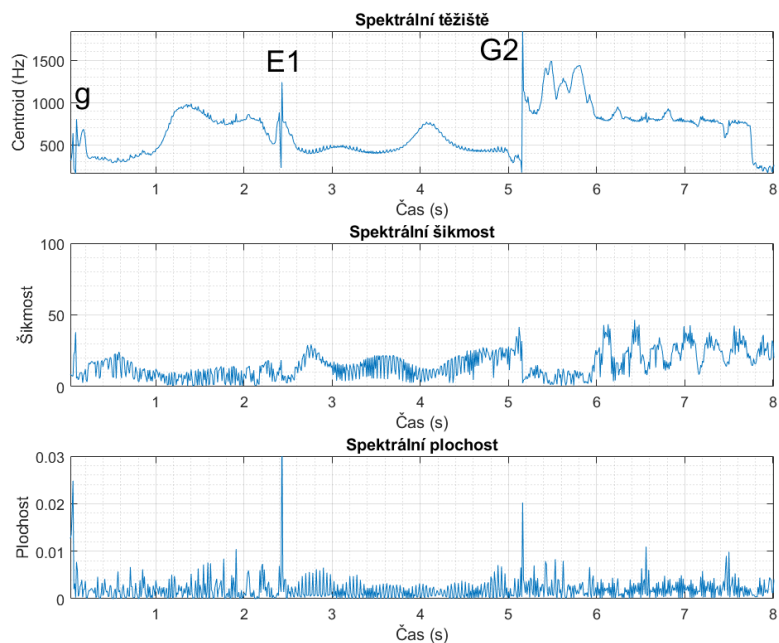
O kvintu výše na tónu E1 má klavír nadále výrazný fundament, žádná z harmonických v prvním pásmu nechybí, ale výrazné jsou šestá, sedmá a devátá, z nichž dvě poslední zmíněné jsou opět intervaly velké sekundy. Spektrum je co v počtu harmonických zhruba poloviční oproti předchozímu tónu.

Kromě přeznívajícího tónu E1 je na spektrogramu posledního tónu G2 vidět 9 složek, které jsou s vzrůstající frekvencí od sebe časově poloviční. Mimo tyto složky je díky větší frekvenční vzdálenosti složek patrný šum vygenerovaný kladívkem, a to od 20 Hz v kmitočtu 1500 Hz.

Složky jsou amplitudově stabilní a nekolísají v čase v takové míře, jako u koncertního křídla Ehrbar. Fundament zde není potlačen vůči druhé harmonické.



Obr. 5.12: Spektrogram tónů g, E1, G2, klavír Petrof



Obr. 5.13: Spektrální parametry tónů g, E1, G2, klavír Petrof

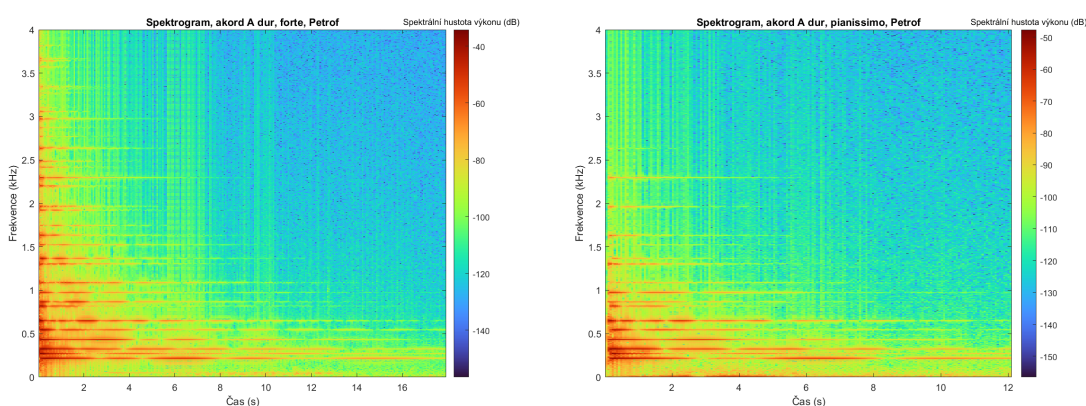
Těžiště tónu g se pohybuje od 500 Hz na začátku tónu ve fázi attack na dvojnásobek, vlivem vyšších harmonických, zejména druhé a třetí. Tento jev je slyšitelný ve zvukovém vzorku, ale vlivem psychoakustiky zní tón stále jako původní kmitočet. Méně extrémní je vliv harmonických tónu E1, tón G2 poté vykazuje opačný trend, kdy vyšší harmonické zanikají v počátku tónu rychleji a těžiště je v ustáleném stavu na hodnotě asi 784 Hz. Přítomnost přechodových jevů dokazují náhlé špičky v grafu spektrální plochosti – krátká pauza mezi tóny a úder kladívka jsou netónovými průběhy. Obecně se průběhy centroidu a šikmosti (tedy i vývoj spektrální obálky) liší v perkusivní fázi i ve fázi dozívání tónu ve srovnání s křídlem Ehrbar, kde vliv vyšších kmitočtů harmonických na centroid není tak výrazný. Následující tabulka obsahuje přehled špiček ostrosti a drsnosti analyzovaných tónů klavíru Petrof. Ostrost nad 2 acum je již vzhledem k vysoké dynamice *ff* výrazná. U tohoto klavíru se projevuje ostrost i v malé oktávě výrazně vzhledem k šířce spektra v 7 kHz. Podmínka ostrosti – velký obsah vysokých kmitočtů je ve druhé oktávě splněna a důsledkem je ostrost 3,18 acum. Drsnost (s modulační frekvencí 197 Hz) roste s výškou tónu. Dle Zwickera je drsnost závislá na amplitudě, lze tedy předpokládat, že v nižších dynamikách by hodnoty drsnosti výrazně poklesly. [12]

	Ostrost (acum)	Drsnost (asper)
Malé g	2,87	0,65
E1	2,66	1,07
G2	3,18	1,40

Tab. 5.3: Ostrost a drsnost tónů, Petrof

5.3 Barva v harmonii

5.3.1 Akordy A dur a D7, forte a pianissimo



(a) Spektrogram, akord A dur, forte

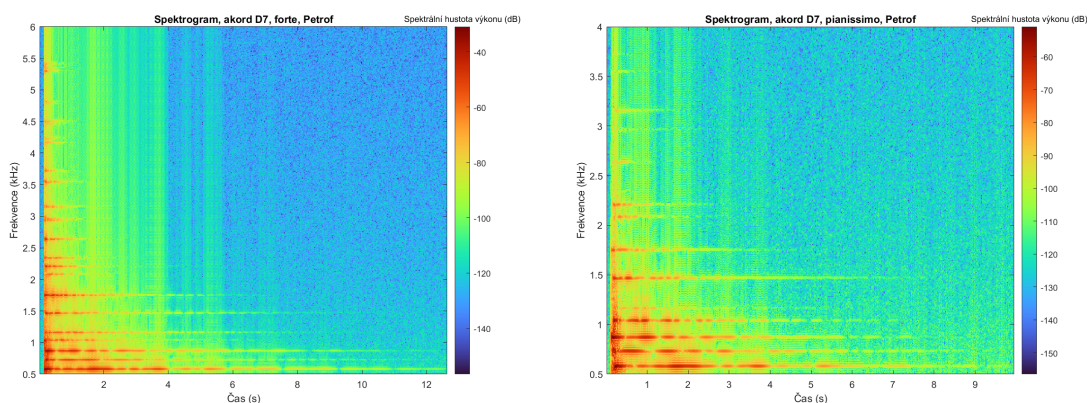
(b) Spektrogram, akord A dur, pianissimo

