

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2018

Tomáš Peloušek



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 A SROVNÁNÍ SPEKTER U RŮZNÝCH MODELŮ KLAVÍRŮ

ANALYSIS AND COMPARISON OF SPECTRA IN DIFFERENT PIANO MODELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Peloušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Tomáš Peloušek

ID: 186158

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Analýza a srovnání spekter u různých modelů klavírů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte porovnání teoretických hodnot vypočítaných při vývoji klavíru - jakost oscilátorů a excitátorů a jejich vztah - s reálně naměřenými. Sesbírejte a vyhodnoťte údaje vývojového oddělení klavírní firmy, podle kterých predikovala barvu různých typů křídel: jakost strun a jejich napětí, místo (uzly či kmitny), kam udeří kladívka, tvrdost a měkkost kladívek, plocha, kterou se strun dotýkají ad. Poté změřte reálná spektra nejméně dvou různých modelů. Vyhodnoťte, rozdíly mezi nimi – po oktávách a v různé dynamice. Pro analýzu vytvořte vlastní nástroje v prostředí MATLAB nebo jiném.

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.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 29.5.2018

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

Konzultant:

prof. 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

Práce se zaměřuje na problematiku analýzy časově proměnného spektra klavíru. V úvodu pojednává o postupném vývoji klavíru se zaměřením na konstrukci a zvukovou barvu a podrobně rozebírá vliv jednotlivých částí nástroje na zvukovou barvu. Následující část se zaměřuje zejména na téma spektrální analýzy v hudebním pojetí zvukové barvy. V další části je popsán průběh měření konkrétních hudebních nástrojů u výrobce v bezodrazové komoře. Následují použité metody a výpočty a v závěru práce komentuje výsledky analýzy souboru získaných vzorků.

KLÍČOVÁ SLOVA

amplitudová obálka, kladívka, klavír, konstrukce klavíru, spektrální analýza, spektrální centroid, cumulative line spectrum

ABSTRACT

This work focuses on the topic of analysis of the time varying spectrum of the piano. The introduction deals with the historical development of the piano, of its individual parts and the way they influence the tone colour. The subsequent theoretical part is focused mainly on the topic of spectral analysis in the musical concept of sound colours. In the following part a measuring of particular musical instruments is described, these experiments being conducted in an anechoic chamber provided by the instrument producer. It also lists the various methods and calculations used in the process and the conclusion presents analysis of acquired samples.

KEYWORDS

amplitude envelope, piano, piano construction, piano hammer, spectral analysis, spectral centroid, cumulative line spectrum

PELOUŠEK, Tomáš. *Analýza a srovnání spekter u různých modelů klavírů*. Brno, 2018, 60 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Analýza a srovnání spekter u různých modelů klavírů“ jsem vypracoval(a) 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(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) 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(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Tadeáši Doskočilovi za konzultace a asistenci při měření, firmě Petrof, spol. s r.o. za poskytnutí prostor a měřených nástrojů, doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za zapůjčení měřicího mikrofону, a všem členům své rodiny za jazykové a stylistické korektury.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	9
1 Piano	10
1.1 Klíčové vývojové změny konstrukce klavíru	11
1.1.1 Vývoj klavírové mechaniky	11
1.1.2 Křížový strunový potah	13
1.1.3 Litinový rám	14
2 Moderní nástroje a jejich konstrukce	15
2.1 Rezonanční deska	15
2.2 Kobylka	16
2.3 Strunový potah	17
2.4 Kladívka	17
2.5 Mechanika	18
3 Princip tvorby tónu a aspekty ovlivňující jeho kvalitu	20
3.1 Excitátor	20
3.2 Oscilátor	21
3.2.1 Inharmonicita	24
3.2.2 Phantom partials	25
3.3 Rezonátor	26
4 Barva tónu	29
4.1 Souvislost vnímání zvukové barvy s podobou spektra	29
4.2 Psychoakustické veličiny	30
4.2.1 Hlasitost	31
4.2.2 Ostrost	31
4.2.3 Drsnost	31
4.2.4 Shrnutí	32
5 Metody Analýzy spektra zvukového signálu	33
5.1 Základní charakteristika signálů a jejich dělení	33
5.2 Harmonická analýza	33
5.3 Různé způsoby grafické interpretace spektra	34
5.3.1 Modulová frekvenční charakteristika	34

5.3.2	Cumulative line spectrum	34
5.3.3	Spektrální centroid	37
5.3.4	Spektrogram	37
6	Měření	39
6.1	Popis způsobu získávání vzorků	39
6.1.1	Metodika a použitá technika při prvním měření	39
6.1.2	Technika použitá při druhém měření	40
6.2	Měřené nástroje	41
6.2.1	Antonín Petrof	41
6.2.2	Mistrál	42
7	Vyhodnocení měření	44
7.1	Parametry strunového potahu	44
7.2	Průběh dynamické obálky a doba doznění	46
7.3	Maximální výkon signálu	49
7.4	Výsledky spektrální analýzy	51
7.4.1	Spektrální centroid	51
7.4.2	Matice CLS	53
8	Závěr	56
	Literatura	58
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Klavír [1]	10
1.2	Pianino [1]	11
1.3	Vídeňská klavírní mechanika - vymršťovací [1]	11
1.4	Anglická klavírní mechanika - nárazová [1]	12
3.1	Princip šíření vlnění po úderu kladívka na strunu [2]	23
3.2	Ukázka spektra tónu obsahujícího phantom partials	25
5.1	Modulová frekvenční charakteristika tónu a^1	35
5.2	Modulová frekvenční charakteristika tónu A^2	35
5.3	CLS tónu c^1 při hře	36
5.4	CLS tónů malé oktávy při hře mf	36
5.5	Porovnání hodnot spektrálních centroidů tónů malé oktávy při různé dynamice s frekvencí fundamentu	37
5.6	Spektrogram tónu A^1 při hře mf	38
6.1	Uživatelské rozhraní VST pluginu ReaFir	41
7.1	Porovnání menzurační délky strun	45
7.2	mf	45
7.3	Porovnání průměru kolmého průřezu strunou	46
7.4	Ilustrační graf průběhu dynamické obálky tónu klavíru	46
7.5	Matice dynamických obálek tónů Ant	47
7.6	Matice dynamických obálek tónů Mist	48
7.7	Maximální výkon Ant v závislosti na dynamice hry	49
7.8	Maximální výkon Mist v závislosti na dynamice hry	50
7.9	SpC – f_0 pro různé dynamické úrovně u Ant	51
7.10	SpC – f_0 pro různé dynamické úrovně u Mist	52
7.11	Rozdíl hodnot SpC obou nástrojů po normalizaci hlasitosti vzorků	53
7.12	Matice CLS při hře mf u Ant	54
7.13	Matice CLS při hře mf u Mist	55

ÚVOD

Tato práce se zabývá analýzou časově proměnného spektra klavíru v souvislosti s konstrukčním řešením a nároky, které jsou na něj kladeny stran reálného užívání při hře.

V úvodu práce obecně popisuje základní charakteristiky nástroje a dotýká se témat jeho vzniku a vývoje klíčových konstrukčních elementů.

V kapitole moderní nástroje a jejich konstrukce pak charakterizuje běžnou podobu a vlastnosti dnešního moderního nástroje a zabývá se teoretickým rozbor výroby a konstrukce součástí nástroje, které mají vliv na výsledný zvuk nástroje a snaží se hledat souvislosti mezi výsledným zvukem nástroje a různými aspekty výrobního postupu.

Dále v kapitole 3 Princip tvorby tónu a aspekty ovlivňující jeho kvalitu jsou detailněji rozebrány akustické vlastnosti nástroje a jejich souvislosti s konstrukcí a v kapitole 5.3 pak práce představuje různé způsoby grafické interpretace spektra a možnosti jejich využití pro spektrální analýzu.

V závěru komentuje výsledky analýzy souboru vzorků získaných měření nástrojů v bezodrazové komoře.

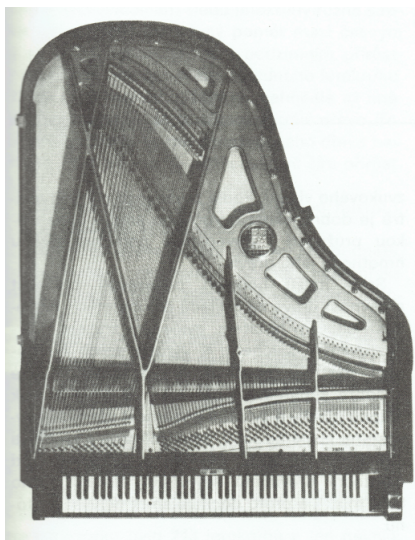
1 PIANO

Dle Sachs-Hornbostelovy klasifikace hudebních nástrojů, jakožto dnes nejpoužívanějšího systému pro klasifikaci hudebních nástrojů, můžeme piano zařadit do kategorie jednoduchých chordofonů (nástrojů strunných) a dále na základě principu vytváření zvuku do podkategorie nástrojů klávesových (do stejné skupiny patří například různé odrůdy cembala, clavinet, klavichord, ale například i niněra aj.). [3] Z hlediska vyluzovaného tónu můžeme o pianu mluvit jako o nástroji s perkusivním charakterem tónu.

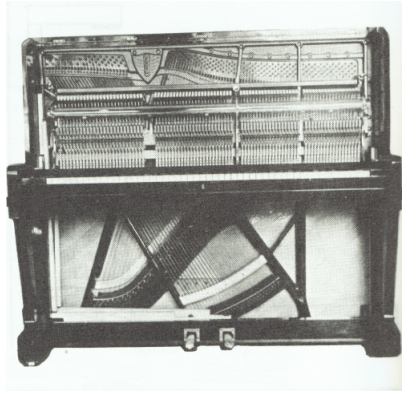
Vznik pianu jako takového se datuje do roku 1709, kdy florentský stavitel cembal Bartolomeo Cristofori sestrojil nástroj, který nazval „pianoforte“ vzhledem k jeho schopnosti hrát tóny v různé dynamice. Tato vlastnost, jak se později ukázalo, byla nesmírně přínosná pro interpretaci hudby, a proto také později piano téměř zcela vytlačilo své předchůdce, kteří touto vlastností nedisponovali.[1]

Vývoj pianu prošel několika klíčovými fázemi souvisejícími především s postupným vylepšováním mechanismu ovládajícího úder kladívka, tzv. mechaniky, a také některými klíčovými konstrukčními změnami (podrobněji v dalších kapitolách).[1]

Piano, jak ho známe dnes, se standardně vyrábí ve dvou základních podobách – s horizontálním uspořádáním strun (klavír, obr. 1.1) a vertikálním uspořádáním strun (pianino, obr. 1.2). Tato práce se vzhledem k povaze zadání dále bude zabývat pouze tematikou klavírů.



Obr. 1.1: Klavír [1]



Obr. 1.2: Pianino [1]

1.1 Klíčové vývojové změny konstrukce klavíru

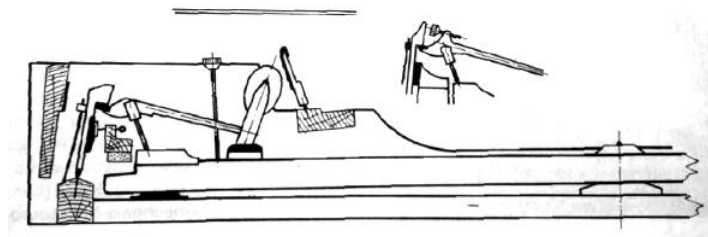
V dalších několika podkapitolách se tato práce bude zabývat klíčovými změnami v průběhu vývoje konstrukce klavírů, které jsou nutné pro pochopení souvislostí konstrukčního řešení a tvorby tónu.

1.1.1 Vývoj klavírové mechaniky

Na počátku vývoje klavíru nebyly vzácné značně rozdílné přístupy k řešení problematiky klavírní mechaniky. Během vývoje se ustálily dva odlišné typy mechanik, a to mechanika vymršťovací zvaná také vídeňská a mechanika nárazová označovaná jako anglická. Při výrobě dnešních moderních nástrojů se používají pouze mechaniky anglického typu.

Vídeňská mechanika

Detailní popis souhry všech součástí mechaniky v souvislosti s obr. 1.3 uvádí [1].



Obr. 1.3: Vídeňská klavírní mechanika - vymršťovací [1]

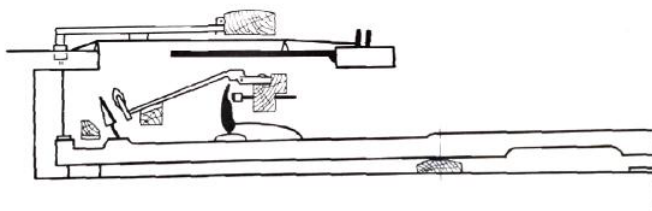
„Funkce vídeňské mechaniky spočívá v nadzdvížení zadní části klávesy opatřené regulovatelnou mosaznou vidlicí. Násadka kladívka byla spojena s vidlicí pomocí ocelové osičky, která se v lůžkách vidlice citlivě otáčela. Prodloužený konec násadky

tvaru zobáčku byl obložen tuhou jelení kůží. Horní plocha okoženého zobáčku se při stlačování kláves hráčem opřela o spodní plochu vypouštěče a nutila kladívko upevněné na opačném konci násadky stoupat ke strunám. Vypouštěč opatřený pergamenovou vložkou pevně sevřenou ve dvou sklížených lištách doplněný pružinkou byl vlivem pružinky stále přitlačován směrem k ložisku násadky. Regulovatelnou zarážkou byla vymezena poloha vypouštěče tak, aby při vystoupení kladívka ke strunám na vzdálenost 2 mm nastalo vychýlení vypouštěče směrem od osičky kladívka dozadu. Tím došlo k vysmeknutí okoženého zobáčku násadky a odpadnutí kladívka od strun. Kladívko bylo chytačem zachyceno ve vzdálenost 25mm od strun. Zachycením kladívka chytačem vznikla mezi okoženým koncem zobáčku násadky a spodní plochou vypouštěče výhodná poloha pro opakování úderu kladívka, tj. pro nutné a rychlé zasunutí okoženého zobáčku násadky pod vypouštěč. Při stoupání zadní části klávesy nahoru nadzdvihl zdvihač dusítko, spočívající na strunách.“ [1]

Výhodou vídeňské mechaniky oproti tehdejší anglické byla trvanlivost její regulace i funkce, a to při provozu ve vlhkém prostředí a také lehkost jejího chodu umožňující rychlou hru. (Tento fakt můžeme pozorovat např. při zkoumání tempo- vých předpisů Czerného klavírních etud, u kterých se předpokládala interpretace na vídeňské mechanice, jež často obsahují předepsané tempo, které je téměř nemožné provést i na moderních klavírech s anglickou mechanikou).

Anglická mechanika

Klavíry s tzv. anglickou mechanikou navazují principem úhozu přímo na mechaniku Cristoforiho. Ta byla zdokonalována hlavně anglickými staviteli klavírů (odtud označení anglická). Mezi nimi vynikali Bachers a Stodart, kteří kolem r. 1777 vytvořili systém, který se ve své době stal standardem pro tento druh mechaniky (obr. 1.4). [1]



Obr. 1.4: Anglická klavírní mechanika - nárazová [1]

„... nárazový jazyk – trkač při stisknutí klávesy stoupal vzhůru a opřel se temenem v hlavovém kloubku násadky doplněné na svém konci kladívkem. Násadka byla spojena osičkou s vidlicí dřevěné spojky a vykonávala otáčivý pohyb. Byla tak schopna uplatnit vlivem užitého druhu kladívka jeho upotřebitelný úder na struny. Jakmile se

kladívko přiblížilo ke strunám na vzdálenost 2 mm, postavila se nárazovému jazyku do cesty regulovatelná zarážka, která při pokračujícím pohybu mechaniky uvolnila jazyk z hlavového kloubku, a kladívko dokončilo úder na struny svojí setrvačností.“
[1]

Klavíry vybavené anglickou mechanikou umožňovaly větší dynamický rozsah hry a také umožňovaly udeření struny kladívkem větší silou. Klavír tak hrál hlasitěji a umožňoval výrazově bohatší interpretaci, což vyhovovalo z autorů té doby např. požadavkům Beethovenovým (obzvláště pro jeho klavírní sonáty z pozdního období tvorby) a představitelům postupně se rodícího hudebního romantismu. Dále se anglická mechanika vyznačovala použitím odolnějších a trvanlivějších dílů. [1]

Repetiční mechanika

Dalším klíčovým vylepšením klavírové mechaniky byl vynález tzv. repetiční mechaniky. S tímto vylepšením jako první přišel S. Érard, pařížský výrobce harf a klavírů, a následně ho roku 1840 korigoval a účelně zjednodušil Henry Herz. Vznikla tak anglická repetiční mechanika Herz–Érardova zvaná také dvojrepetiční. Toto technické vylepšení umožňovalo rychlejší opakování stejného tónu. U starších mechanik (stejně jako je tomu u dnešních pianin) bylo nutné, aby se klávesa vrátila téměř až do své výchozí vodorovné polohy, než byla opět připravena vynést kladívko ke strunám, což značně prodlužovalo dobu mezi opakovanými tóny. Toto omezení bylo odstraněno pomocí drobného dílku s pružinkou, takzvaného opakovacího podavače. Ten umožňoval, aby při snížení tlaku hráče na klávesu (při zdvihání prstu) byla násadka s kladívkem pomocí síly pružinky vyzdvižena blíže ke strunám a v této poloze mohl již jazýček zapadnout pod bubínek a klávesa byla připravena pro opakovaný úder.[1]

Základní princip tohoto technického řešení se užívá pro konstrukci klavírových mechanik dodnes.