Obr. 5.14: Spektrogramy akordu A dur, Petrof

U pianina Petrof jsou u trojzvuku od malého A dobře viditelné ve spodní části spektrogramu fundameny tónů A, Cis, E, které již vykazují na rozdíl od samostatných tónů fluktuace v čase, a to nejvíce u prvních dvou zmíněných. Následují druhé a třetí harmonické složky a frekvenčně blízké složky třetí harmonické tónu Cis a čtvrté harmonické tónu A. Dutá barva třetí složky náležící tercii v akordu je slyšitelná pouhým poslechem akordu. Další nevzdálený shluk tvoří pátá harmonická složka Cis a šestá složka tónu A. Vzorec se ve spektru opakuje až v 4 kHz, nad touto frekvencí jsou náplní spektra už jen transientní, perkusivní složky s krátkou dobou trvání. Akord je po odeznění těchto transientů od čase 2 sekundy nazální a poslechem je patrný vzrůstající tón (druhá harmonická). V harmonii je tedy tendence vyšších harmonických zvyšovat těžiště celého souzvuku stejná, jako u samostatného tónu.

Zahrání akordu v *pp* docílíme výrazného omezení spektra, úplně mizí sedmá harmonická složka tónu A a čtvrtá složka tónu Cis. Naopak je podobně jako u vyšší dy-

namiky stále přítomná sedmá harmonická složka tónu E1. Dominance druhých a třetích harmonických od první třetiny trvání akordu se opakuje.



(a) Spektrogram, akord D7, forte

(b) Spektrogram, akord D7, pianissimo

Obr. 5.15: Spektrogramy akordu D7, Petrof

Obohacením běžného akordu D dur o septimu dostáváme septakord D7, počínající tónem D2 (587 Hz). Fundament tónu C3 je energií ve spektru oproti ostatním fundamentům čtyřzvuku poněkud méně výrazný. Dutost souzvuku nalezená u předchozího durového akordu je přítomna i v barvě tohoto akordu, zastoupena třetí harmonickou tóniky (1761 Hz). Blízké složky sestávají z druhé harmonické tónu C3, třetí harmonické tónu Fis2 a čtvrté harmonické tónu D2. Amplitudová fluktuace má vyšší frekvenci oproti akordu A dur, u harmonických i fundamentů. Poslední shluk frekvencí se nachází těsně pod kmitočtem 5,5 kHz.

V pianissimu mizí druhá harmonická složka tónu D2 a zmenšuje se mohutnost primy v septakordu. Naopak druhá složka tónu Fis2 zachovává mohutnost tercie a setrvává ve zvuku delší dobu, než v případě forte. Spektrum septakordu v *pp* končí na kmitočtu 3161 Hz rozladěnou třetí harmonickou složkou tónu C3. Celková barva septakordu postrádá ostré složky a je tak výrazně jemnější.

5.3.2 Skladba Ballade

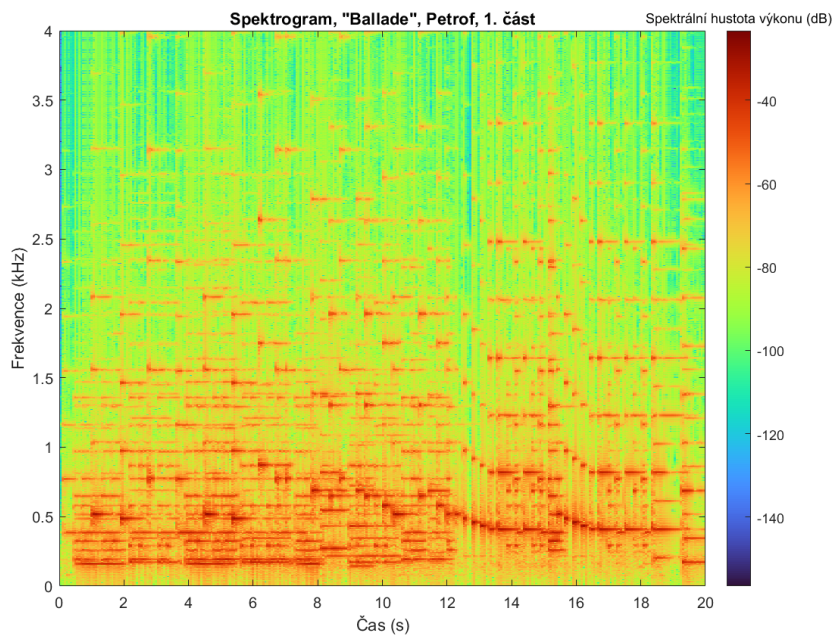
Srovnání spektrogramů obou částí skladby přináší několik poznatků – u první části, převážně v pianu, je definice jednotlivých frekvencí harmonie a vyšších harmonických nižší, barva je oblá, jemná, spektrálních složek je méně a jsou od sebe vzdálenější. Basové pásmo je výrazné u obou částí, nejvyšší hustota výkonu se nachází v oblasti v 1 kHz. V první části skladby jsou ve vyšších kmitočtech od 1,5 v 3,5 kHz viditelné vyšší harmonické složky melodie pravé ruky v první a druhé oktávě, výkon

Ballade
Op. 100, No. 15
Friedrich Burgmüller

Ballade
Op. 100, No. 15
Friedrich Burgmüller

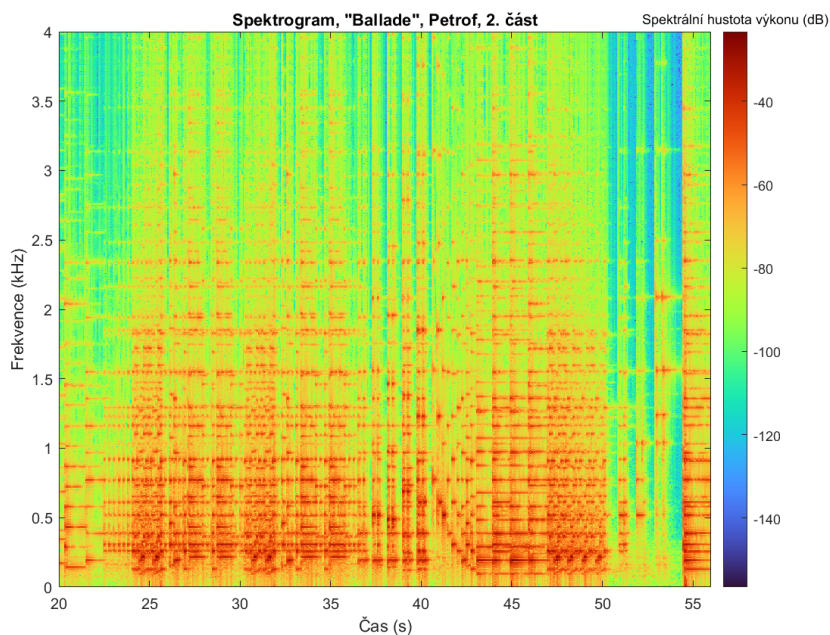
(a) První, dynamicky slabší část skladby (b) Druhá, dynamicky silnější část skladby

Obr. 5.16: Notový zápis skladby Ballade (Op. 100, No. 15), Friedrich Burgmüller



Obr. 5.17: Spektrogram, Ballade, 1. část, Petrof

těchto složek je srovnatelný s některými fundamenty. Ve zvuku klavíru se to projevuje pronikavými, zvonivými a jasnými tóny, které vystupují nad mixturu barvy levé ruky v basech.



Obr. 5.18: Spektrogram, Ballade, 2. část, Petrof

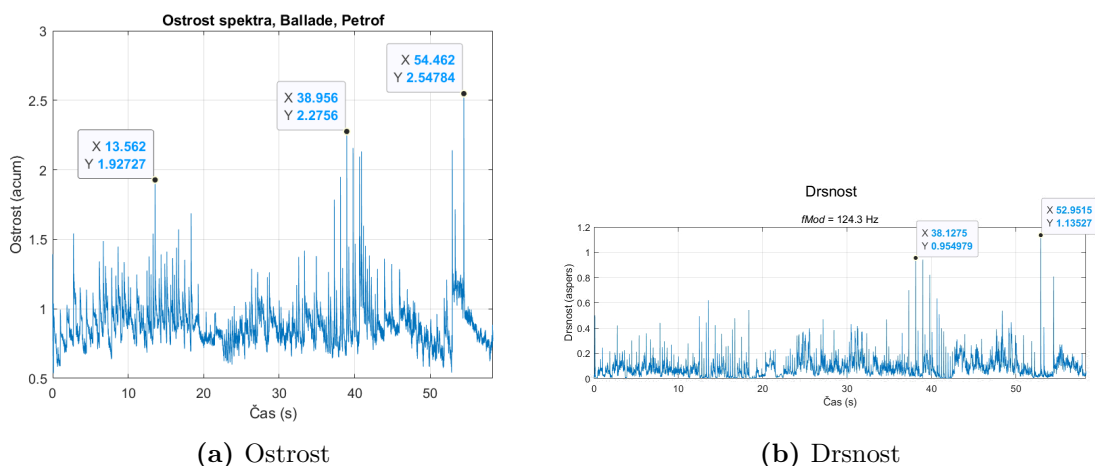
Ve druhé části skladby se vyskytují akcenty a přírazy, které poskytují maximální šířku spektra klavíru, zahrnující druhé, klastrové pásmo i třetí pásmo spojitého spektra i velké množství transientních, perkusivních inharmonicit. Diminuendo v 71. až 74. taktu se ve spektrogramu zobrazuje jako pozvolný úbytek vyšších harmonických 2. pásma (2,5 kHz a vyšší). V této části je vzhledem k paralelnímu pohybu obou linek v oktávách, menším rozměrům a schopnosti pianina posílit efektivně nižší kmitočty maskována levá ruka pravou, s klesající dynamikou se míra maskování snižuje. Harmonické se vzhledem k poměru fundamentů 2:1 mezi frázemi sčítají na stejných kmitočtech, což posiluje výkon prvního pásma složek. V závěru druhé části skladby (50. - 55. sekunda) je viditelný i posun obou rukou v druhé až čtvrté oktávy, spektrum a barva se zužuje. Poslední, mohutný čtyřzvuk hraný sforzando (většinou maximální hlasitost klavíru) opět zaplňuje spektrum až v 4 kHz.

Variabilní šířku spektra, počet harmonických složek a pronikavou, jasnou barvu nepřímou vyjadřují grafy ostrosti a drsnosti na obr. 5.19a a 5.19b.

5.4 Klavír Koch & Korselt

5.4.1 Tóny g, E1 a G2

Ve srovnání s klavírem Petrof (obr. 5.12) je spektrum tónu g klavíru Koch & Korselt výrazně užší. Nejvíce se na něm projevuje nedokonalost ladění (potvrzeno maji-



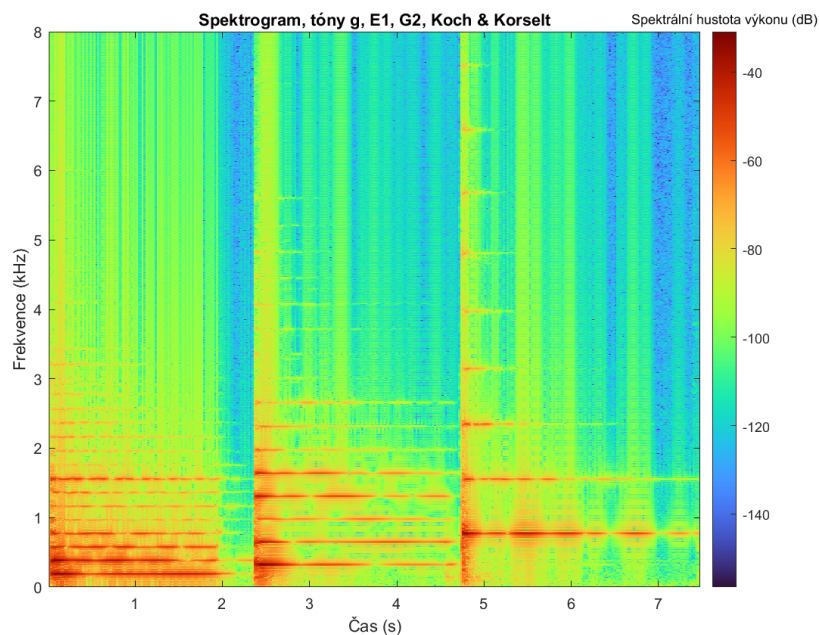
Obr. 5.19: Grafy ostrosti a drsnosti, skladba Ballade, Petrof

telem exempláře). Poslední spektrální čára se nachází na frekvenci 4100 Hz. Fundament a druhá harmonická má vyšší hustotu výkonu a kolísání třetí složky probíhá s vyšší frekvencí. Tupost a dutost tónu je tedy v barvě vysoká. Pátá harmonická je přítomna s výkonem -70 dB od počátku tónu, její nazální vliv na barvu je tedy minimální. Osmá složka je poslední přítomná s výkonem nad -50 dB a její frekvence není stabilní, spektrální čára má sinusový průběh a rozdíl těchto frekvencí je 32 Hz. Ostatní harmonické složky efekt vibrata vykazují podobné chování, avšak rozdíl frekvencí je nižší. Na barvě zvuku se zmíněné chování podepisuje rozladěným dojmem, menší vzdálenosti frekvencí tvoří rázy a výsledná amplitudová modulace se projevuje rychlými fluktuacemi amplitudy. Spíše než výrazným vjemem klesající a rostoucí amplitudy či hlasitosti však modulace obohacuje tón v barvě, a to mírnou drsností nepřevyšující 0,2 asper.