1.1.2 Křížový strunový potah

Od počátku výroby klavírů, stejně jako tomu bylo u jejich předchůdců, se používalo vedení strun rovnoběžně s klávesami. Hlavním problémem tzv. rovnostrunného strunového potahu je umístění okrajových strun (zejména pak v basové poloze) k okraji rezonanční desky. Ta při okrajích, kde je částečně uchycená, nemůže tolik kmitat, a proto se při použití pouze jedné kobylinky pro všechny struny kmitání strun umístěných při okraji kobylinky přenáší hůře. Vzniká tak nevyrovnanost způsobující výrazné odlišení rejstříků nástroje.

Řešením se ukázalo býti použití zvláštní kobylinky pro umístění basových strun, která je umístěna blíže středu rezonanční desky, a tak výrazně lépe na rezonanční desku přenáší energii kmitů strun. Struny jsou tak při této konfiguraci umístěny

šikmo přes sebe, a proto toto uspořádání nese název křížový strunový potah. Aby se křížící se struny nenacházely ve stejné výšce nad rezonanční deskou, je basová kobylka vypodložena. [1]

Toto technické řešení umožňuje také použití delších strun při zachování stejné délky nástroje oproti rovnostrunnému uspořádání.

1.1.3 Litinový rám

Z počátku byla kostra nástroje vyráběna pouze ze dřeva, což se začalo ukazovat jako problematické řešení v důsledku zvyšujících se požadavků na akustický výkon nástroje. Postupně obohacovaný strunový potah kladl svým tahem velké nároky na pevnost dřevěné kostry, která tak byla zesilována použitím různých železných konstrukcí. Jako nejlepší řešení se ukázalo použití litinového rámu, který po celém obvodu obepíná rezonanční desku a pomáhá tak nést tah strun. [1]

2 MODERNÍ NÁSTROJE A JEJICH KONSTRUKCE

Dnešní klavíry moderní konstrukce mají (až na drobné výjimky) 88 kláves s tónovým rozsahem od A_2 po c^5 což odpovídá frekvenčnímu rozsahu 27.5 Hz až 4186 Hz při naladění a^1 na 440 Hz. Klavíry se vyrábí v různých délkách v závislosti na předpokládaném použití nástroje (ostatní rozměry nástroje jsou téměř totožné díky použití standardů pro šířku klávesy a výšku umístění klávesnice). U většiny světových výrobců se v nabídce vyskytují modely s délkou okolo 150 cm, 170 cm, 190 cm, 210 cm a 230 cm. Nejdelší klavíry, často nazývané koncertní křídla, se pak nejčastěji vyrábí v délkách od 274 do 290 cm. Základem konstrukce je kostra nástroje (také zvaná baraš). Ta sestává z lamelové stěny a čela kostry, které jsou mezi sebou provázány pomocí několika vzpěr. Dále je pak ke kostře připevněna také opěrná deska nohy. Kostra nástroje se většinou vyrábí z bukového či smrkového dřeva. [1]

2.1 Rezonanční deska

Klíčovým prvkem tvořícím rezonátor klavíru je rezonanční nebo také ozvučná deska. Její primární funkcí je přejímání kmitání struny skrze kobylku, která je k ní připevněna a jeho následné zesílení a vyzáření. Sekundárně pak pomáhá držet tah strunového potahu. Vzhledem k velkému frekvenčnímu rozsahu jsou kladeny vysoké nároky na schopnost spolurezonance desky, která musí být schopna podpořit a rovnoměrně zesílit tóny v rozsahu téměř osmi oktáv.

Toho je dosaženo pečlivým výběrem použitého dřeva a jeho vlastností. Desky se nejčastěji vyrábí z tzv. rezonančního smrku, který se řeže radiálně, aby bylo po připevnění žeber umožněno dostatečné vypnutí desky. Ozvučná deska pak není monolitická, ale je sestavena z mnoha menších prkének. U použitého dřeva je důležité, aby mělo rovnoměrně vzdálené a souběžně narostlé letokruhy. Z materiálových konstant jsou pak významným ukazatelem vhodnosti dřeva hustota, rychlost šíření zvuku ve dřevě a modul pružnosti. Modul pružnosti se sleduje jak při rovnoběžném působení budicí síly s vlákny dřeva, tak i směru při kolmém. Podobně je tomu i u rychlosti šíření zvuku, kde se významně liší rychlosti šíření rovnoběžně s vlákny a kolmo na ně. [1] [8]

Při výběru prkének pro jednotlivé části desky je podle Pracha vhodné také přihlídnout k rozstupům mezi letokruhy a podle toho v jaké části rezonanční desky budou umístěny (zda budou umístěny spíše blízko kobylky nesoucí basové struny či blíže kobylky diskantové).[1]

Mnoho praktických pokusů při hledání vhodné tloušťky rezonanční desky (prováděných vždy s přihlédnutím na obvykle používané parametry strunového potahu) prokázaly, že nejvhodnější je použití desky o tloušťce 9mm s tím, že u nástrojů rozměrově menších je vhodné tloušťku desky v oblasti basové kobyly snížit, aby i struny, které jsou u těchto nástrojů z konstrukčních důvodů méně napnuté (viz kapitola 2.3 Strunový potah), byly schopné desku rozkmitat.

Aby byla rezonanční deska, na kterou bude následně vyvíjen nemalý tlak díky silovému působení strunového potahu, schopna stále rezonovat, je nutné desku vyztužit pomocnými žebry ve směru proti působícímu tahu strun. Počet žebor a jejich konstrukce závisí na délce konkrétního nástroje a parametrech strunového potahu, který žebra pomáhají vzepřít.

Žebra je zvykem na desku připevňovat lepením. Tento proces je velmi choulostivý, a tak veškeré informace stran použitých lepidel a přesných výrobních postupů podléhají důslednému utajení. Klíčovým prvkem je pak vyklenutí žebor v místě, kde jsou připevněny na desku. Toto vyklenutí určuje, jak moc bude deska po spojení s žebry vyklenutá a do jaké míry tak bude již předpružena proti působícím silám strunového potahu. Úroveň vyklenutí se může u jednotlivých žebor lišit a vzhledem k nemalému významu i drobných změn v této oblasti na výsledný zvuk nástroje jsou konkrétní údaje pečlivě chráněny jako výrobní tajemství.

Žebra se umísťují ve směru kolmém na směr dřevních vláken rezonanční desky za účelem vyrovnání podélného a příčného modulu pružnosti desky. [8][15]

2.2 Kobylyka

Kobylyka u klavíru slouží jako prvek na jedné straně ohraničující volně kmitající část struny a současně umožňující přenos energie kmitů strun do rezonanční desky. Kobylyky se u moderních nástrojů dělají dvě: basová a diskantová. Jejich tvar a umístění na desce závisí převážně na parametrech strunového potahu. Kobylyky bývají vyráběny buď z masivu tvrdého dřeva, nebo klížením vrstev z různých druhů dřeva. Zde je však primárním důvodem nárok na pevnost a stálost umístění kobylykových hřebů, pomocí nichž jsou struny ke kobylyce připevněny. Při nedostatečné pevnosti materiálu dochází při napínání strun v průběhu ladění k roztržení kobylykových dřevních vláken, které se poté negativně projevuje na přenosu energie mezi strunou a ozvučnou deskou. [1]

2.3 Strunový potah

Struny u klavíru slouží jako oscilátor, tedy součást nástroje generující zvuk, který je poté zesílen a frekvenčně upraven rezonátorem sestávajícím z rezonanční desky opatřené žebry a kobylkami zasazené do kostry nástroje. Struny jsou tak další nedílnou součástí celého nástroje.

Při návrhu nového nástroje jsou výchozími parametry ovlivňujícími vlastnosti jeho strunového potahu především fyzické rozměry nástroje a limity pevnosti použitých materiálů pro výrobu strun.

U všech pian se používají dva základní druhy strun, a to struny hladké a tzv. opředené. Hladké struny jsou vyrobeny z jednoho ocelového drátu, zatímco struny opředené mají jádro z oceli, které je ovinuto dalším, měděným drátem.

Důležitým rozhodnutím, kterým si musí každý konstruktér hned na začátku procesu návrhu projít, je rozdělení strun na basové a diskantové – tedy které struny umístí na hlavní kobylku a které na basovou. Zde se většinou vychází z již známých rozdělení, u kterých byla praxí ověřena jejich funkčnost v souvislosti s celým konceptem nástroje.

Díky znalosti fyzických rozměrů nástroje a tím i maximální délky strun, rozdělení strun mezi kobylky, přibližného umístění kobytek a znalosti frekvence výsledného tónu každé struny má konstruktér k dispozici dostatek výchozích dat pro výpočet tloušťky struny a potřebného napětí pomocí známých vzorců. (viz. 3.2)

2.4 Kladívka

Kladívka používaná v moderních nástrojích se dnes vyrábí výhradně z plsti. Podle Pracha je pro získání „ušlechtilého a výrazného tónu“ nutné vyrábět kladívka z plstě zhotovené z jemných čistých chlupů, pokud možno stejnorodých. Tradičně se tak používá australská vlna merino, vlna z Konga, kapská vlna a další.

Při výrobě plsti se postupně z jednotlivých chlupů, křížem přes sebe kladených při protichůdných pohybech zplstovacího stroje za přispění vhodné teploty a vlhkosti, stane souvislá vrstva jednolitého materiálu. Je důležité, aby se mechanickým zpracováním chlupů dosáhlo vytvoření materiálu mimořádně pružného a soudržného. Při neustálém opakovaném kontaktu s ocelovými strunami se u nekvalitní plsti s malou soudržností materiálu může plstěný obal uprostřed temene kladívka rozestoupit, a tím znehodnotit zvuk nástroje. Tyto případy jsou dnes však již ojedinělé neboť pianová kladívka dnes vyrábějí téměř výhradně specializovaní výrobci znalí svého řemesla.

Parametr pro určení míry zplstění běžně používaný výrobci je měrná hmotnost plsti. I tato veličina má výchozí hodnoty stanovené normou, kterou musí výrobci

plsti dodržovat. [1]

Kladívko kromě plsti sestává i z dřevěného jádra, které je plstí obklopeno a pomocí kterého se kladívko připevňuje na násadku mechaniky. Dřevěná jádra se většinou vyrábí z dřeva ořechu či z javoru.(6) (7) Pás plsti upravený na požadované rozměry se pomocí speciálního lisu namodeluje okolo dřevěných jader kladívek do výsledného tvaru a přilepí se. Takto je vždy vyrobena celá sada kladívek. Tento postup se používá za účelem zaručení co největší homogennosti použité plsti. Plst se při formování napíná okolo temene kladívkového jádra a dochází v ní tak k dalšímu stlačování a napínání a ještě více se tak zvyšuje její pružnost a tuhost.(1)

Přestože se plst k jádru připevňuje lepením, je zvykem ji ještě na konci přichytit svorkami z obou stran (dříve se kvůli používání kožního klihu jako lepidla plst na okrajích kladívka na krajích vlivem vlhkosti často odlepovala).[1]

Mezi největší výrobce pianových kladívek v současnosti patří německé firmy Renner a Abel, jejichž kladívka dnes využívají téměř všichni světoví výrobci klavírů a pianin.

2.5 Mechanika

Klavírové mechaniky používané u moderních nástrojů dodnes vychází z principu Herz-Érardovy dvojrepetiční mechaniky. Jedná se tedy o mechaniky nárazového typu. Mechaniky, stejně tak jako kladívka, dnes vyrábí většinou specializovaní výrobci.

Pro hru samotnou je důležité zajistit, aby pohyby celého mechanismu při hře vykazovaly co nejmenší tření a byly pokud možno neslyšné (tento aspekt se snadno projeví například při špatném seřízení mechaniky nástroje sloužícího ve studiu pro natáčení).

Přestože se může zvuk generovaný při dopadu klávesy na dno jejího plstěného lůžka jevit jako rušivý element, stal se již nedílnou součástí zvukové estetiky nástroje a výrobci se často snaží ovlivnit jeho barvu obzvláště ve vztahu k výšce tónu klávesy. Nejpatrnější je tento jev při dynamicky silnější hře v čtyřčárkované oktávě.

Pro konstrukci je potom důležité zvolit správné délky součástí, aby mechanika umožňovala správné silové rozložení pro použitý pákový mechanismus. Rozměry kláves v oblasti dostupné pro hru jsou dnes již standardizovány, a to včetně ponoru klávesy. Celková délka klávesy je však parametrem závislým na konstrukci. Pianista při hře používá celou dostupnou délku klávesy od okraje až k místům blízkým zvratnému čepu. Při změně místa úhozu se tak mění síla potřebná k dosažení tónu o stejné hlasitosti. Tento jev se však mění v závislosti na celkové délce klávesy. V tomto ohledu jsou pro hru příznivější mechaniky s delší vzdáleností mezi okrajem klávesy a zvratným čepem, neboť při prodloužení této části je rozdíl v závislosti použité síly

pro dosažení stejné hlasitosti tónu při použití různého místa úhozu menší. Ovšem při použití příliš dlouhé klávesy dochází ke ztrátám úderné síly kvůli přílišnému prohýbání kláves při silnějších úderech. Je tak opět nutné volit kompromis.

Každou klávesu je možné individuálně vyvažovat umístováním závaží do části klávesy, která leží na straně od zvrtného čepu blíže k hráči. Vzhledem k obvyklému užití pianových rejstříků při hře se klávesy vyvažují tak, že v base je oproti diskantovým polohám nutné použít pro dosažení stejné výsledné rychlosti vymrštění kladívka větší síly. Tento rozdíl je udáván obvykle v podobě údaje o hmotnosti použitého závaží, která je nutná k překonání odporu mechanismu a stlačení klávesy. Obvykle se užívá hodnot okolo 50g (cca 0.49N). Rozdíl mezi vyvážením basových a diskantových kláves pak bývá v řádu gramů. [1]

Dalším aspektem ovlivňujícím kvalitu mechaniky je povrch kláves. Pro bílé klávesy se dříve používala slonovina a pro klávesy černé pak ebenové dřevo. Dnes se od použití slonoviny již upustilo a povrch kláves se dnes dělá převážně z plastu. U luxusních modelů však výrobci často zachovávají použití ebenového dřeva pro černé klávesy. Ač se tento aspekt může zdát nepodstatným, výrazně ovlivňuje hráčovo pohodlí při hře, a tak má nemalý dopad na celkový dojem z daného nástroje.

Kromě kláves disponuje klavír také třemi pedály sloužícími pro rozšíření výrazových prostředků při hře. Levý pedál, označovaný někdy též unacorda, při svém stlačení posune nepatrně celou mechaniku vůči strunám tak, že kladívko u strun tažených ve více svazcích dopadá na pouze na jednu z nich (proto una corda, z it. jedna struna). Při hře se stlačeným levým pedálem se tak sníží hlasitost (kladívko rozeznělo pouze jednu strunu), ale hlavně se dramaticky změní barva tónu, neboť místo kontaktu struny s kladívkem se mění, a kladívko tak udeří na strunu místem, kde plst není ještě tolik stlačena běžným používáním. Zvuk je tak měkčí, jakoby zastřený.

Pravý pedál zvedá všechna dusítka, a umožňuje tak strunám aby zněly dál i po vrácení klávesy do výchozí polohy (bez použití pedálu dusítka při zdvihu klávesy dosedá na struny a tlumí je).

Prostřední pedál zvaný sostenuto pedál umožňuje ponechat zdvižená dusítka pouze u kláves, které byly zdvižené v momentu stisku pedálu. U ostatních tónů je tak možné při hře dělat další výměny pomocí pravého pedálu nezávisle na tónech držených prostředním pedálem.