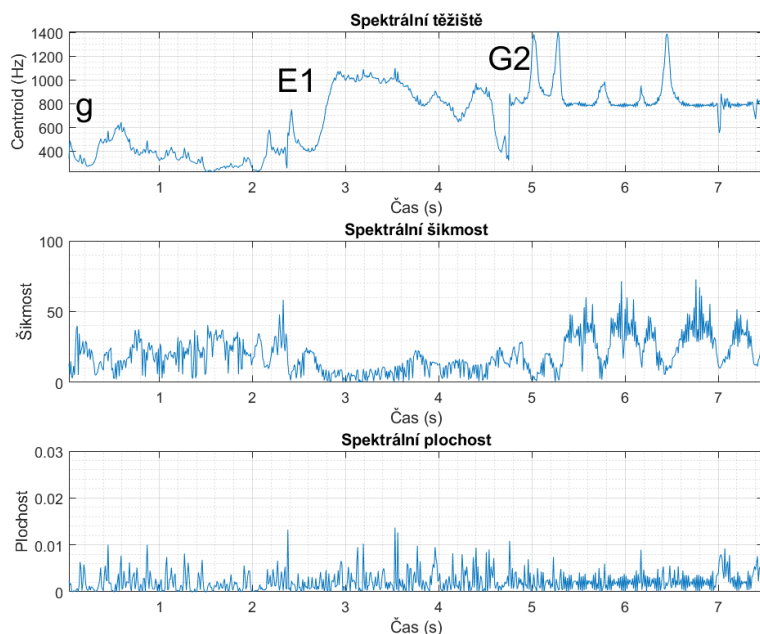
Tón E1 postrádá výkon třetí harmonické z předchozího tónu a naopak přináší nazálnost v podobě složky páté. Výkon šesté až osmé složky je v porovnání s pianem Petrof výrazně nižší především v prvních dvou sekundách trvání tónu, devátá harmonická chybí úplně. Vyšší složky jsou už čistě transienční. Důsledkem je menší jasnost a brysknost tónu E1 klavíru Koch & Korselt.

Tón G v druhé oktávě se shoduje co v počtu harmonických s klavírem Petrof, s vyšším výkonem třetí složky a naopak nižším u čtvrté složky. Barva v této oktávě je jemnější, toto tvrzení potvrzují rozdílné hodnoty ostrosti a drsnosti tónů v tabulkách 5.3 a 5.4.

Při společné interpretaci spektrogramu a spektrálních parametrů lze identifikovat v čase $t = 0,5$ s zvýšení těžiště na 600 Hz na krátký moment a následný pokles směrem k fundamentu. Čtvrtá a pátá složka (1320 a 1650 Hz) ovlivňuje výrazně těžiště tónu E1 (330 Hz), ve výsledku je těžiště 0,5 sekundy na frekvenci 1000



Obr. 5.20: Spektrogram tónů g, E1, G2, klavír Koch & Korselt



Obr. 5.21: Spektrální parametry tónů g, E1, G2, klavír Koch & Korselt

Hz (kmitočet třetí harmonické tónu E1). Tón G2 má stabilnější těžiště v porovnání s klavírem Petrof, vyjma špiček rostoucích k 1400 Hz, kdy druhá harmonická složka vyplňuje mezery fundamentu způsobené jeho výkonovou fluktuací. Celková

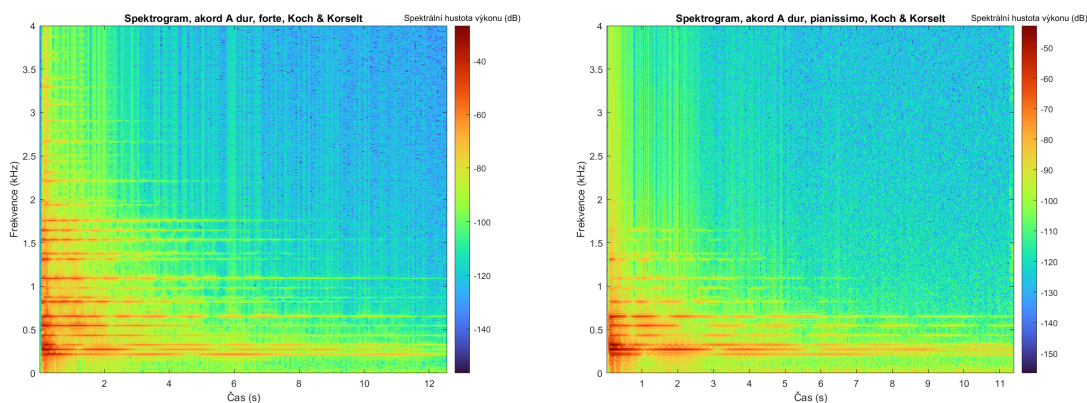
šikmost, neboli distribuce kmitočtů vůči centroidu se mění ve větší míře a rychleji než u předchozího klavíru. Špičky plochosti v místech změn tónů naopak nedosahují tak vysokých hodnot.

	Ostrost (acum)	Drsnost (asper)
Malé g	4,14	0,47
E1	1,75	0,68
G2	2,26	0,67

Tab. 5.4: Ostrost a drsnost tónů, Koch & Korselt

5.5 Barva v harmonii

5.5.1 Akordy A dur a D7, forte a pianissimo



(a) Spektrogram, akord A dur, forte

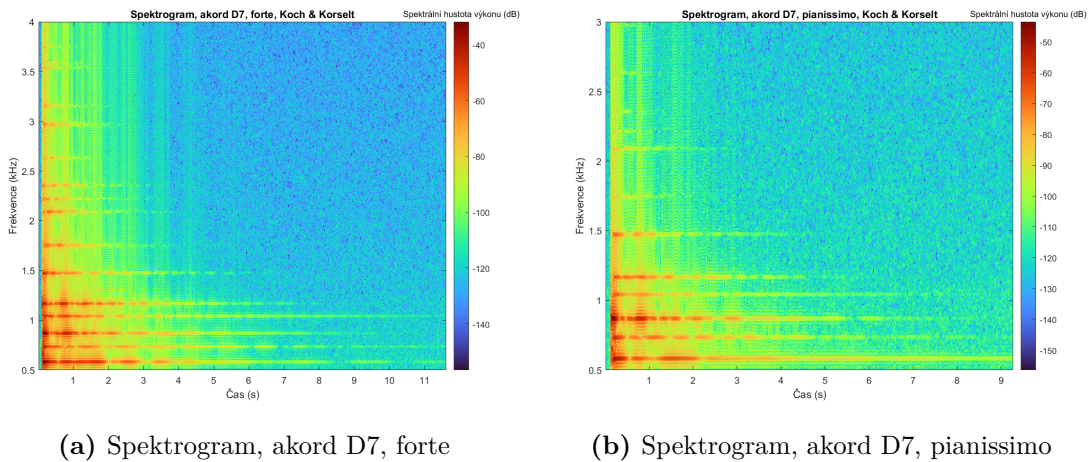
(b) Spektrogram, akord A dur, pianissimo

Obr. 5.22: Spektrogramy akordu A dur, Koch & Korselt

V počátku akordu A dur od malého A je prvním rozdílem od pianina Petrof dominance tercie (Cis1) v čase $t = 2,5$ s oproti zbylým fundamentům souzvuku – zejména fundamentu tónu A (220 Hz) a jeho druhé harmonické (440 Hz) klesá výkon strměji. Třetí harmonická složka tercie tónu je nevýrazná, tzn. že nejvíce barvotvorných složek zastoupených v harmonii tvoří liché harmonické primy a kvinty. Tupější a zastřenější barva plyne z užšího spektra akordu a chybějící hustoty výkonu v pásmu výšek.