3 PRINCIP TVORBY TÓNU A ASPEKTY OVLIVŇUJÍCÍ JEHO KVALITU

Nalézt konkrétní souvislosti mezi jednotlivými aspekty konstrukčního řešení a jejich přímý vliv na výsledný zvuk nástroje je úkol, který je vzhledem k celkové složitosti konstrukce nástroje a způsobu generování zvuku více než nelehký.

„Pro řešení tohoto úkolu jsou nutné bohaté zkušenosti konstruktéra, klavírního technika, dobrého ladiče a intonéra v jedné osobě, jeho cit a intuice.“ [1] Proto se v této kapitole omezíme na známá fakta vyplývající jak ze snah o dokonalý matematicko-fyzikální popis jednotlivých součástí nástroje, tak z vlivů výsledovaných na základě stovek let empirických pokusů prováděných v této oblasti.

Jednotlivé vlivy pak budeme dělit podle toho, kde se v mechanicko-akustickém řetězci uplatňují. Zde je vhodné využít dělení řetězce na základní elementy. Řetězec je pak podle Syrového vhodné členit na excitátor (budící element či mechanismus, kladívko), oscilátor (kmitající element, struna) a rezonátor (zesilující element, kostra nástroje s rezonanční deskou). Někdy se také zvlášť vyčleňuje radiátor jakožto element ovlivňující vyzářování. [2]

3.1 Excitátor

V pořadí první součástí akustického řetězce je excitátor. V případě klavíru se jedná o kladívko jakožto budící element iniciující kmitání struny. Z hlediska vlivu na výsledný zvuk je u kladívek důležité především místo, kde kladívko na strunu dopadá (tzv. úhózová linie), plocha jakou se kladívko struny dotýká, tvrdost kladívka a doba jeho kontaktu se strunou. Z výrobních parametrů kladívka pak nalézáme spojitost především s hmotností kladívka a tuhostí plsti.

Při pokusech o matematický popis interakce kladívka a struny narážíme na problém nelinearity kladívkové plstě. Plst je při okraji kladívka měkká a směrem k jádru je tvrdší. Tato vlastnost excitátoru umožňuje výrazně měnit barvu tóny při změně síly úderu kladívka na strunu. Při slabší síle úderu kladívko interaguje se strunou pouze svrchní měkkou částí a doba kontaktu se strunou je tak delší což znamená pozvolnější přenos energie, který nevybudí tak široké spektrum výsledného tónu. Naopak při dynamicky silnější hře dojde při kontaktu kladívka se strunou k výrazně většímu stlačení okrajové plsti, a tak se kladívko jeví jako tvrdší. Doba kontaktu mezi strunou a kladívkem je pak kratší a snáze vybudíme tón bohatší na vyšší frekvence.[14] Tento vliv je pak pozorovatelný při různé tvrdosti použitých kladívek a i jejich úpravě tzv. intonací.

Dalším aspektem ovlivňujícím výsledný tón generovaný strunou po uderu kladív-
kem je změna velikosti a hmotnosti kladívek a s ní i změna velikosti plochy, kterou
se kladívko dotýká struny. Kladívko totiž vzhledem ke své konečné velikosti neudeří
v jednom bodě, ale dotýká se větší oblasti struny. Podle [13] se však tento aspekt jeví
jako nepříliš podstatný pro tvorbu tónu. U téměř celého tónového rozsahu nástroje
je totiž velikost plochy, kterou se kladívko dotýká struny zanedbatelná vůči její cel-
kové délce a vlnové délce vyšších harmonických. Svou roli tento aspekt může hrát
v oblasti spodních dvou oktáv nástroje, kde začíná být konečný rozměr basových
kladívek roven vlnové délce některých vyšších harmonických složek, které mohou
být obsaženy ve spektru.

Důležitá je pak doba kontaktu kladívka se strunou vzhledem k rychlosti šíření
vlny po struně. V okamžiku úderu kladívka na strunu se z místa úderu oběma
směry šíří vlna směrem k okraji struny. Ta se na obou koncích odrazí a vrací zpět
s opačnou fází. V případě, že je doba kontaktu kladívka se strunou delší než doba
potřebná pro rozšíření vlny směrem ke kobyolkovému hřebu a zpět, je kladívko stále v
kontaktu se strunou v okamžik návratu prvotní vlny po svém odrazu, a dochází tak
k jejich interakci a částečnému utlumení vlivem přenosu energie zpět do kladívka.
Tento jev tak způsobuje relativně rychlé utlumení převážně vyšších harmonických
v oblastech, kde je doba kontaktu struny a kladívka shodná či delší, než je délka
periody fundamentální frekvence. Z toho plyne, že basové tóny, u nichž je doba
kontaktu v porovnání s periodou i desetinová, budou mít v porovnání s diskantem
bohatší spektrum na vyšší harmonické tóny.[14]

Vliv místa dopadu kladívka vzhledem k celkové délce struny na výslednou barvu
tónu výstižně popisuje [7]: *„Jestliže je u klavíru místo úderu kladívka 1/8 struny,
cyklické spektrum kmitů potom bude vykazovat minima na násobcích frekvence 8.
harmonické složky. Potlačení těchto složek je tak silné, že se dá mluvit dokonce v
místech daných minim o antiformantových oblastech. Obecně lze u cyklických spekter
tónů nejspodnějších 3 až 4 oktáv nástroje vymezit tzv. vrchní cyklus s lokálními
minimy na 7. až 9. harmonické složce a jejich násobcích. Další, tzv. spodní cyklus
tvoří ve spektru tónu klavíru minima na 3. až 5. harmonické složce a jejich lichých
násobcích. Minima spodního cyklu souvisejí s krátkodobým intenzivním zatlumením
kmitů struny hmotou kladívka, a to těch harmonických složek, které mají v místě
úderu kladívka kmitnu. Čím měkčí je kladívko, tím výraznější jsou minima spodního
cyklu.“*

3.2 Oscilátor

Základním kmitajícím elementem (oscilátorem) je u klavíru, stejně jako u ostat-
ních strunných nástrojů, struna. Struna z pohledu fyzikálního představuje pružné

prostředí, které umožňuje kmitání jeho částic. Při zjednodušeném pohledu můžeme říci, že částice po úderu kladívka převezme jeho pohybovou energii, kterou přemění na vlastní pohybovou energii. V místě, kde došlo ke kontaktu mezi kladívkem a strunou, tak dochází ke vzniku kmitání ve směru působící síly kladívka. Protože je však struna charakterizována jako pružné prostředí, nebude izolovaně kmitat pouze bod, ve kterém ke kontaktu došlo, ale následkem silového působení mezi částicemi se bude tento vzruch lavinovitě šířit po celé struně, a ta se tak postupně rozkmitá celá. Vzniká tak příčné vlnění (jednotlivé body kmitají ve směru kolmém oproti směru šíření vlny). [2]

Příčnou netlumenou vlnu pak popisuje pohybová diferenciální rovnice takto:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

Kde x a y jsou souřadnice vektorů popisující vlnění v dvourozměrném systému a t je čas. Rychlost šíření příčných vln c je pak dána vztahem:

$$c = \sqrt{\frac{F}{d}} \quad (3.2)$$

Kde F je tahová síla struny a d je hmotnost struny vztažená na jednotku délky.

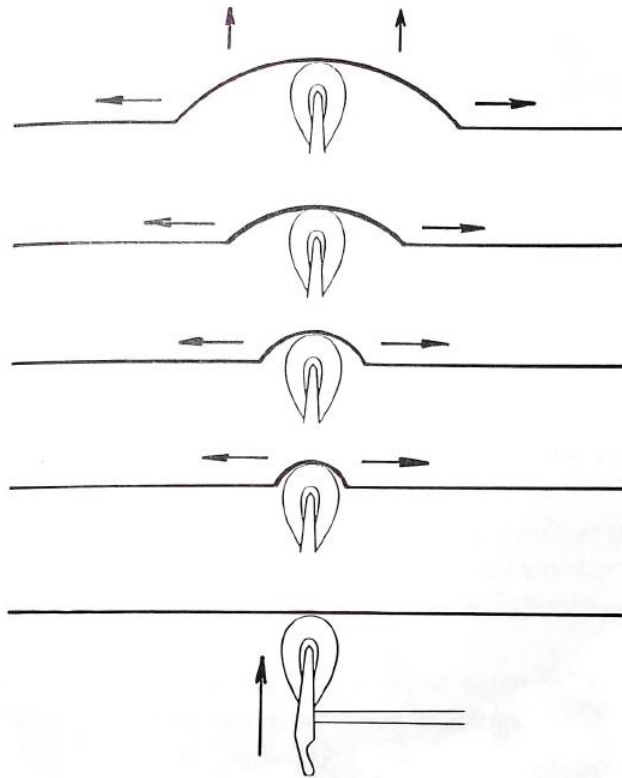
Při úderu kladívka do struny se však vlnění šíří od místa úderu ke kraji struny vždy oběma směry jak je patrné z obrázku 3.1. Na kraji struny v idealizovaném případě dokonale tuhého upevnění struny, ke kterému se u klavíru blížíme, dochází k úplnému odrazu vlny a ta se pak vrací zpět, avšak s opačnou fází. Tyto vlny se pak skládají, interferují. [2]

„Nejdůležitější případ interference vlnění nastává, když dvě postupná vlnění o stejné amplitudě, frekvenci a směru kmitání bodů na téže řadě jdou proti sobě stejnou rychlostí. V tomto případě vznikne vlnění stojaté.“ [2]

V případě klavíru tak po odeznění přechodových jevů vzniká stojaté vlnění, které je charakterizováno pozicí uzlů na okrajích, v místě uchycení struny. Vzniklé frekvence stojatého vlnění jsou potom označovány jako vlastní frekvence struny. Těch je teoreticky nekonečně mnoho, jak je patrné ze vztahu který popisuje vlastní frekvence struny délky l :

$$f_n = n \frac{v}{2l}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.3)$$

kde f_n je frekvence n – té harmonické a v je rychlost šíření vlny. Pro $n = 1$ pak získáme frekvenci základního kmitu, zvaného též fundament. U ideální struny je frekvence každé vyšší harmonické složky vždy celočíselným násobkem fundamentu. Pro vlnu také platí rovnice popisující rychlost jejího šíření v na základě znalosti kmitočtu vlnění f a její vlnové délky λ .



Obr. 3.1: Princip šíření vlnění po úderu kladívka na strunu [2]

$$v = f\lambda \quad (3.4)$$

Frekvence vlastních kmitů struny závisí na délce struny, síle, kterou je struna napínána, a hmotnosti struny. Tyto veličiny dává do souvztáhnosti známý *Taylorův vzorec*, který získáme dosazením rovnice 3.4 do rovnice 3.3. S jeho pomocí můžeme určit frekvence vlastních kmitů struny na základě znalosti výrobních parametrů strun a síly, kterou jsou napínány.

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{d}} = \frac{n}{Dl} \sqrt{\frac{F}{\pi\rho}} \quad (3.5)$$

F ... tahová síla struny, D ... průměr struny, ρ ... hustota materiálu

Vztah 3.5 platí pouze pro idealizovaný model dokonale pružné struny. Pro stanovení přesnější hodnoty výsledné základní frekvence kmitání struny se tak používá empirický *Seebeckův vzorec*:

$$f = f_1 \left(1 + \frac{D^2}{4l} \sqrt{\frac{\pi E}{F}} \right) \quad (3.6)$$

kde E představuje Youngův modul pružnosti materiálu struny. [2] [7]

Struna však po úderu kladívka nekmitá pouze ve vertikálním směru, jak by se dalo předpokládat, ale i ve směru horizontálním do určité míry v ní probíhá i podélné vlnění, které také přispívá k barevnému charakteru výsledného zvuku. [16][12][11]

Energie vertikálního kmitání struny se pomocí kobylyky přenáší do rezonanční desky a mění se na akustickou energii, která je nástrojem vyzářena. Struna kmitající také ve směru horizontálním naopak nemá téměř žádnou součást konstrukce, které by mohla svou energii v tomto směru předat, a proto kmitá značně déle. Tyto dva směry kmitání a přeměna jejich energie pak způsobují typický lom ve sklonu dynamické obálky tónu klavíru při doznívání tónu. [12][11]

3.2.1 Inharmonicitata

„U skutečné struny dochází také k „rozladění“, tj. neharmonicitě, v tomto případě posuvu harmonických složek kmitání směrem k vyšším frekvencím vlivem ohybové tuhosti struny. Neharmonicitu, především známou u pianových strun, si lze též představit jako důsledek reálné tloušťky struny. Kmitající struna klade v místě upnutí ohybu reakci přímo úměrnou průměru (tuhosti) struny a frekvenci jejího kmitání. V důsledku toho se poloměr ohybu zvětšuje a účinná (akustická) délka struny se zkracuje.“

[2] U struny tak dochází ke změně rychlosti šíření vlny v závislosti na frekvenci. Se zvyšující se frekvencí se vlna šíří rychleji. Důsledkem je pak postupný posun výsledné frekvence harmonických směrem nahoru, v závislosti na jejich pořadí. [21]

Inharmonicitata struny přímo souvisí s Youngovým modulem pružnosti a vyjádříme ji nejčastěji jako koeficient inharmonicity b . Na základě jeho znalosti můžeme teoreticky předpovědět frekvenci harmonických při započítání vlivu Youngova modulu pružnosti pomocí vztahu 3.7, kde f_n je frekvence n -té harmonické, f_1 je frekvence fundamentu a n je číslo dané harmonické.

$$f_n = n f_1 \sqrt{1 + b n^2} \quad (3.7)$$

Z tohoto vztahu je patrné, že v případě, kdy je koeficient b roven nule, jsou frekvence harmonických vždy celočíselným násobkem fundamentu.

Pro získání hodnoty koeficientu b pak můžeme použít vztahy, které uvádí [11].

$$Y_n = b X_n, n = 1, 2, \dots, \quad (3.8)$$

$$Y_n = \frac{\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 - f_1^2}{f_1^2 n^2} \quad (3.9)$$

$$X_n = n^2 \quad (3.10)$$

Nejprve je nutné stanovit hodnoty členů X_n a Y_n pro všechna dostupná n a poté pomocí metody nejmenších čtverců určit b jako směrnici funkce $Y_n = b X_n$.

Další možností jak vyjádřit inharmonicitu daného tónu je pomocí vztahu 3.11 kde k je počet harmonických, na základě kterých chceme inharmonicitu určit.

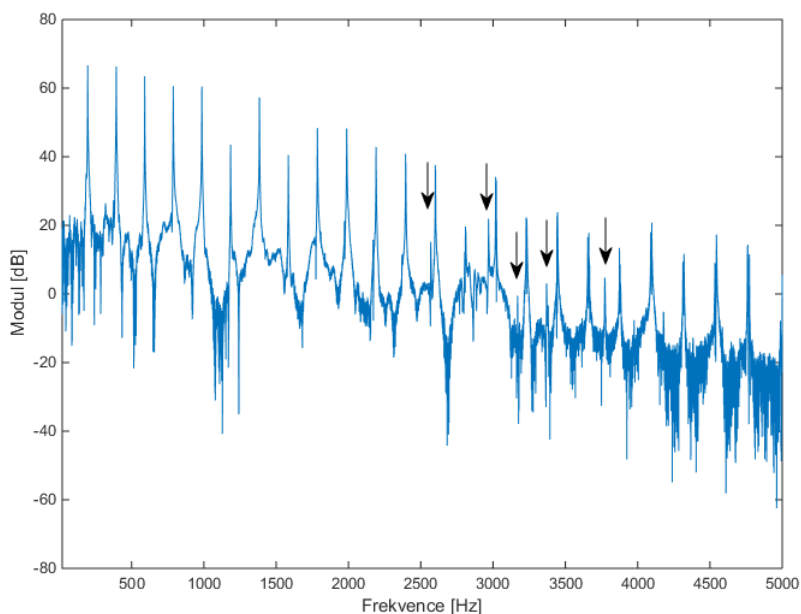
$$inharm = \sum_{n=1}^k \frac{|f_n - f_1 n|}{f_n} \quad (3.11)$$

Takto vyjádřená hodnota inharmonicity daného tónu bude nabývat hodnot 0 až 1. Tento způsob vyjádření inharmonicity je oproti koeficientu b vhodný svou názorností, a je tak vhodný pro jednoduché porovnávání.

Obecným omezením pro stanovení hodnoty inharmonicity z audio vzorku signálu je počet vybuzených harmonických v něm přítomných. Oba výše zmíněné způsoby výpočtu potřebují množství harmonických pro určitou přesnost výsledku. Těmito způsoby tak nelze hodnotit inharmonicitu tónů od jednočárkované oktávy výš, pro přílišnou chybovost způsobenou přítomností pouze nedostatečného počtu vyšších harmonických potřebných pro přesný výpočet.[11]

3.2.2 Phantom partials

Při detailním pohledu na spektrum většiny vzorků můžeme zřetelně pozorovat výskyt tzv. phantom partials. Jedná se o spektrální čáry, které se nachází v oblasti mimo předpokládanou polohu harmonických (na obr. 3.2 označeny šipkou).