Užší spektrum se přenáší i v dynamiky *pp*, veškeré složky přítomné ve spektru jsou fundamenty, druhé, třetí, nebo čtvrté harmonické. Souzvuk je dutý, temný a

„hutný“, chybí mu jasnost a doprovod či melodie budou tvořit blend barev spíše než mixturu.



Obr. 5.23: Spektrogramy akordu D7, Koch & Korselt

Ve výše položeném akordu D7 je hustota výkonu druhé harmonické tónu D (1174 Hz) zásadně vyšší oproti klavíru Petrof, ve výsledném zvuku je nosnost základního tónu také vyšší. Stablnější je i septima septakordu (C3). Dochází k součtu třetí složky primy a druhé složky kvinty na kmitočtu 1760 Hz, avšak celkový výkon je o 20 dB menší, než v případě předchozího exempláře. Složky jsou komparativně slabší i v kmitočtech >2000 Hz a konečně spektrum je opět užší.

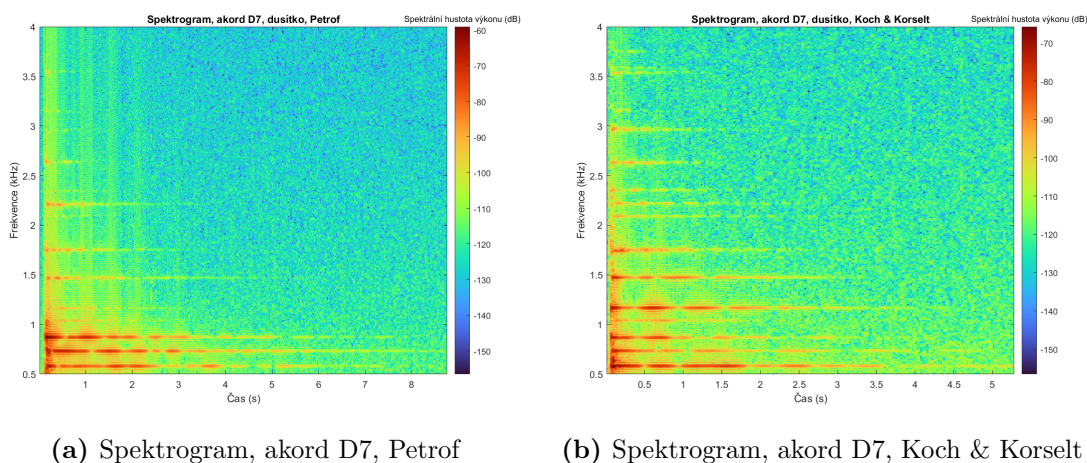
V pianissimu se opakuje vzorec druhé harmonické D. Kromě transientů se nad frekvencí 1,5 kHz nenachází žádné další barvotvorné složky, slyšíme tedy čisté fundamenty obohacené o jejich oktávy – druhé harmonické. Velké množství energie leží v tónu A (kvinta), fundament je zde podpořen více jak ve forte a zároveň více než u Petrofu, doznívající jako poslední. Poněkud chybí energie septimy, která ani nekolísá ve výkonu.

Finální srovnání dynamického rozsahu na základě akordů v *f* a *pp* je po skupinách akordů v tab. 5.5. Větší dynamický rozsah dle výsledků vykazuje klavír Petrof, a to jak v celém trvání akordu, tak i v perkusivní fázi.

	Dynamický rozsah (dB)	Dynamický rozsah – fáze attack (dB)
Petrof A dur	38,26	16,24
Koch & Korselt A dur	37,36	13,50
Petrof D7	44,14	18,17
Koch & Korselt D7	41,00	14,26

Tab. 5.5: Dynamický rozsah v akordech, Petrof a Koch & Korselt

5.5.2 Srovnání hraných souzvuků pianin při zapojených dusítkách



Obr. 5.24: Spektrogramy akordů D7 se zapojeným dusítkem

	Hlasitost bez dusítka [dB(SPL)]	Hlasitost s dusítkem [dB(SPL)]
Petrof D7	77,61	50,47
Koch & Korselt D7	77,88	43,14

Tab. 5.6: Porovnání hlasitosti nástroje bez dusítka a s dusítkem

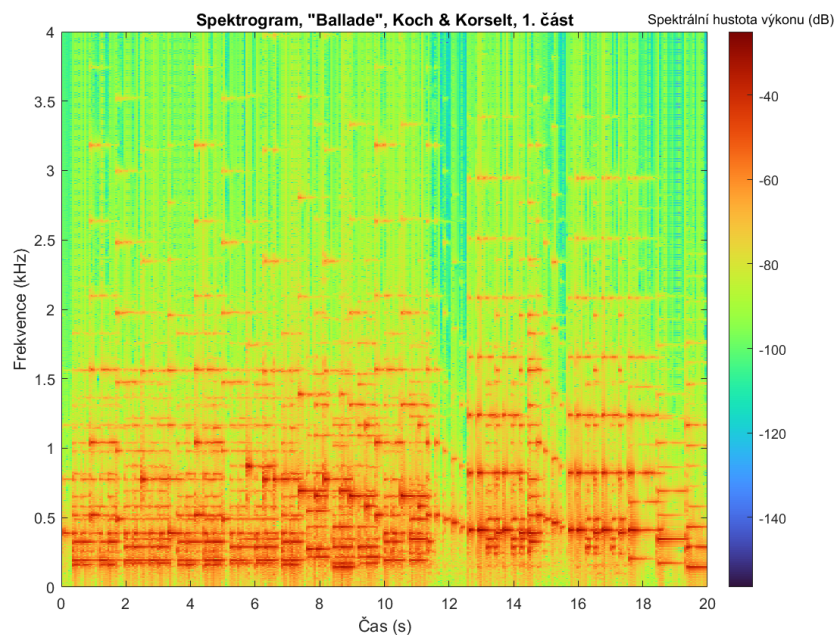
Dusítko je standartně na prostředním pedálu klavíru a tlumí hlasitost nástroje, zároveň však mění jeho barvu. V případě obou analyzovaných exemplářů je táhlo dusítka umístěno po levé straně klaviatury. Akord byl v obou případech zahrán dynamikou forte.

Dusítko klavíru Petrof omezuje spektrum na fundamenty, druhé a třetí harmonické. Nevýhodou je však téměř kompletní potlačení tónu C3 v septakordu, dobře viditelné ve spektrogramu na obr. 5.24a. Rozdíl v hlasitosti je 27,14 dB(SPL).

Vliv dusítka na barvu druhého pianina je výrazně nižší – septima je opět potlačena, ale spektrum je na některých složkách spíše podpořeno. Rozdíl hlasitostí akordu s dusítkem a bez něj je 34,74 dB(SPL), lze tedy konstatovat, že dusítko je v případě exempláře Koch & Korselt efektivnější v tlumení nástroje a v minimální změně jeho barvy.