Obr. 3.2: Ukázka spektra tónu obsahujícího phantom partials

Často se objevují jen v určitých frekvenčních oblastech, které pak vnímáme jako kvaziharmonické formantové oblasti, a výrazně se podílejí na charakteristickém

zvuku klavíru mimo jiné i tím, že mezi phantom partials a harmonickými mohou vznikat zázněje. Ty pak při frekvenci záznějů v rozmezí 51 a 300 Hz zvyšují subjektivně vnímanou drsnost tónu. Matematicky frekvenci phantom partials můžeme určit jako součet nebo rozdíl frekvence harmonických. V oblasti harmonických nižších pořadových čísel jsou kvůli malému vlivu inharmonicity jejich frekvence totožné s frekvencí harmonických. Čím se však dostáváme k harmonickým s vyšším pořadovým číslem nebo se zvyšuje hodnota inharmonicity (v diskantu), začíná se jejich poloha od polohy harmonických lišit. U basového a tenorového rejstříku se phantom partials objevují nejčastěji v oblasti mezi třetí a čtvrtou oktávou od fundamentu. V otázce příčiny jejich vzniku se většina autorů shoduje na vlivu podélného vlnění na struně, některé prameny však uvádějí souvislost i s horizontálním kmitáním struny. Experimentálně bylo dokázáno, že koeficient inharmonicity kvaziharmonické řady, kterou phantom partials formují, je čtvrtinový v porovnání s koeficientem inharmonicity módů příčného vlnění. Avšak nebylo zatím uspokojivě prokázáno, proč tomu tak je. [23]

Frekvence podélného vlnění struny můžeme ovlivnit jedině konstrukčním řešením (změnou menzurační délky nebo hmotnosti struny). Jistá doporučení pro návrh strunového potahu s přihlédnutím k vlivu podélného vlnění struny byla již roku 1970 patentována Harold A. Conklinem Jr. z firmy Baldwin Piano & Organ Company. Zvukový efekt podélného vlnění pak názorně demonstrují zvukové ukázky, které jsou součástí [16].

3.3 Rezonátor

Rezonátor u klavíru vzniká sestavením více konstrukčních prvků, a to konkrétně zasazením rezonanční desky s nalepenými kobyilkami, která je vyztužena žebry, do kostry nástroje. Každá součást rezonátoru má svůj jedinečný přínos pro výsledný zvuk, avšak až při dokonalém sladění všech jejich vlivů do funkčního celku může vzniknout rezonátor, který pomůže zesílit a vhodně barevně dotvořit tón generovaný strunou.

Rezonanční deska, tak jako každý objekt schopný kmitání, má vlastní frekvence kmitání, zvané také módy. Jsou to frekvence, při kterých, v případě že je deska buzena vnějším zdrojem kmitů, dochází k rezonanci. Rezonance je fyzikální jev, který nastává, když je těleso působící vnější silou nuceno ke kmitání při frekvenci blízké vlastní frekvenci tělesa. To pak začne kmitat s daleko větší výchylkou než je tomu v případě budících frekvencí o hodnotách vzdálených vlastním frekvencím tělesa.

Módy rezonanční desky tak negativně ovlivňují vlastnosti od desky vyžadované. Jak již bylo nastíněno v kapitole 2.1, od rezonanční desky se očekává, že bude

zesilovat všechny tóny nástroje rovnoměrně, což se však díky přítomnosti módů neděje.

Módy desky se pak ještě radikálně změní po přilepení žeber. Přilepením žeber se zvýší tuhost celé soustavy (zvýší se mechanická impedance) a módy se tak posunou směrem k vyšším frekvencím. [8]

Při dalším ztužení desky připevněním litinového rámu a následným zasazením takto vzniklé konstrukce do kostry nástroje se frekvence módů rezonátoru ještě zvýší, ale takto pozměněné formantové oblasti nástroje zesilují širší frekvenční oblast než tomu bylo u holé, impedančně nezátížené desky.[15]

Výsledná poloha módů však nezávisí pouze na tuhosti celé soustavy a rozměrech desky. Do jisté míry se může také projevit struktura dřeva jako taková. Jak je patrné již z principu výroby desky a žeber, přináší tento aspekt do hry vliv jedinečnosti, který nelze nikdy přesně odhadnout.[8]

Určení míry, do jaké se módy rezonanční desky projeví ve výsledném zvuku nástroje, není úkol snadný, neboť vzhledem k proměnnému místu působení budící síly, zapříčiněnému rozložením strun po celé délce kobyly, a velkému rozsahu budících frekvencí strun, je nutné nejprve určit frekvence módů již celého sestaveného rezonátoru včetně napnutých strun, určit uzlové linie a oblasti kde naopak dochází k velkým výchylkám u jednotlivých módů, porovnat tato místa u všech módů s umístěním kobyly a konkrétně pak frekvencí tónu a jejich vyšších harmonických generovaných právě v tom místě.[15]

Nebývalá pracnost celého procesu včetně nesnadného měření mechanické impedance desky bez zásahu do dřeva při zachování celého sestaveného rezonátoru neumožňují tuto metodiku používat při běžné výrobě.

Proto se dnes již pro popis těchto jevů využívá matematicko-fyzikálního modelování, nejčastěji metodou konečných prvků. Avšak vzhledem k jedinečnosti dřeva jakožto hlavního použitého materiálu při konstrukci i tyto metody nejsou schopny předpovědět úplně vše. [8]

Při přenosu energie mezi oscilátorem a rezonátorem dochází k důležitému jevu. V případě vhodného přizpůsobení mechanické impedance struny a desky v místě, kde dochází k přenosu energie, veškerá energie struny je deskou rychle vyzářena a vzniká tak hlasitý tón. Avšak vzhledem k tomu, že v celém systému je omezené množství energie, je jasné, že hlasitý tón bude zároveň i krátký, a bude tak postrádat jistou „zpečnost“. Při návrhu nástroje v případě známé frekvenční závislosti mechanické impedance v jednotlivých místech (například na základě modální analýzy metodou konečných prvků) přistupujeme ke kompromisu mezi krátkým a hlasitým tónem a tišším, delším a „zpečnějším“ tónem.[15]

Impedanční přizpůsobení můžeme měnit buď změnou mechanické impedance rezonátoru, nebo změnou impedance struny například při změně přetlaku struny na

kobylku, nebo změnou jejího napětí.

4 BARVA TÓNU

Při popisu našeho vnímání tónů se obvykle věnujeme několika základním vlastnostem, pomocí nichž jsme zvyklí tóny charakterizovat. Mluvíme o výšce, délce, hlasitosti a barvě tónu. Většina z výše zmíněných subjektivních vlastností má konkrétní souvislost s některou z fyzikálních veličin. U subjektivně vnímané výšky tónu nalezneme souvislost s frekvencí, u délky tónu pak s časem a u hlasitosti lze nalézt přímou spojitost s velikostí hladiny akustického tlaku. Není tomu však vždy tak, že změna hodnot fyzikální veličiny odpovídá změně hodnot veličiny subjektivní stejnou měrou. Při hlubším zkoumání se navíc zjistilo, že již zmíněné propojení fyzikálních veličin a veličin popisujících subjektivní vnímání nelze zúžit vždy jen na již zmíněné dvojice. Subjektivní výška tónu tak kromě frekvence závisí do jisté míry například i na velikosti hladiny akustického tlaku. [9]

Ze základních subjektivních veličin používaných pro popis tónů se nejobtížněji pracuje s barvou tónu. Oproti výšce, délce a hlasitosti zde není možné vytvořit jednorozměrný systém a ten použít pro její popis. I z etymologického hlediska je zde zřetelná snaha o využití synestezie pro popis tohoto subjektivního vjemu, a tak barvu tónu popisujeme převážně slovně, nejčastěji pomocí adjektiv používaných pro popis zrakových a hmatových vjemů.

Tak tomu bylo až do roku 1811, kdy francouzský matematik Joseph Fourier popsal způsob rozkladu jakéhokoliv periodického i neperiodického signálu do podoby řady či integrálu jednoduchých harmonických signálů a dal tak k dispozici matematické prostředky pro analýzu a syntézu zvukových signálů. [2]

4.1 Souvislost vnímání zvukové barvy s podobou spektra

H. von Helmholtz na základě znalosti Fourierova matematického aparátu hledal souvislost mezi vjemem barvy a podobou spektra. Na základě zkoumání vjemu některých základních typů harmonických tónů definoval základní vztahy mezi typem spektra a odpovídajícím subjektivním vjemem barvy:

1. *Jednoduché tóny sinusového charakteru, např. u široce menzurovaných krytých varhanních píšťal, znějí velmi měkce a příjemně, bez jakékoliv drsnosti, ne silně a v hluboké poloze temně, tupě.*
2. *Komplexní tóny tvořené řadou harmonických nižších pořadových čísel a přiměřené intenzity, cca do 6. složky, znějí plně a „hudebně“. Ve srovnání s jednoduchými tóny jsou zvukově bohatší a okázalejší. Absence harmonických vyšších*

pořadových čísel způsobuje jejich „libozvučnost“ a měkkost. Tyto tóny jsou typické pro klavír, otevřené varhanní píšťaly a nízkou dynamiku lesního rohu i lidského hlasu.

3. Komplexní tóny tvořené řadou pouze lichých harmonických, jako např. u klarinetu a úzce menzurovaných krytých varhanních píšťal, znějí dutě a při větším počtu vyšších harmonických „huhňavě“ resp. nasádně.
4. Pokud ve spektru komplexního tónu převažuje první harmonická, lze označit jeho barvu za plnou, v opačném případě převahy vyšších složek je tón „prázdný“ (spíše úzký či užší). Tento rozdíl je typický mezi široce a úzce menzurovanými retnými varhanními píšťalami, mezi jazykovými píšťalami s přirozenou délkou ozvučny a tzv. regály, dále mezi klavírem a cembalem apod.
5. U komplexních tónů s intenzivními harmonickými nad 6. nebo 7. složkou je barva charakterizována jako ostrá a drsná, což souvisí především s konkrétní sestavou těchto vyšších harmonických. Stupeň ostroty tónu může být různý a velmi charakteristický, jako např. u plechových či dřevěných dechových nástrojů, u smyčcových nástrojů, či lidského hlasu apod. a zřetelně tyto nástroje odlišuje (spolu s dynamikou tónu).

[2]

4.2 Psychoakustické veličiny

Barvu tónu dnes můžeme objektivně charakterizovat pomocí metod psychoakustické analýzy. Často používanou metodou je metoda sémantického diferenciálu, která popisuje charakter tónu pomocí škály na jejíž koncích leží vždy jedno z dvojice antonym popisujících barvu tónu (např. dvojice jasný - temný). Množství respondentů při takovémto výzkumu hodnotí, na kolik se subjektivní vjem barvy zkoumaného zvuku blíží kterému ze dvojice slov v rámci zobrazené stupnice. Tato metoda ovšem vyžaduje velké množství respondentů (min. 300), abychom mohli závěry vyvozené z takového hodnocení považovat za směrodatné.[9]

Existují ovšem také psychoakustické jevy, u nichž se našla přesná spojitost s jejich protějšky ze světa fyziky. Na základě konkrétních hodnot fyzikálních veličin tak umíme stanovit subjektivní dobu trvání zvuku, hlasitost, výšku a z oblasti barvy pak ostrost, drsnost, sílu kolísání, tónovost, a na jejich základě pak sensorickou příjemnost.[9][2]

Pro naše potřeby jsou nejdůležitější veličiny popisující barvu tónu, avšak pro jejich stanovení je nutné vždy znát hodnotu hlasitosti zkoumaného zvuku.

4.2.1 Hlasitost

„Podle technické normy [17] se hlasitostí rozumí „vlastnost sluchového vnímání, podle které lze uspořádat zvuky na stupnici v rozsahu od tichých po hlasité.“[18]

Pro určení a kvantifikaci vjemu hlasitosti nějakého zvuku je nutné znát frekvenční závislost hladiny intenzity zkoumaného zvuku (hladinu intenzity stanovíme z naměřených hodnot akustického tlaku). Tu je potřeba porovnat s tzv. *křivkami stejné hlasitosti*. Tím získáme hladinu hlasitosti s jednotkou fón [Ph]. Při změně hladiny hlasitosti o stejnou konkrétní hodnotu, ovšem při různých výchozích hladinách hlasitosti, neodpovídá stejná změna subjektivního vjemu. Za účelem získání škály odpovídající změnám subjektivního vjemu hlasitosti byla experimentálně vytvořena stupnice subjektivní hlasitosti, jejíž jednotkou je son [son].[18] Pro převod mezi veličinami hlasitostí N [son] a hladinou hlasitosti L_N [Ph] můžeme použít následující vztah:

$$N = 2^{(L_N - 40)/10} \quad (4.1)$$

kde $L_N = 33,22 \log N + 40$.[18]

Tímto poměrně komplikovaným způsobem jsme schopni stanovit hodnotu subjektivní hlasitosti nezbytně nutnou pro výpočet dalších psychoakustických veličin.

4.2.2 Ostrost

Psychoakustickou veličinu ostrost značíme symbolem S a její jednotka je acum [acum]. 1 acum je pak definován jako „*ostrost úzkopásmového šumu o šířce kritického pásma se středním kmitočtem 1000 Hz a s hladinou akustického tlaku 60 dB*“. Pro výpočet se pak používám matematický model obsahující váhovou funkci, která je frekvenčně závislá a jejíž příspěvek nabývá na důležitosti směrem k vyšším kmitočtům. Z toho je patrné, že k dosažení velkých hodnot ostrosti je třeba, aby ve spektru byly výrazně zastoupeny vysoké frekvence.[9]

4.2.3 Drsnost

Subjektivní vjem drsnosti způsobují rychlé časové změny hlasitosti, které již sluch nedokáže sledovat. Jako drsnost pak nejčastěji vnímáme probíhající amplitudovou modulaci s frekvencí modulačního signálu v rozmezí 515 Hz až 300 Hz. Tento signál však nemusí být nutně periodický. Při modulačních frekvencích nižších než 15 Hz ucho stačí sledovat jednotlivé změny hlasitosti a ty pak vnímáme jako kolísání hlasitosti. Dalším důležitým aspektem při zkoumání drsnosti je naše schopnost hodnotit tuto veličinu nezávisle na ostatních probíhajících sluchových vjemech.[9]

Drsnost značíme R a její jednotka je asper [asper]. Drsnost 1 asper pak definujeme jako „*drsnost čistého tónu o frekvenci 1000 Hz s hladinou akustického tlaku 60 dB*“

amplitudově modulovaného modulačním kmitočtem 70 Hz při stupni modulace $m = 1$ “.[9]

Drsnost je závislá na třech fyzikálních parametrech signálu, a to na modulačním kmitočtu, stupni amplitudové modulace a hladině akustického tlaku. U stupně amplitudové modulace a hladiny akustického tlaku platí, že vyšší drsnosti dosáhneme vždy při vyšší hladině hlasitosti nebo stupni modulace. Maximální drsnosti naopak dosahujeme při modulačním kmitočtu v rozmezí přibližně 70 až 100 Hz. V případě drsnosti hraje významnou roli také časové maskování v rámci kritických pásem.[9]

4.2.4 Shrnutí

V rámci této krátké kapitoly jsme provedli výčet základních objektivních metod pro hodnocení subjektivního vjemu zvukové barvy. Metodu sémantického diferenciálu nebylo možné v rámci této práce vzhledem k přílišné náročnosti z hlediska množství respondentů použít. Pro výpočet psychoakustických veličin týkajících se barvy je naopak nutná znalost hodnot akustického tlaku. Ty však z důvodu nedostatku technického vybavení nebyly naměřeny.

Musíme si tak v otázce hodnocení barvy barvy vystačit s pozorováním šíře spektra tónu a příspěvku jednotlivých harmonických k celkové energii a jeho vývojem v čase.

5 METODY ANALÝZY SPEKTRA ZVUKOVÉHO SIGNÁLU

V této kapitole se budeme zabývat nejprve základní charakteristikou signálů a jejich dělením, a následně Fourierovou transformací a jejím použitím pro interpretaci spektra. Na závěr pak provedeme stručný výčet různých způsobů grafické interpretace spektra a jeho specifik.

5.1 Základní charakteristika signálů a jejich dělení

Nejběžnějším dělením signálů je dělení podle náhodnosti jejich průběhu. Takto dělíme signály na deterministické a stochastické (náhodné). [19] Typickým příkladem deterministického signálu je harmonický signál, který můžeme popsat pomocí jednoduché funkce sinus nebo kosinus. Jako vhodného reprezentanta skupiny náhodných signálů pak nejčastěji uvádíme bílý šum.

Deterministický signál je takový signál, u něhož jsme schopni pro každou známou hodnotu závislé proměnné určit jí odpovídající hodnotu nezávislé proměnné. Jeho průběh je pak popsán matematickou funkcí nebo posloupností.[19]

Dále můžeme deterministické signály rozdělit na signály periodické a neperiodické.

Zvuk produkovaný klavírem při hře obsahuje jak složky deterministické (tónová složka), tak stochastické (přechodový jev na začátku tónu a ruchy vytvářené mechanikou a hráčem při hře).

5.2 Harmonická analýza

Jakýkoliv periodický signál jsme schopni rozložit na dílčí harmonické složky, jejichž frekvence je dána celočíselným násobkem základní frekvence tónu. Tomuto procesu se říká harmonická analýza.[19] Výsledkem harmonické analýzy je pak spektrum amplitud (někdy též nazývané také modulové spektrum), které popisuje amplitudu dílčích harmonických složek a spektrum fází vyjadřující počáteční fázi signálu dílčích harmonických složek. Matematický aparát používaný pro provedení harmonické analýzy nazýváme Fourierova řada. Amplitudové spektrum spojitého periodického signálu takto vzniklé bude čárové.

Zřídka však analyzujeme signály tohoto druhu. V této práci proto budeme výhradně používat Fourierovu transformaci, která slouží k analýze spektra pomocí

převodu neperiodického signálu na spektrální funkci. Signál takto zobrazený ve spektrální doméně pak již není sérií diskretních čar, ale spojitou funkcí. Fourierova transformace spojitého signálu $s(t)$ je dána vztahem:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt \quad (5.1)$$

kde $\omega = 2\pi f$. [19]

Tato forma Fourierovy transformace však slouží pouze k analýze signálů se spojitým časem. Pro potřeby zkoumání spektra digitálně zaznamenaných audio vzorků tak potřebujeme Fourierovu transformaci diskretního signálu

$$\tilde{S}(e^{-j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s[n]e^{-j\omega n} \quad (5.2)$$

[19]

Nejčastěji se k provedení Fourierovy transformace diskretního signálu používá algoritmus zvaný FFT (Fast Fourier Transform). Nejinak tomu bylo v rámci této práce.

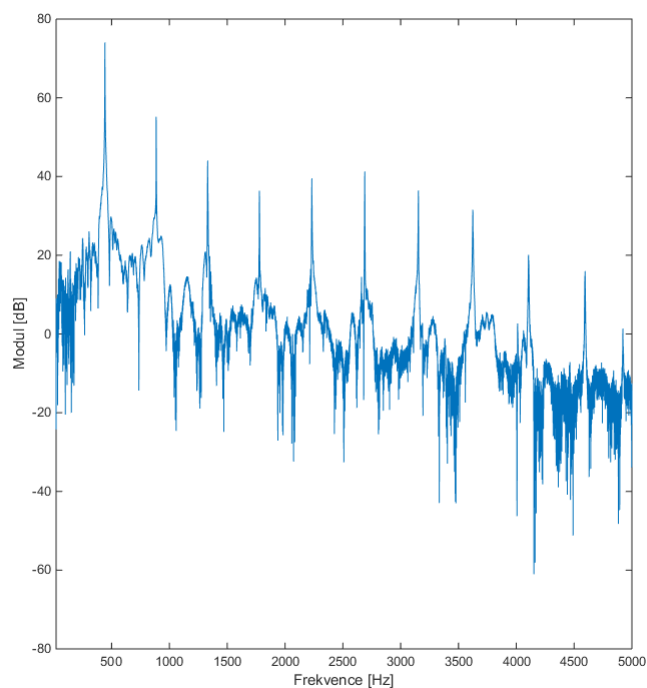
5.3 Různé způsoby grafické interpretace spektra

5.3.1 Modulová frekvenční charakteristika

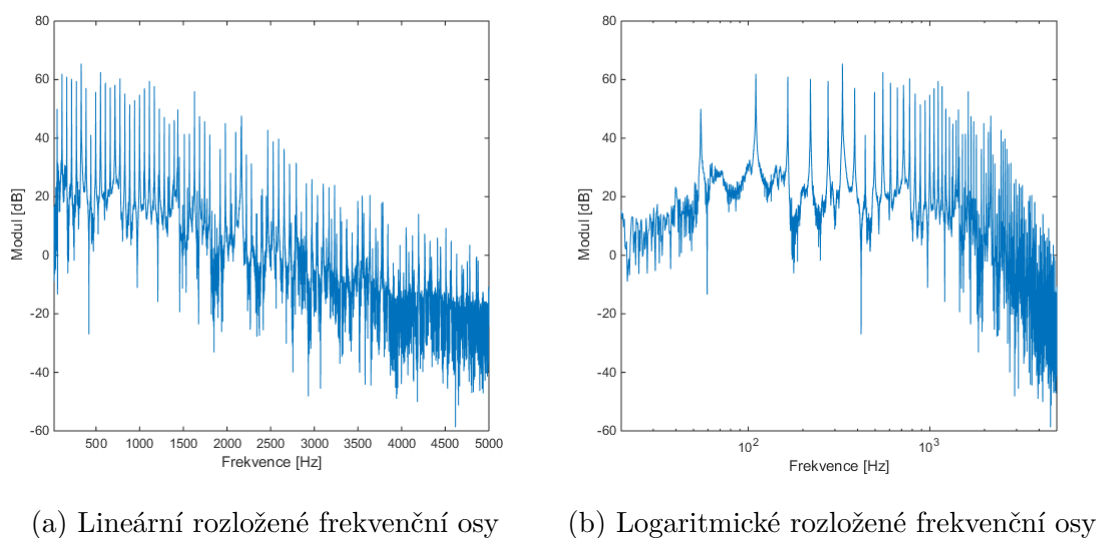
Pro grafickou interpretaci spektra můžeme využít několik možností. Nejčastější způsob je zobrazení frekvenční závislosti modulu spektrálních koeficientů. Příklad můžeme vidět na obrázku 5.1, kde vidíme modulovou kmitočtovou charakteristiku tónu c^1 . Protože změny téměř všech akustických veličin lidský sluch vnímá logaritmicky, je i v tomto případě vhodné použít logaritmické vyjádření modulu. Z grafu na obr. 5.1 jsou patrná pravidelně rozmístěná lokální maxima odpovídající frekvenčně jednotlivým vyšším harmonickým. První harmonická o frekvenci přibližně 440 Hz, druhá o 880 Hz atd. Při použité lineární frekvenční osy je výhodou jasně patrné pravidelné rozmístění harmonických. Z grafu je také patrná úroveň šumu měřicího řetězce, která je frekvenčně závislá a pohybuje se v rozmezí přibližně -10 až 0 dB. Pokud bychom chtěli zobrazit celé slyšitelné spektrum nebo zobrazit modul jakékoliv širokopásmové zvuku bude vhodnější použít logaritmické měřítko frekvenční osy, které lépe odpovídá našemu vnímání. Porovnání těchto dvou zobrazení můžete vidět na obrázcích 5.2a a 5.2b.

5.3.2 Cumulative line spectrum

Pro názornější popis výkonového rozložení vzhledem k frekvenci harmonických slouží veličina zvaná Cumulative line spectrum. CLS se stanovuje postupnou sumací čtverců



Obr. 5.1: Modulová frekvenční charakteristika tónu a^1



(a) Lineární rozložené frekvenční osy

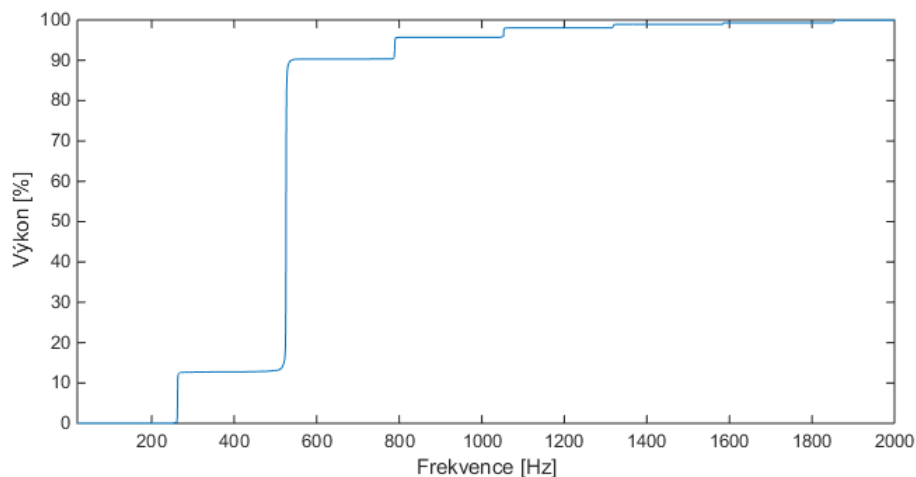
(b) Logaritmičké rozložené frekvenční osy

Obr. 5.2: Modulová frekvenční charakteristika tónu A^2

spektrálních koeficientů a poměrovým vyjádřením průběžné hodnoty této sumy vůči její výsledné hodnotě v závislosti na frekvenci. [11]

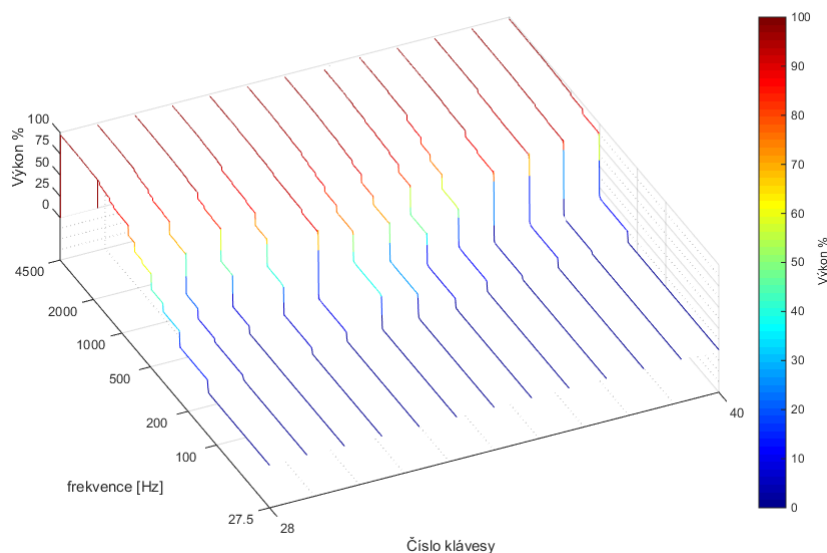
Názorně je to možné vidět na obrázku 5.3 obsahujícím graf CLS tónu c^1 . Vidíme, že signál na nízkých kmitočtech nemá téměř žádný výkon, a to až do frekvence

přibližně 260 Hz, kde leží fundament. I ten však nemá takový výkon, jak by se dalo očekávat (pouhých necelých 15%). Naopak druhá harmonická s frekvencí přibližně 520 Hz je výkonovým těžištěm celého tónu a obsahuje 75% veškeré energie. Příspěvky dalších harmonických jsou již velmi drobné a tón dosahuje 100% svého celkového výkonu už při frekvenci 7. harmonické.



Obr. 5.3: CLS tónu c^1 při hře

Takto můžeme snadno porovnávat rozložení výkonu i mezi jednotlivými tóny použijeme-li 3D zobrazení viz. obr.5.4. Můžeme zde jasně spatřit výrazný barevný



Obr. 5.4: CLS tónů malé oktávy při hře *mf*

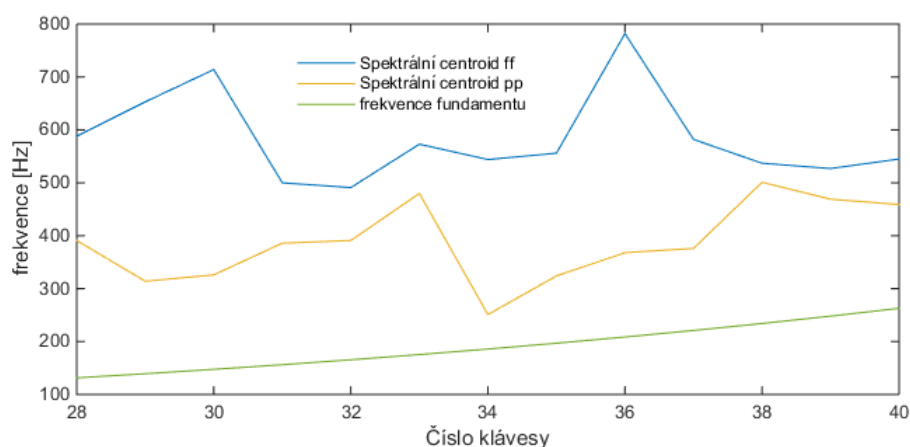
lom mezi tóny dis, e a f u kterých je výrazně odlišná distribuce výkonu v rámci prvních třech harmonických.

5.3.3 Spektrální centroid

Pro jednoduché číselné vyjádření frekvenční polohy energetického těžiště daného tónu může sloužit také veličina spektrální centroid. Spektrální centroid stanovíme podle vztahu 5.3, kde $(A_k)^2, k = 1, \dots, \frac{N}{2}$ jsou spektrální koeficienty odpovídající frekvencím splňujícím vzorkovací teorém.

$$\hat{f} = \frac{\sum_{k=1}^{N/2} (A_k)^2 f_k}{\sum_{k=1}^{N/2} (A_k)^2} \quad (5.3)$$

Na obrázku 5.5 vidíme srovnání spektrálních centroidů tónů malé oktávy stanovených výpočtem ze vzorků různé dynamiky a jejich porovnání s frekvencí fundamentu. Z grafu je patrné, že spektrální centroid se při dynamicky silnější hře posouvá k vyšším frekvencím, což je důsledkem většího množství vyšších harmonických obsahujících více energie. Naopak je patrné, že i při nejslabší dynamice neleží v malé oktávě výkonové těžiště v oblasti fundamentu (porovnej s obrázkem 5.4).



Obr. 5.5: Porovnání hodnot spektrálních centroidů tónů malé oktávy při různé dynamice s frekvencí fundamentu

5.3.4 Spektrogram

Spektrogram je způsob zobrazení, který vzniká rozdělením signálu na velmi krátké mírně se překrývající úseky pomocí okénkové funkce a následným provedením Fourierovy transformace každého z nich. Spektrogram tak zobrazuje vývoj spektra v čase. Vzhledem k výrazné proměnlivosti spektra klavírů s časem je toto zobrazení nejvhodnější pro detailní analýzu jednotlivých vzorků.

Klíčovým parametrem pro vhodné nastavení tohoto zobrazení je délka okna a s ní související počet vzorků, ze kterých je počítána Fourierova transformace. Frekvenční

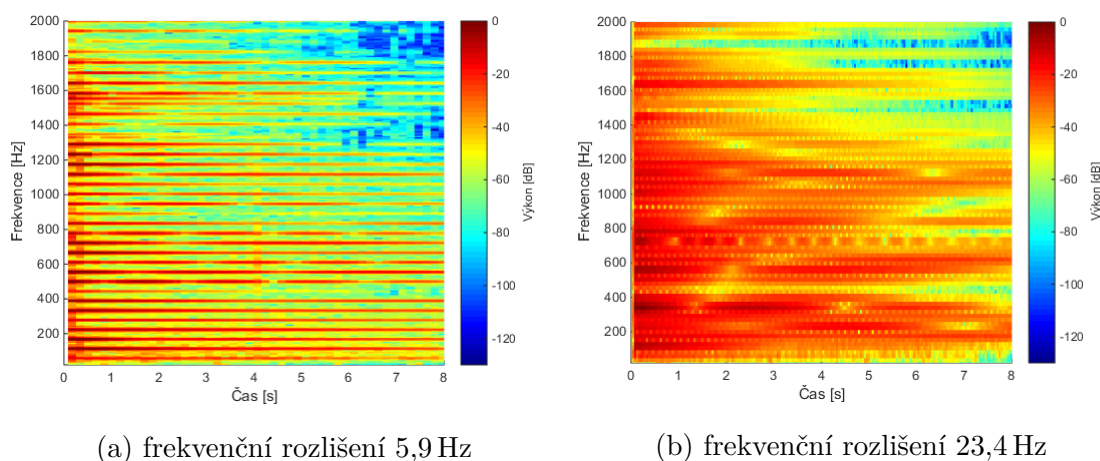
rozlišení ve spektrální doméně tak bude odpovídat frekvenci spočítané ze vztahu 5.4 kde f_{vz} je vzorkovací frekvence a N je počet vzorků ze kterých je počítána Fourierova transformace. Časové rozlišení pak logicky odpovídá vztahu 5.5.

$$f = f_{vz}/N \text{ [Hz]} \quad (5.4)$$

$$t = N \cdot \frac{1}{f_{vz}} \text{ [s]} \quad (5.5)$$

Ze vztahů 5.4 a 5.5 je jasně patrné, že při zvětšení délky okna získáme jemnější frekvenční rozlišení, zatímco v časové oblasti bude výsledné zobrazení méně přesné. Toto omezení popisuje Heisenbergův princip neurčitosti, který říká, že čím přesněji určíme jednu z konjugovaných vlastností, tím méně přesně můžeme určit tu druhou.[20]

Vzhledem k velkému frekvenčnímu rozsahu nástroje je nutné vhodně přizpůsobovat délku okna a hledat kompromis. Princip neurčitosti nás nejvíce omezuje při analýze nejhlubších tónů klavíru, kde je nutné dosáhnout větší přesnosti ve frekvenčním rozlišení. Vliv délky okna na zobrazení můžeme vidět na obrázku 5.6.