5.5.3 Skladba Ballade

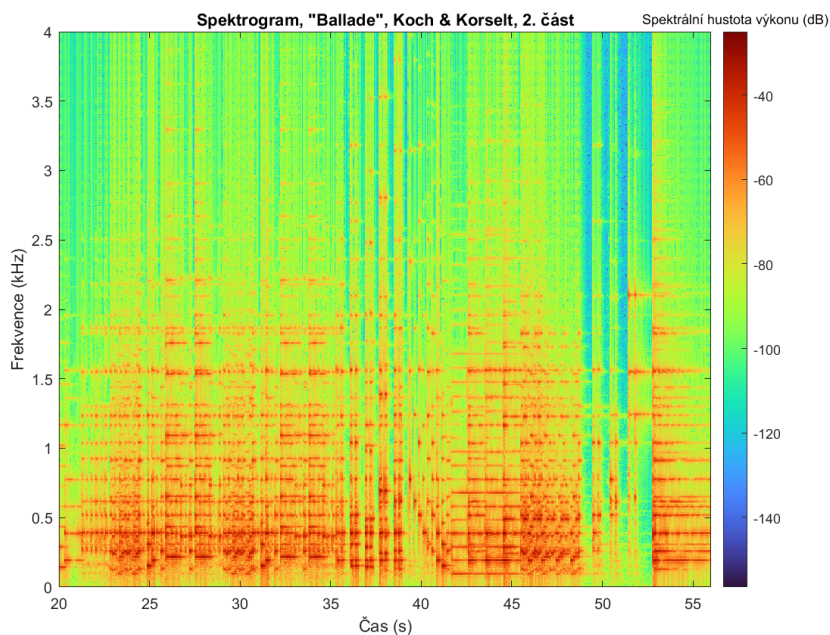
Srovnání kompletní skladby potvrzuje poznatky z předchozích kapitol, a to užší spektrum, temnější a tlumenější barvu zejména v basech. Přechody (jako např. v čase



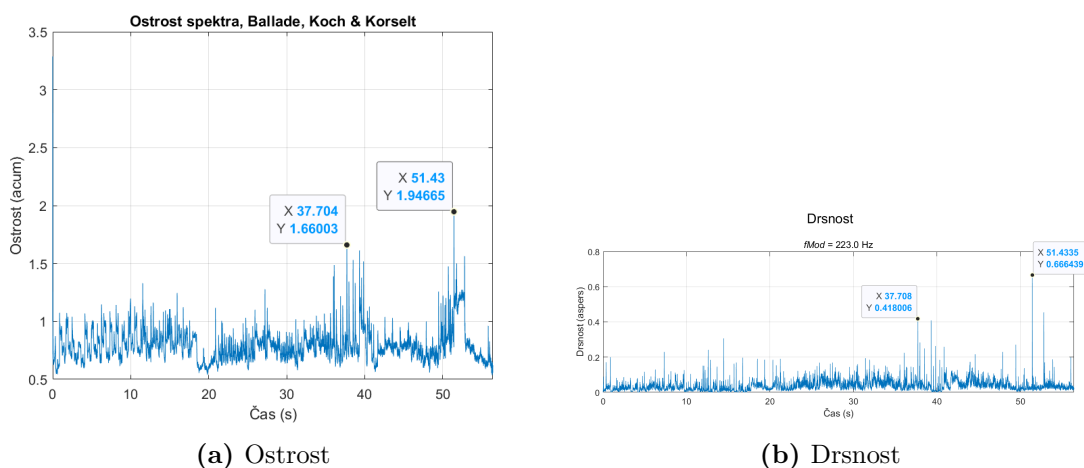
Obr. 5.25: Spektrogram, Ballade, 1. část, Koch & Korselt

11,8 s) jsou díky omezenému počtu transientních složek jemnější a plynulejší. V druhé části skladby jsou basy opět spojenější v blendu barvy. Úbytek harmonických je strmější, a to jednak kvůli jejich nižšímu počtu a výkonu a také z důvodu nižšího dynamického rozsahu exempláře Koch & Korselt. Frekvence tónů nástroje neodpovídají přesně temperovanému ladění – mírné rozladění způsobuje střet barev tónů na blízkých kmitočtech vyšších harmonických (oktávy se nesčítají přesně na jednom kmitočtu). Definice složek v basovém pásmu diminuenda je nižší, barva je ucelená, ale klesá čitelnost barev melodické linky a doprovodu (maskování). Napříč celou skladbou jsou slyšitelné mechanické zvuky klavírní mechaniky, jevící se je jako cvakání či klikání.

Zastřenější a temnější zvuk tohoto klavíru potvrzují i nižší průměrné hodnoty ostrosti a drsnosti spektra. Ostrost nepřesahuje hodnotu 2 acum a modulační frekvence drsnosti je vyšší, tzn. je méně výrazná ve sluchovém vjemu.



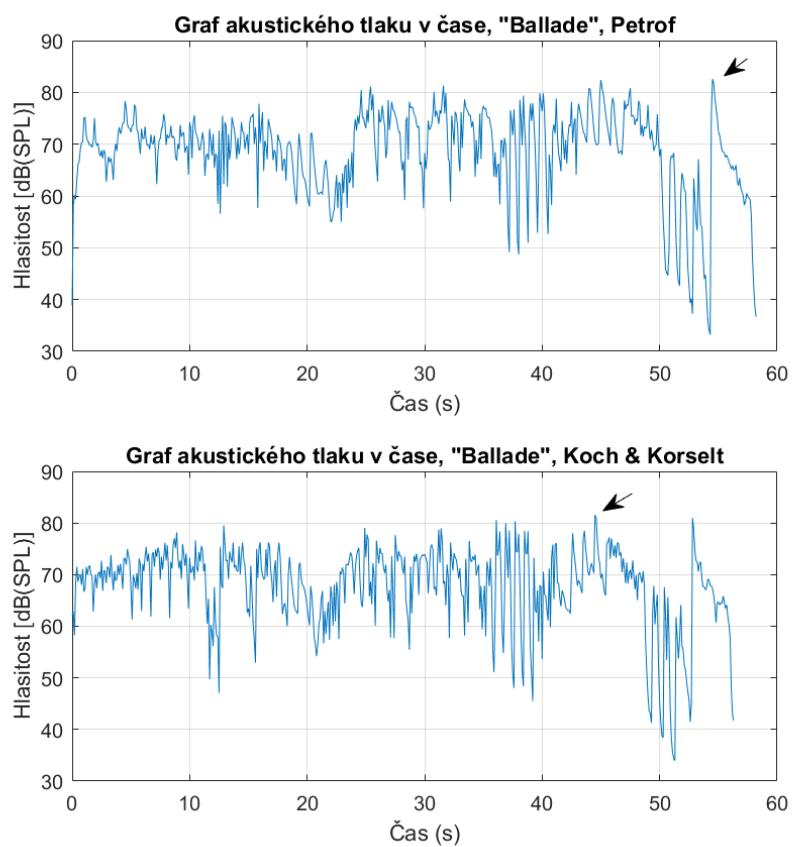
Obr. 5.26: Spektrogram, Ballade, 2. část, Koch & Korselt



Obr. 5.27: Grafy ostrosti a drsnosti, skladba Ballade, Koch & Korselt

5.6 Srovnání hlasitosti pianin

Křivky hlasitosti skladby „Ballade“ na obou exemplářích jsou převážně shodné, protože konstrukce a rozměry obou klavírů se od sebe liší v minimální míře. Odlišnosti v průběhu jsou například v 12 s a 25 s skladby, ale z hlediska kvalit nástrojů je možné oba exempláře považovat za ekvivalentní. Rozdíl maximální špičky (vyznačené v grafu) ve skladbě je pouhý 1 dB(SPL).



Obr. 5.28: Spektrogram, Ballade, 2. část, Koch & Korselt

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala spektrální analýzou tří historických klavírů, konkrétně koncertního křídla Fridrich Ehrbar, pianina Petrof a pianina Koch & Korselt.

V první kapitole teoretické části byla rozebrána konstrukce klavíru a části, které se mohou podílet na charakteristice tónu nástroje. Další kapitola zdokumentovala analyzované exempláře a některé z jejich technických parametrů. Třetí kapitola popisovala definice a vysvětlení použitých metod a nástrojů, uvedených v úvodu, včetně rozboru vlastností hudebního tónu a psychoakustických vlivů. Postup měření klavírů pro získání jejich vzorků a použité vybavení včetně kalibrovaných mikrofonů vysvětlila kapitola čtvrtá. Analýza ve finální páté kapitole odhalila několik významných rozdílů v tónu a spektrálních vlastnostech těchto nástrojů.

Koncertní křídlo Fridrich Ehrbar, používané Leošem Janáčkem, se vyznačuje širokým dynamickým rozsahem ve všech oktávách, i přes absenci vzorků obou extrémních dynamik, a bohatým spektrálním obsahem, zejména v basových tónech. Analýza tónu subkontra B ukázala, že tento tón nepostrádá harmonické v žádném z frekvenčních pásem (až na extrémní výšky), což přispívá k jeho bohaté a plné barvě. Ve vyšších oktávách bylo pozorováno chudší a užší spektrum s menším počtem harmonických složek. Kolísavost (AM) harmonických byla u tónů křídla výrazná, fundament byl v nižších polohách často potlačen vůči druhé harmonické. Dynamický rozsah mezi dynamikou piano a forte se lišil podle výšky tónu, přičemž největší rozsah byl zjištěn v první a čtvrté oktávě.

Při analýze skladeb z cyklu „Po zarostlém chodníčku“ byly barevné charakteristiky uvedeny do kontextu jednotlivých pasáží. Dle dynamiky melodie v pravé ruce buď vystupovala, nebo se míchala do celkového barevného profilu klavíru. Spektrální těžiště se pohybovalo kolem 500 Hz, naznačující vysoký podíl středních frekvencí a snižující celkovou ostrost klavíru. Šikmost spektra ukazovala na nesymetrii rozložení, tedy přítomnost vyšších harmonických složek a jejich vliv na těžiště. Nutno zmínit, že způsob interpretace a volba tempa i dynamiky Janáčkových sčasovek přímo ovlivňují i výsledky spektrální analýzy. Hra na tento klavír vyžaduje také určitou technickou zdatnost z důvodu přítomnosti vídeňské mechaniky a následná pomalejší reakce kladívek na vstup klavíristy.

Pianino Petrof mělo ostřejší a jasnější zvuk ve středních a vyšších polohách, jak oproti křídlu Ehrbar, tak oproti konstrukčně podobnému pianinu Koch & Korselt. Analýza tónů g, E1 a G2 ukázala výrazné harmonické složky, u tónu g zejména třetí, pátou a sedmou, které obohacují barvu a dodávají zvuku brilanci a pronikavost. Exemplář Petrof byl ze všech analyzovaných klavírů nejostřejší a také nejdrsnější. Při hraní akordů A dur a D7 v dynamice forte a pianissimo vykazovalo pianino Petrof obecně širší spektrum a větší dynamický rozsah ve srovnání s pia-

ninem Koch & Korselt, které má temnější, zastřenější a tlumenější zvuk, s užším spektrem a nižším obsahem vyšších harmonických. Analýza tónů g, E1 a G2 zde ukázala menší počet harmonických složek, které zanikaly rychleji ve srovnání s pianinem Petrof. V akordech i ve skladbě byla patrná nižší ostrost a drsnost spektra, což vedlo k jemnějšímu a méně pronikavému zvuku. Piano Koch & Korselt bylo efektivnější při tlumení pomocí dusítka, s menší změnou barvy zvuku oproti pianinu Petrof. Dynamický rozsah byl rovněž nižší, což přispělo k celkově měkčímu, ale subjektivně méně zajímavému zvuku.

Dle předpokladu se u všech klavírů inharmonicity (transientní, šumové složky) nacházely v počáteční perkusivní fázi tónu a jejich výkon rapidně klesal, jejich vliv je tedy podstatný pouze do 0,25 až 0,5 sekundy po úderu kladívka. Všechny klavíry byly také v naprosté většině případů vysoce tonální, protože hodnoty spektrální plochosti nepřesahovaly pár setin.

Shrnutím práce lze obecně stanovit nejdůležitější parametry spektra, které ovlivňují výsledný vjem barvy a charakteru nástroje: šířka spektra, počet harmonických, zda dominují sudé či liché, jejich interakce v harmonii, jednotlivé výkony harmonických, jejich chování v čase a podíl inharmonických složek. S ohledem na příspěvky harmonických prvního pásma lze stanovit celkový tónbr a opakující se vzorce – konkrétní projev amplitudové modulace každé složky vůči fundamentu měl vliv na vychýlení spektrálního centroidu, šikmost spektra a výsledný poslechový vjem, jako dutost, nazalita, jasnost či temnost a mohutnost. Interpretací výsledků a jejich srovnání s jinými akademickými pracemi lze zdůraznit nejčastěji vnímané vjemy barvy – dutost/tupost, brilantnost/jasnost a s ní spojená ostrost. [22]

Jak už bylo zmíněno v teoretickém úvodu, rozdíly v barvě historických klavírů mohou způsobovat kombinace různorodých faktorů. Počínaje materiály a tloušťkou ozvučné desky, rámu, strun, jejich opletení, až po materiál a tvrdost kladívek, místo jejich úhozu na struně, kvalitu ladění klavírů a klimatické podmínky klavírní místnosti. Největšími faktory ovlivňující spektrální obálku a výslednou barvu exemplářů v této práci jsou velikost nástroje, materiál a provedení kladívek, kobylky a ozvučné desky, kvalita ladění strun a v neposlední řadě celá skříň klavíru. [21] Nelze přímo a objektivně srovnávat křídla a pianina, protože prosté rozměry křídla jej zvýhodňují ve frekvenčních rezonancích a v dynamickém rozsahu.

Práce přinesla poznatky o akustických a barevných vlastnostech historických klavírů, které by mohly být využity v oblasti hudební akustiky, restaurování historických nástrojů a interpretace historické hudby. Detaily spektrální analýzy poskytly hlubší vhled do charakteristik těchto nástrojů, což může být přínosné pro hudebníky a audio inženýry zabývající se historickými i novodobými hudebními nástroji. Nepřesnosti a zkreslení v měření mohou zahrnovat nahrávky vzorků mimo bezodrazovou komoru (v místnostech s dozvukem) a replikovatelnost interpretace a dyna-

miky tónů, souzvuků a skladeb napříč nástroji. Poslech vzorků může být do určité míry zkreslen použitými sluchátky.