Obr. 5.6: Spektrogram tónu A¹ při hře mf

6 MĚŘENÍ

6.1 Popis způsobu získávání vzorků

Měření vzorků probíhalo v bezodrazové komoře firmy Petrof, spol s r.o. v Hradci Králové. Pro hru jednotlivých tónů o určité dynamice byla užita hrací lavice disponující nastavitelnou silou stisku klávesy a doby trvání jejího stisku. Tento hrací mechanismus je na rozdíl od živého hráče schopen zahrát všechny noty vždy stejnou silou, a tudíž nedochází ke zkreslení měření lidským faktorem. O přesnosti hracího mechanismu pojednává [6]. Při vyhodnocování vlastností lavice bylo stanoveno doporučených 5 úrovní dynamiky hry a k nim i doporučené hodnoty nastavení hrací lavice výrobcem. Pro zjednodušení popisu byla těmto pěti úrovním síly úhozu přiřazena označení z oblasti hudební terminologie popisující dynamiku hry, a to konkrétně *pp*, *p*, *mf*, *f*, *ff*. Jak se později ukázalo, toto přiřazení nejspíše není nejvhodnější a síla úhozu neodpovídá příliš inkriminovaným dynamickým hladinám. Proto je zde na zvážení změna výchozích nastavení měřicí lavice tak, aby pro názornost odpovídala hudebnímu vnímání a terminologii.

Změřili jsme vždy celý tónový rozsah nástroje, a to i včetně směrnosti vyzařování nástroje. Vyhodnocování této problematiky však není předmětem této práce.

6.1.1 Metodika a použitá technika při prvním měření

Prvním měřeným nástrojem bylo koncertní křídlo ANT. PETROF 275. Cílem tohoto pilotního měření bylo získat co největší množství a variabilitu vzorků pro možnosti pozdější analýzy a vyhodnocování samotné metodiky měření. Měření proběhlo dne 23. 11. 2017.

Pro měření vzorků za účelem následné spektrální analýzy byl použit měřicí mikrofon DBX RTA s kulovou směrovou charakteristikou. Mikrofon byl umístěn 145 cm od středu litinového rámu ve výšce 130 cm od úrovně, na které klavír stál. Toto umístění mikrofonu bylo zvoleno na základě předpokládaného směrového vyzařování nástroje a také vzhledem k běžnému umístění potenciálního posluchače. Původní záměr byl umístit mikrofon ještě dál, abychom se dostali do oblasti, kde je barva tónu již plně rozvinuta a ustálena a kde je také přítomnost posluchače pravděpodobnější. Omezujícím parametrem se však ukázal být šum nahrávacího řetězce, který při nižších dynamikách neumožňoval získat užitečný signál s dostatečným odstupem. Proto bylo po konzultaci s vedoucím práce přijato toto kompromisní řešení. Přesná poloha měřicího mikrofonu byla odměřena a zaznamenána pro dokonalou opakovatelnost měření.

Kromě použití mikrofonu pro záznam vzorků pro spektrální analýzu byly použity také mikrofony rozmístěné v pravidelných intervalech na speciální obruči obepínající celý nástroj. Na základě zaznamenaných dat z těchto mikrofonů bude možné případně později provést i analýzu směrového vyzařování nástroje. Pro tento druh měření bylo použito osm kondenzátorových mikrofonů Sennheiser ME62 s kardioidní směrovou charakteristikou, které byly vždy rozmístěny v oblasti čtvrt kruhu. Na dvakrát tak bylo možné změřit směrové vyzařování v úhlu 180° od místa, kde sedí hráč, přes celou oblast předpokládaného výskytu posluchačů s přesností 12° . Směrové mikrofony byly připojeny do osmikanálového předzesilovače s integrovaným A/D převodníkem RME Octamic II, který byl přes optické rozhraní ADAT připojen ke zvukové kartě RME Babyface Pro. Mikrofon měřící spektrum pak byl připojen přímo do předzesilovače zvukové karty, protože oproti předzesilovačům v zařízení RME Octamic II disponovala větším ziskem. Nastavení vstupního zesílení všech předzesilovačů bylo opět zaznamenáno pro dokonalou opakovatelnost měření.

Vzorky byly zaznamenány do DAW Cubase 5 při použití vzorkovací frekvence 48 kHz a bitové hloubky 24 bitů. Následně bylo v DAW použito freewarového VST pluginu ReaFIR pro odstranění šumu měřicího řetězce za účelem zlepšení čitelnosti signálu. Tento plugin funguje na principu analýzy úseku šumu, vytvoření jeho frekvenčního profilu a následné filtrace. Jak je patrné z obrázku 6.1 šum měřicího řetězce se objevuje v oblasti do 1 kHz. U vzorků jejichž fundament leží výš než 1 kHz tak nebyl užitečný signál nijak ovlivněn.

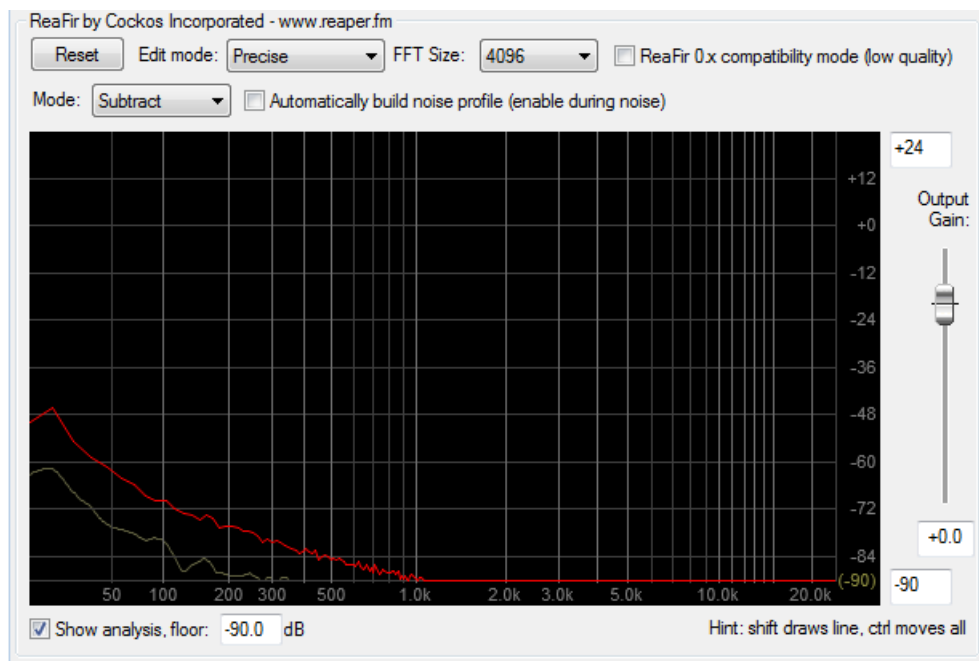
U vzorků s fundamentem nižším než 1kHz pak došlo k tvorbě slyšitelných artefaktů, které však nijak slyšitelně neovlivňují základní užitečný signál (VST plugin pravděpodobně disponuje algoritmem pro určení základní povahy signálu a v případě, že je signál tónového charakteru zůstává neporušený), a pro analýzu jsou tak tyto vzorky vhodnější než bez použití této úpravy signálu.

6.1.2 Technika použitá při druhém měření

Druhý měřený nástroj byl klavír P 284 Mistral. Měření proběhlo dne 25. 1. 2018.

Zvukové vzorky pro spektrální analýzu i pro analýzu směrovosti byly zaznamenány totožnými mikrofony jako v průběhu prvním měření. V tomto měření však byla z technických důvodů použita jiná zvuková karta (Presonus Audiobox 1818VSL). Kvůli omezení šumem jsme museli použít jiné hodnoty nastavení zisku mikrofonních předzesilovačů, a tak nelze vzorky z obou měření porovnávat absolutně ve vztahu k akustickému výkonu.

Všechny mikrofony byly umístěny ve stejné pozici a vzorky zaznamenány a upraveny pomocí totožného softwaru jako při prvním měření, s tím rozdílem, že v případě druhého měření bylo nutné všechny vzorky v digitální doméně následně zesílit o



Obr. 6.1: Uživatelské rozhraní VST pluginu ReaFir

15 dB. Při odstraňování šumu měřicího řetězce pak bylo použito jiné nastavení filtru vzhledem k odlišnosti frekvenčního profilu šumu zvukové karty oproti předchozímu měření.

6.2 Měřené nástroje

6.2.1 Antonín Petrof

První měřený nástroj byl klavír prémiové značky ANT. PETROF, konkrétně model nesoucí označení ANT. PETROF 275 (dále jen Ant). Jedná se o luxusní koncertní nástroj, který byl představen veřejnosti při příležitosti výročí 150 let od založení firmy v roce 2014.

Konstrukce tohoto modelu se vyznačuje množstvím technologických inovací v oboru, přičemž mnoho z nich bylo dokonce patentováno.

Nástroj, jak už napovídá jeho název, je dlouhý 275 cm a váží 588 kg. Rezonanční deska nástroje je vyrobena z rezonančního smrku s aktivní plochou 1,880 m². Ta je vyztužena šestnácti žebry. Obě kobylinky jsou vyrobeny z javorového dřeva z masivu. Kostra klavíru tlustá 50 mm, je z buku a kličník je vyrobený z kanadského javoru. Klávesnice je pak vyrobena ze smrkového dřeva a pultóny z ebenu. Struny jsou z oceli, oprádlo použité u basových strun je z mědi.[10]

V nástroji je použita evropská mechanika nejvyšší jakosti, stejně tak jako kladívka.[10]

V rámci konstrukce strunového potahu je u diskantových tónů tohoto nástroje využíváno tzv. alikvótů. V oblasti od konce menzury po místo uchycení je možné strunu buď utlumit, nebo nechat rezonovat. V závislosti na poměru délky této části vzhledem k délce menzurační pak tento úsek struny spolurezonuje a má vliv na výslednou barvu tónu. Tomuto technickému řešení se říká alikvóty. U ANT. PETROF 275 je konkrétně užito předních alikvótů u tónů d^2 až c^5 a zadních u tónů d^1 až c^5 .

U tohoto nástroje je součástí konstrukce také integrovaný mikrofonní systém, složený z kondenzátorových mikrofonů, který umožňuje tříkanálový přenos audio signálu přes standardní mikrofonní konektory typu XLR.

Základní parametry strunového potahu u vybraných kláves popisuje tabulka 6.1. Hodnoty v sloupci f_0 definují předpokládanou hodnotu fundamentu daného tónu při použití temperovaného ladění pro $a^1 = 442$ Hz. l_m je pak délka kmitající části struny (menzurační délka), l_k popisuje umístění úhozové linie, d je průměr průřezu struny a v předposledním sloupci tabulky můžeme nalézt poměrné vyjádření vzdálenosti úhozové linie od bližšího okraji menzury k celkové menzurační délce. Veličina n pak v tomto případě popisuje počet strun ve svazku.

Nástroj byl v době měření temperovaně naladěn na $a^1 = 442$ Hz. U kladívek byla provedena běžná forma úprav v podobě intonace nástroje během výrobního procesu.

Tab. 6.1: Základní hodnoty parametrů popisujících strunový potah Ant u vybraných kláves

	f_0 [Hz]	l_m [mm]	l_k [mm]	l_k / l_m [/]	poměr [/]	n [/]	d [mm]
A ²	27,63	2090,3	261,3	0,125	1 : 8,0	1	-
A ¹	55,25	1697	212,1	0,125	1 : 8,0	2	-
A	110,5	1525	203,6	0,134	1 : 7,5	3	1,125
a	221	780	97,5	0,125	1 : 8,0	3	1,075
a ¹	442	404	50,5	0,125	1 : 8,0	3	1,025
a ²	884	215	19,2	0,089	1 : 11,2	3	0,95
a ³	1768	114	7,5	0,066	1 : 15,2	3	0,875
a ⁴	3536	60,9	2,9	0,048	1 : 21,0	3	0,8

6.2.2 Mistrál

Druhý měřený nástroj byl klavír značky Petrof konkrétně model P 284 Mistral (dále jen Mist). Jedná se stejně jako v případě Ant o velký koncertní nástroj. Mist přestože je se svou délkou 284 cm téměř o 10 cm delší než Ant, je lehčí a to o 12 kg, což bude nejspíše způsobeno použitím jiných materiálů při konstrukci. Mist má také vzhledem k větším rozměrům větší aktivní plochu rezonanční desky a to 2,029 m². Materiál

pro výrobu rezonanční desky je v případě obou nástrojů totožný, a stejné je to i u kobylek. U Ant je kostra nástroje z buku, zatímco u Mist je vyrobena z dvanácti lamel z buku a břízy. Rozdíl nacházíme také u materiálu, ze kterého je vyroben kolíčník, u Ant je vyroben z kanadského Javoru, u Mist z překližky. Oba nástroje pak mají rezonanční desku vyztuženou šestnácti žebry.

Dělení strun mezi basovou a diskantovou kobylku se také liší. Ant má 20 basových strun a Mist 18. Odlišný je také počet opředěných strun a to 21 u Ant a 18 u Mist. Dělení strun do chórů je totožné u obou nástrojů. Poměr délky všech alikvótů vzhledem k menzuračním délkám příslušných strun je u obou nástrojů totožný. Zadní alikvóty Mist však sahají až k ais v porovnání s d^1 u Ant. Základní parametry strunového potahu u vybraných kláves popisuje tabulka 6.2.

Tab. 6.2: Základní hodnoty parametrů popisujících strunový potah Mist u vybraných kláves

	f_0 [Hz]	l_m [mm]	l_k [mm]	l_k / l_m [/]	poměr [/]	n [/]	d [mm]
A ²	27,63	2080	2610	0,125	1 : 8,0	1	-
A ¹	55,25	1743	222,4	0,128	1 : 7,8	2	-
A	110,5	1477	191,6	0,130	1 : 7,7	3	1,15
a	221	780	103,4	0,133	1 : 7,5	3	1,075
a ¹	442	404	53,4	0,132	1 : 7,6	3	0,975
a ²	884	215	20,8	0,097	1 : 10,3	3	0,952
a ³	1768	115	8,2	0,071	1 : 14,0	3	0,875
a ⁴	3536	61	3,2	0,052	1 : 19,0	3	0,8

U Mist pak narozdíl od Ant výrobce doslovně uvádí dodavatele mechaniky a kladívek. Mechanika je od firmy od firmy Renner a jedná se o model standard, kladívka jsou pak od stejné firmy z řady Renner original.

Mist byl v době měření také temperovaně naladěn na $a^1 = 442$ Hz. U kladívek byla taktéž provedena běžná forma úprav v podobě intonace nástroje během výrobního procesu. Oba nástroje byly naladěny týmž ladičem.

7 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

V této kapitole je nejprve proveden výčet sledovaných jevů a vlastností nástrojů, které byly porovnávány. A v následujících podkapitolách jsou hodnoceny jednotlivé sledované parametry.

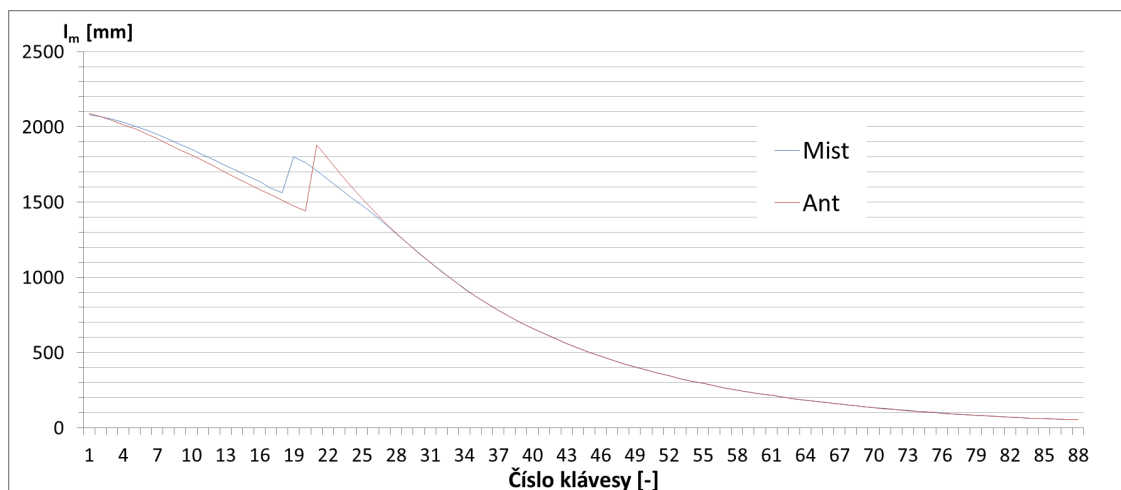
Vzhledem k nedostatku potřebného měřicího vybavení a nedostatku (nebo nutnosti utajení) některých informací dodaných výrobcem, nebylo možné získat a publikovat všechna data charakterizující nástroje požadovaná v zadání práce. Neznáme tak například konkrétní parametry kladívek jako je tuhost a hmotnost (mimo jiné i proto, že by bylo nutné nástroj alespoň částečně demontovat). Přestože to zadání práce požaduje, neměřili jsme plochu, kterou se kladívka dotýkají strun, neboť jak už bylo zmíněno v kapitole 3.1, nemá tento parametr natolik významný vliv na výsledný tón, abychom se jím v rámci omezeného rozsahu práce zabývali (měření by opět vyžadovalo demontáž hrací mechaniky). Dále nebylo možné získat data ohledně vlastních módů rezonátoru, proto můžeme pouze orientačně vycházet z výsledků měření provedených u nástrojů podobného rozměru (dostupné např. v [22]).

Předmětem hodnocení tak bude porovnání parametrů strunového potahu obou nástrojů, porovnání dynamických vlastností nástrojů v závislosti na nastavení síly úhozu měřicí lavice, srovnání průběhů dynamické obálky tónu a doby doznění v závislosti na dynamice a analýza spektra taktéž v závislosti na dynamice. V rámci příslušných podkapitol z výše zmíněného výčtu také budou komentovány jevy absence fundamentu, doubledecay, a phantom partials.

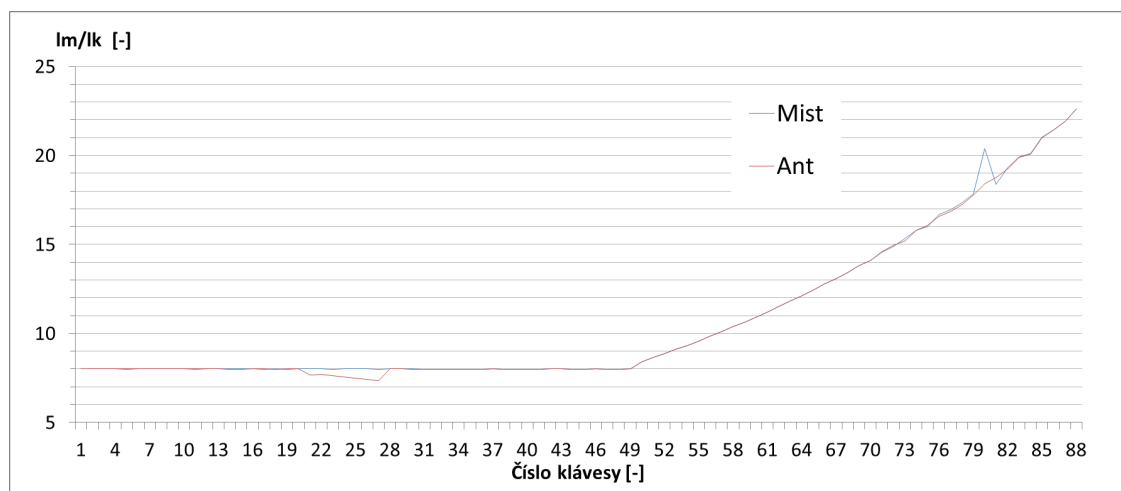
7.1 Parametry strunového potahu

Strunové potahy obou měřených nástrojů jsou si vzhledem k téměř totožným rozměrům klavírů velmi podobné. Jejich podobnost je jasně patrná z grafů na obrázcích 7.1, 7.2 a 7.3, které zobrazují závislosti menzurační délky struny, místa úderu kladívka na strunu a průměru kolmého průřezu strunou na čísle klávesy.

V případě menzurační délky vidíme jasně přechod mezi basovou a diskantovou kobyolkou. Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.2, jsou oba strunové potahy z hlediska použití chórů a alikvótu totožné. Dělení strun na opředené a hladké a basové a diskantové se však u obou nástrojů liší (u Ant 20 opředěných a u Mist 19, u Ant 20 basových a u Mist 18). Tento konstrukční zlom (rozdělení na bas a diskant) můžeme spatřit také na grafu zobrazujícím poměr vzdálenosti, kde se kladívko dotkne struny ku menzurační délce. Zde je tento přechod patrný u pouze Ant. Na grafu 7.2 můžeme pozorovat, jak se od dvoučárkované oktávy směrem nahoru rychle mění poměrové vyjádření umístění úhozové linie se zkracující se menzurační délkou.



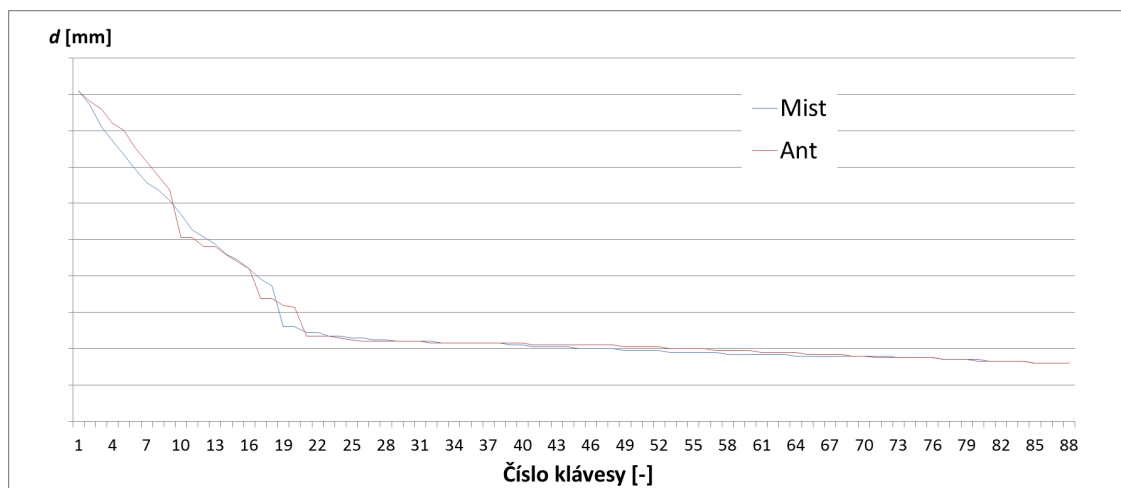
Obr. 7.1: Porovnání menzurační délky strun



Obr. 7.2: mf

Na obrázku 7.3 pak můžeme porovnat průměry kolmého průřezu strunou u obou nástrojů. V base je možné pozorovat jisté rozdíly, ale od poloviny velké oktávy jsou již opět oba strunové potahy téměř totožné. Vzhledem k utajení výrobních informací tento graf neobsahuje konkrétní hodnoty.

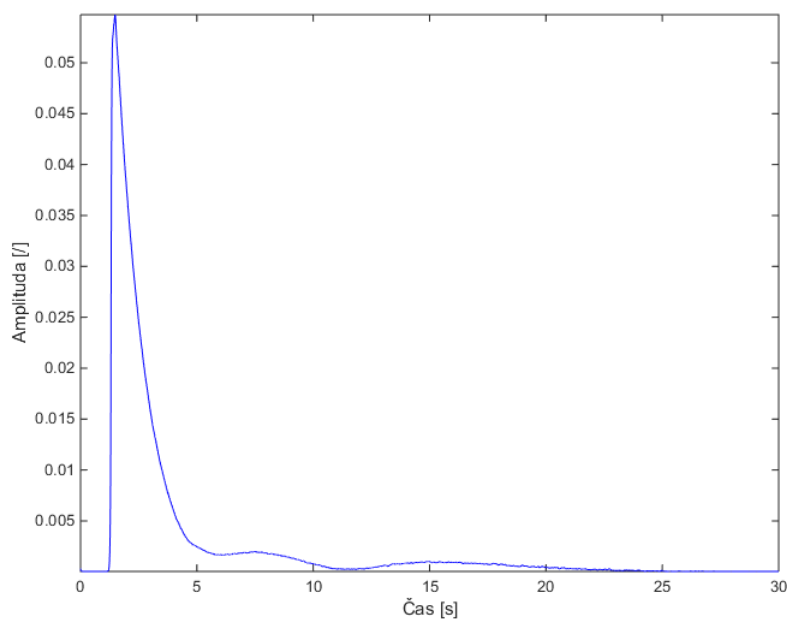
Jak již bylo řečeno, u strunového potahu neshledáváme žádné významné rozdíly mezi nástroji, snad kromě drobné odlišnosti u rozdělení strun na basové a diskantové a použití jiného počtu opředěných strun. Rozdíly v konstrukci nástrojů způsobující odlišný tón tak budou nejspíše patrné v dalších oblastech konstrukčního řešení a v oblasti použitých materiálů. Ty tato práce vzhledem ke svému charakteru a rozsahu nemůže uspokojivě pokrýt.



Obr. 7.3: Porovnání průměru kolmého průřezu strunou

7.2 Průběh dynamické obálky a doba doznění

U perkusivních nástrojů můžeme oproti běžnému členění na fáze attack, decay, sustain a release nalézt pouze fáze attack a decay.

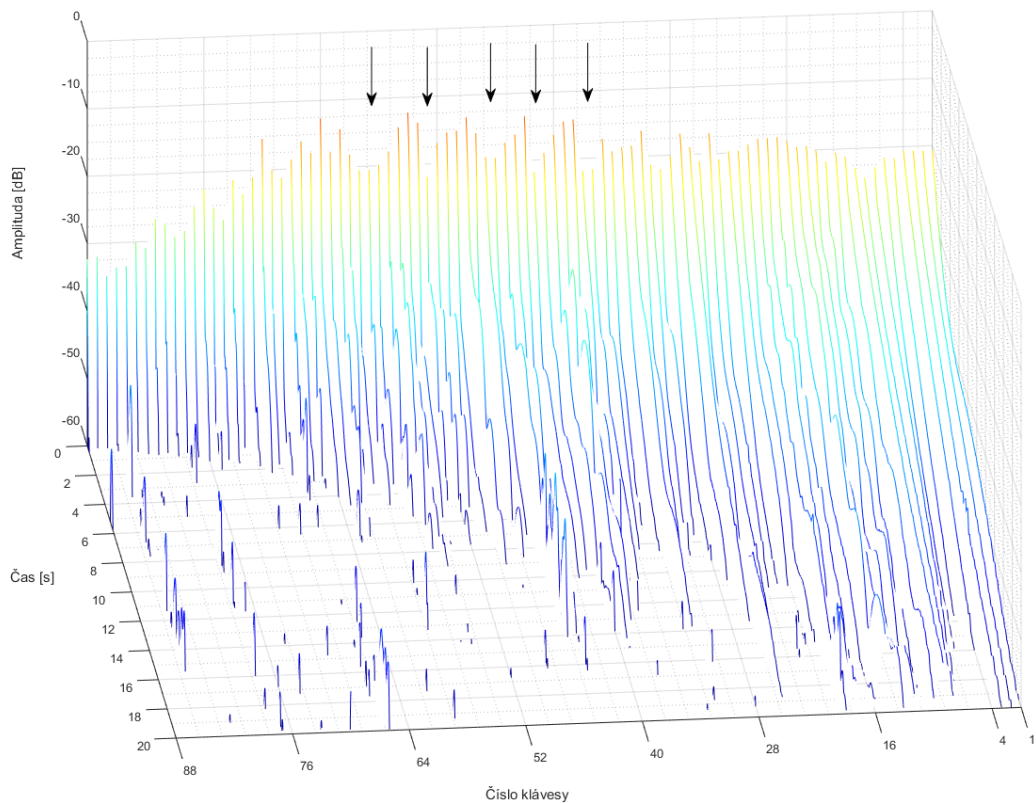


Obr. 7.4: Ilustrační graf průběhu dynamické obálky tónu klavíru

U klavíru pak navíc můžeme pozorovat tzv. double decay. Jedná se o jev, při němž po dosažení svého vrcholu ve fázi attack křivka popisující průběh dynamické obálky nejprve strmě klesá (fáze decay1) a následně klesá daleko pozvolněji až do úplného odeznění. Tuto fázi (cca 5. až 25. sekunda na obrázku 7.4 označujeme jako

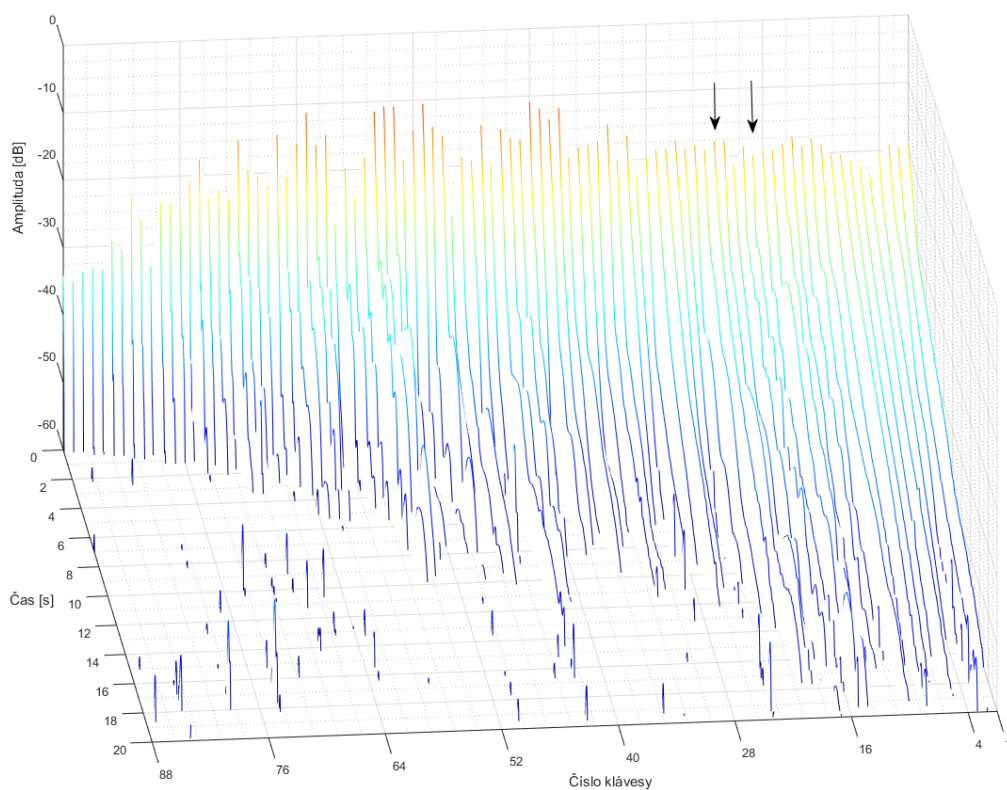
decay2. Ve fázi decay1 je hlavním zdrojem energie tónu kmitání struny ve směru kolmém na rezonanční desku, ve fázi decay2 je to naopak kmitání struny v horizontální rovině. Strmost poklesu ve fázi decay1 pak přímo souvisí s impedančním přizpůsobením mezi oscilátorem a rezonátorem. Strmost poklesu je v případě chórů možné ovlivnit i během ladění a dosáhnout tak prodloužení fáze decay1. Ve fázi decay2 pak často dochází k tzv. „dýchání“, kdy na křivce dynamické obálky můžeme pozorovat periodická zvlnění. Tento jev je zapříčiněný tím, že u klavíru jsou struny nataženy většinou ve svazcích (zvaných chóry) po dvou až třech kusech za účelem zvýšení akustického výkonu nástroje. Struny ve svazku jsou však obvykle v průběhu ladění vzájemně jemně rozladěny. To způsobuje vzájemný fázový posuv v jejich kmitání a tímto způsobené rázy se tak projevují v podobě již zmíněného „dýchání“.