Literatura

- [1] FLETCHER, Neville H. and ROSSING, Thomas D. *The Physics of Musical Instruments*. 2nd ed. New York: Springer, 1998. ISBN 0-387-98374-0.
- [2] KOENIG, David M. a FANDRICH, Delwin D. *Spectral Analysis of Musical Sounds with Emphasis on the Piano*. Oxford: Oxford University Press, 2015. ISBN 978-0-19-872290-8.
- [3] OLSON, Harry F. *Music, Physics and Engineering*. Second Edition. New York: Dover Publications, 1967. ISBN 978-0-486-21769-7.
- [4] ŠINDLÁŘOVÁ, Simona a SELUCKÁ, Alena (ed.). *Klavír Leoše Janáčka – Průzkum prostředí a restaurování*. Online. In: Forum pro konzervátory-restaurátory. 10. Brno: Technické muzeum v Brně, 2020, s. 25-27. ISBN 1805-0050. ISSN 2571-4384. Dostupné z: <https://mck.technicalmuseum.cz/wp-content/uploads/2020/07/Klav%C3%ADr-Leo%C5%A1e-Jan%C3%A1%C4%8Dka-%E2%80%93-pr%C5%AFzkum-prost%C5%99ed%C3%AD.pdf>. [cit. 2024-04-12].
- [5] STEINMETZ, Karel. *Janáčkovy hudebně-teoretické názory na sčasování a jejich prolínání do procesu skladatelovy kompoziční praxe*. Online. Hudební věda. 2020, roč. 2020, č. 3, s. 4-5. ISSN 2694-6998. Dostupné z: https://hudebniveda.cz/2020/03/Steinmetz_3.pdf. [cit. 2024-05-15].
- [6] ČESKÝ KLAVÍRNICKÝ SVAZ. *Co je to anglická a vídeňská mechanika?*. Online. Český klavírnický svaz. 2018. Dostupné z: <http://www.ceskyklavirnickysvaz.cz/faq/co-je-to-anglicka-a-videnska-mechanika/>. [cit. 2024-04-26].
- [7] PIANOPORTAL.CZ. *PETROF*. Online. Dostupné z: <https://pianoportal.cz/index.php/katalogy/petrof/>. [cit. 2024-05-14].
- [8] PIANOPORTAL.CZ. *KOCH & KORSELT*. Online. Dostupné z: <https://pianoportal.cz/index.php/katalogy/koch-a-korselt/>. [cit. 2024-05-14].
- [9] ZEMÁNKOVÁ, Šárka. *Rozpoznávání hudebního žánru za pomoci technik Music Information Retrieval*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. Tomáš Kiska.

- [10] SMITH, Julius O. *Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT)* J.O. Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT) with Audio Applications, Second Edition, online, edice 2007, [cit. 2023-11-05]. Dostupné z: <http://ccrma.stanford.edu/~jos/mdft/>.
- [11] ROSSI, L. a GIROLAMI, G. *Instantaneous frequency and short term Fourier transforms: Application to piano sounds*. Online. The Journal of the Acoustical Society of America. 2001, roč. 110, č. 5, s. 2412-2420. ISSN 0001-4966. Dostupné z: <https://doi.org/10.1121/1.1409372>. [cit. 2024-05-20].
- [12] FASTL, H. a ZWICKER, Eberhard. *Psychoacoustics: facts and models*. 3rd ed. Berlin: Springer, c2007. ISBN 978-3-540-23159-2.
- [13] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Dynamic range (of a sound signal)*. Online. 1997. Dostupné z: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=723-03-11>. [cit. 2024-05-11].
- [14] JIRÁSEK, Ondřej. *Harmonické i neharmonické barvy a šumy*. Opus Musicum. 2022, roč. 54, č. 1, s. 50-62. ISSN 0862-8505. [cit. 2024-05-09].
- [15] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. ISBN 978-80-7331-297-8.
- [16] FISHER AUDIO VISUAL. *AKG SE300B CK91 Microphone Datasheet*. Online. Fisher Audio Visual. Dostupné z: <https://www.fisheraudiovisual.com/equipment/akg-se300b-microphone/>. [cit. 2024-05-11].
- [17] AALBORG UNIVERSITET. *MM 1 - measurement microphone datasheet*. Online. Aalborg Universitet. Dostupné z: https://doc.es.aau.dk/fileadmin/doc.kom.aau.dk/labs_facillities/acoustics/man/t_bone-mm-1_measurement-mic.pdf. [cit. 2024-05-11].
- [18] JANÁČEK, Leoš. *Po zarostlém chodníčku*. Praha: Bärenreiter Praha. ISBN 979-0-2601-0461-7.
- [19] ZAHŘÁDKA, Jiří. *Janáček, Leoš*. Online. ÚSTAV HUDEBNÍ VĚDY, MASARYKOVA UNIVERZITA. Český hudební slovník osob a institucí. 2009. Dostupné z: https://slovník.ceskyhudebnislovník.cz/index.php?option=com_mdictionary&task=record.record_detail&id=2192. [cit. 2024-05-15].

- [20] LANDKAMMEROVÁ, Veronika. *Klavírní dílo Leoše Janáčka a možnosti jeho interpretace*. Online, Bakalářská práce. Praha: Univerzita Karlova, 2013. Dostupné také z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/58672/BPTX_2011_2_11410_0_319946_0_123510.pdf.
- [21] GALEMBO, Alexander; ASKENFELT, Anders; CUDDY, Lola L. a RUSSO, Frank A. *Perceptual relevance of inharmonicity and spectral envelope in the piano bass range*. Online. Acta Acustica united with Acustica. 2002, roč. 2004, č. 90, s. 11-14. ISSN 2681-4617. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/225284530_Perceptual_relevance_of_inharmonicity_and_spectral_envelope_in_the_piano_bass_range. [cit. 2024-05-20].
- [22] GHERGHINOIU, Cosmin; BESNAINOU, Charles a CASTELLENGO, Michèle. *Comparative Study made on Piano Timbre Perception*. Online. ForumAcusticum. 2005, roč. 2005, s. 589-590. ISSN 2221-3767. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/236108041_Comparative_Study_made_on_Piano_Timbre_Perception. [cit. 2024-05-20].

Seznam symbolů a zkratek

AudioIn vstupní vzorky zvukového signálu v podobě matice prostředí MATLAB

DTFT Discrete Time Fourier Transform, diskrétní Fourierova transformace

f forte, silně

ff fortissimo, velmi silně

FFT Fast Fourier Transform, rychlá Fourierova transformace

fs proměnná vzorkovacího kmitočtu prostředí MATLAB

pp pianissimo, velmi slabě

p piano, slabě

STFT Short Time Fourier Transform, krátkodobá Fourierova transformace

A Přílohy

A.1 Elektronická příloha

```
Prilohy.zip
├── MATLAB_kod
│   ├── dynamicky_rozsah.m
│   ├── RMS_hlasitost_subplots.m
│   ├── spektralni_parametry.m
│   └── spektrogram.m
├── obrazky_klaviry_technika
│   ├── Ehrbar_c.jpg
│   ├── koch_setup.jpg
│   ├── rekoder.jpg
│   └── struny_Ehrbar.jpg
└── pdf
    ├── andante.pdf
    ├── Burgmuller_Ballade_Op_100_No._15.pdf
    ├── frekvence_fundamentu.pdf
    ├── nase_vecery.pdf
    └── nelze_domluvit.pdf
```