Zobrazení průběhů dynamických obálek tónů obou nástrojů při dynamice mf můžeme vidět na grafech 7.5 a 7.6.



Obr. 7.5: Matice dynamických obálek tónů Ant

Je zde patrná obecná tendence vývoje délky not u klavírů. V basech trvá dlouho, než tón odezní a tento čas se směrem k vyšším tónům postupně zkracuje, což je další komplikace při snaze o detailní a zároveň kompletní zobrazení jakékoliv analýzy



Obr. 7.6: Matice dynamických obálek tónů Mist

klavíru.

V basech je u obou nástrojů jasně patrný přechod mezi oblastí, kde je použita pouze jedna struna na každou klávesu (klávesy 1-9), a zbytkem nástroje, kde jsou už struny vždy v chórech. U kláves 1-9 není možné, v porovnání se zbytkem nástroje, spatřit efekt „dýchání“. Dále je zajímavé pozorovat míru „dýchání“ napříč celým nástrojem. U některých kláves je velmi výrazné a u jiných ve stejné oblasti nástroje téměř není (oba extrémny jsou na grafu 7.6 označeny šipkou). Míru dýchání přímo ovlivňuje ladič. Bylo by tak zajímavé například provést několik měření stejného nástroje při opakovaném naladění tímž ladičem a sledovat takto vzniklé změny. Toto zobrazení může tak být užitečné pro přímou reflexi ladiče. Výrazné dýchání u konkrétních tónů naopak může nasvědčovat přítomnosti „hluchého místa“ s příliš krátkou fází decay1, kterou se snaží ladič prodloužit do takové míry, že rozladěním dojde k výraznému dýchání. Pro potvrzení těchto dohadů by však muselo být provedeno více měření spojených s konzultací s ladiči.

Při celkovém porovnání obou nástrojů jsou pak na první pohled patrné jisté podobnosti. Například nápadný výskyt oblastí s výrazným dýcháním tónů a oblastí,

kde je dýchání naopak téměř nemožné pozorovat. U obou nástrojů se tento jev výrazněji projevuje v oblasti přechodu mezi kontra a velkou oktávou (klávesy 10-20). A naopak téměř chybí v oblasti kláves 20-39 u Mist a 20-34 u Ant.

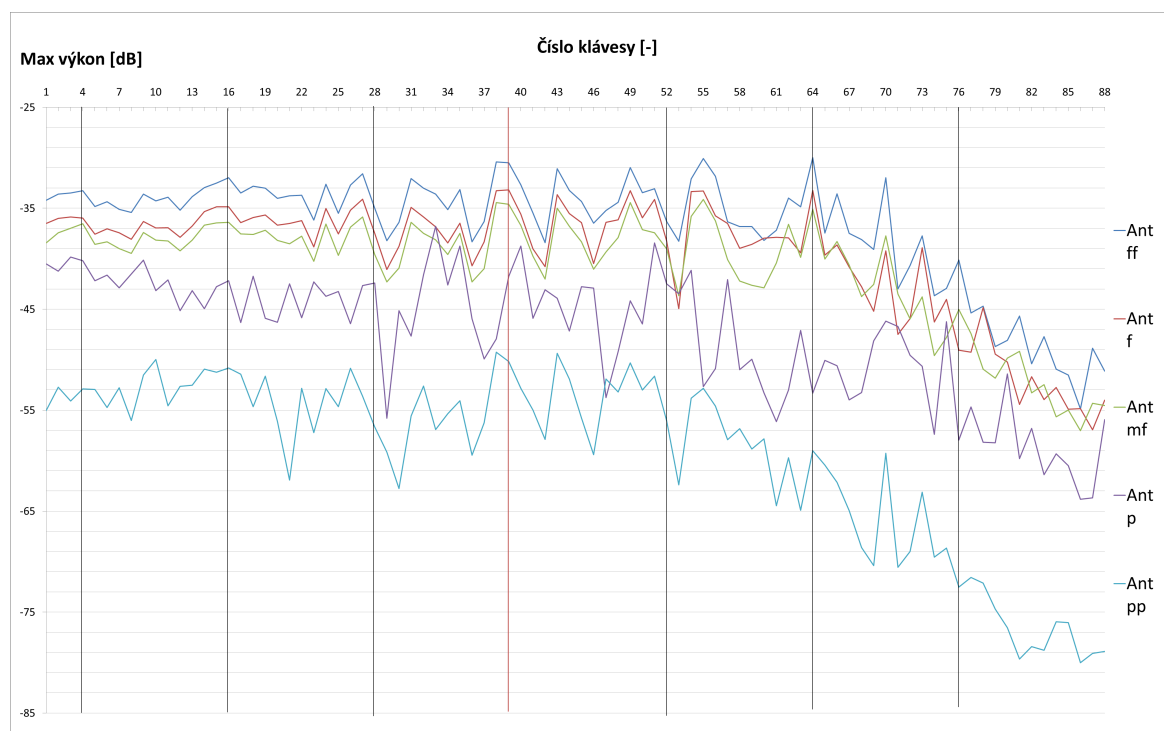
Dále je možné si všimnout u Ant téměř periodického výskytu lokálních minim mezi 37. a 60. klávesou (v grafu označeno šipkami).

Ani u jednoho z výše komentovaných úkazů se nám nepodařilo najít spojitost s konkrétními aspekty konstrukčního řešení. I tak tato zjištění poskytují výrobcí relevantní informaci a podklady pro další vlastní analýzu problematiky.

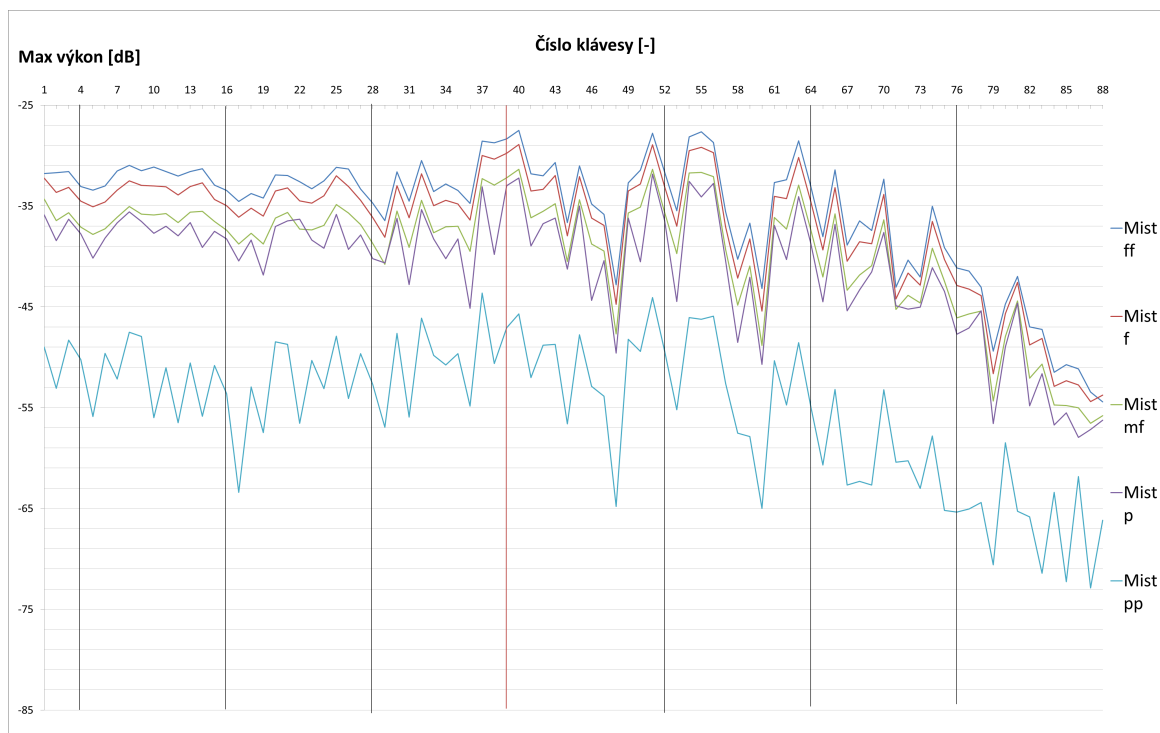
Dovolím si připomenout, že jakékoliv porovnávání absolutních hodnot zobrazených veličin u obou nástrojů může být, kvůli jinému zesílení signálu z mikrofonu při získávání vzorků, velmi zavádějící.

7.3 Maximální výkon signálu

Další sledovanou veličinou je závislost maximálního výkonu signálu na nastavení síly úhazu měřicí lavice. Výsledky měření můžeme vidět na obrázcích 7.7 a 7.8. Na první pohled je patrné nerovnoměrné rozvrstvení výkonu dynamických hladin při použití výchozích nastavení lavice doporučených výrobcem. Stejně výsledky ukazuje také [6].



Obr. 7.7: Maximální výkon Ant v závislosti na dynamice hry



Obr. 7.8: Maximální výkon Mist v závislosti na dynamice hry

Dynamická hladina námi označovaná *pp* přibližně odpovídá minimální síle potřebné pro stisk klávesy, při které je kladívko ještě vymrštěno až ke struně. Proto můžeme předpokládat, že interpret nebude schopen běžně takovéto dynamiky při hře dosáhnout.

Z grafů je patrné, že při stejné síle úhozu v dynamice *p* v relativním srovnání s dynamikou *mf* každého z nástrojů je Ant výrazně slabší než Mist, což může být značnou výhodou, neboť hlavně v komorní hudbě bývá výrazné dynamické odstínění často požadováno.

Naopak u Ant je právě při hře *p* nástroj dynamicky značně nevyrovnaný a zvláštností je, že křivka této dynamické hladiny nekopíruje ostatní křivky a u některých kláves tak bude docházet k nepřirozeným změnám při přechodu mezi sousedními dynamickými hladinami. Uspokojivé vysvětlení tohoto výsledku měření se zatím nepodařilo najít. Pro potvrzení této zvláštnosti nástroje by bylo nutné měření opakovat (žádné jiné dostupné zdroje takovéto chování neuvádí).

Celkově je však Ant (až na dvě nejslabší dynamické úrovně) vyrovnanější. U Mist mají všechny dynamické křivky přibližně stejný průběh, což zaručuje přirozený přechod mezi dynamickými hladinami a odpovídá teoretickému předpokladu a výsledkům dalších měření ([6]), avšak v oblasti kláves 36-76 je výrazně méně dynamicky vyrovnaný než Ant.

V místech, kde jsou výrazné výkyvy v dynamických křivkách, by bylo, při zna-

losti mechanické impedanci oscilátoru a rezonátoru, možné hledat souvislosti s konstrukčním řešením. Hodnoty těchto veličin jsme však neměli k dispozici.

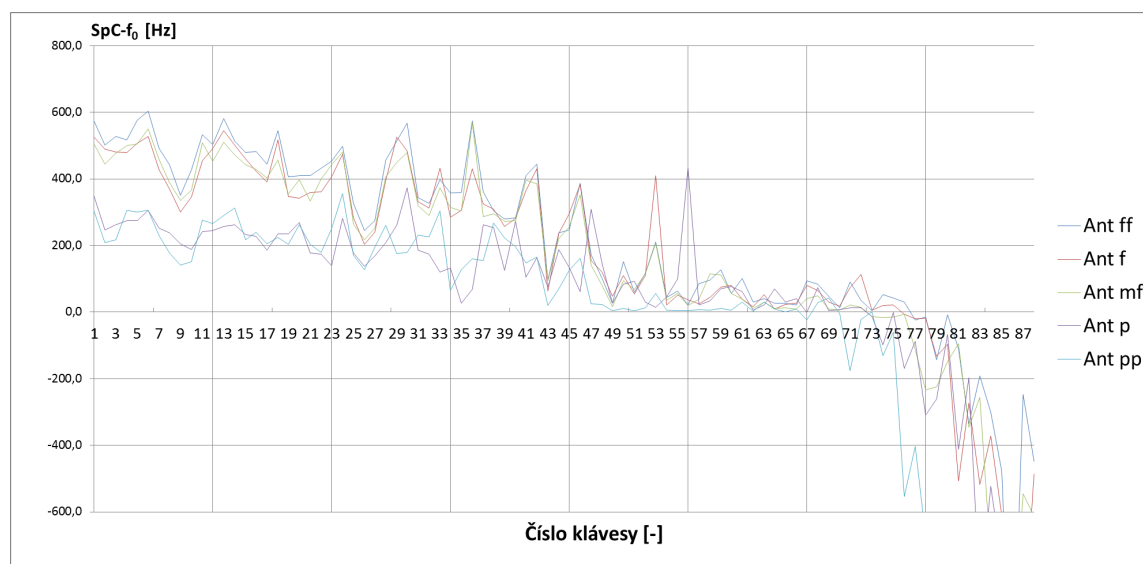
Pro odpovídající přímé srovnání nástrojů by bylo nutné pomocí SPLmetru měřit přímo hladiny akustického tlaku a ty porovnávat. Ten jsme však v době měření neměli k dispozici, protože toto srovnání nebylo předmětem zadání práce. I tak mohou být tyto výsledky pro výrobce cenné a vhodné pro následné bližší porovnání s různými aspekty konstrukčního řešení nástroje.

7.4 Výsledky spektrální analýzy

Při zkoumání barvy tónu měřených nástrojů bylo využíváno všech analytických možností představených v podkapitole 5.3. Pro získání celkového obrazu o měřeném nástroji je vhodné nejprve využít zobrazení umožňující hromadné hodnocení všech tónů nástroje, jmenovitě pak zobrazení frekvenční závislosti spektrálních centroidů a 3D podobu zobrazení CLS. Pro následnou detailnější analýzu jednotlivých tónů je vhodné použít spektrogram.

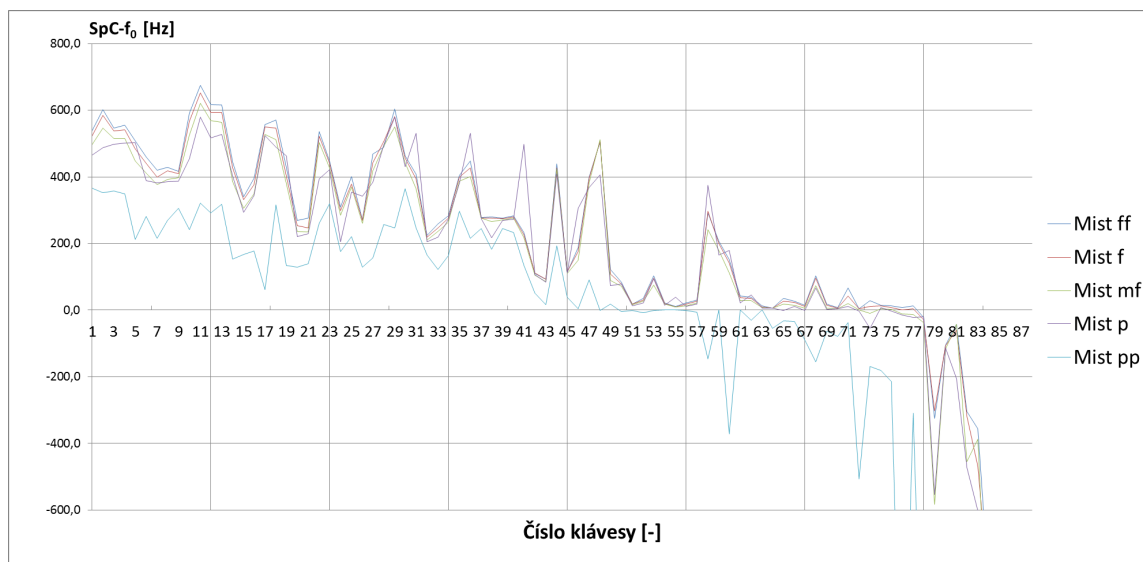
7.4.1 Spektrální centroid

Na obrázcích 7.9 a 7.10 vidíme zobrazení hodnot spektrálních centroidů všech tónů po odečtení frekvence jejich fundamentu.



Obr. 7.9: $SpC - f_0$ pro různé dynamické úrovně u Ant

Můžeme tak snadno pozorovat o kolik se spektrální centroid liší oproti poloze fundamentu, kterou tak reprezentuje přímo osa x. Jak již bylo naznačeno v předchozích kapitolách, základním barevným charakterem pianu je značný nepoměr mezi



Obr. 7.10: SpC – f_0 pro různé dynamické úrovně u Mist

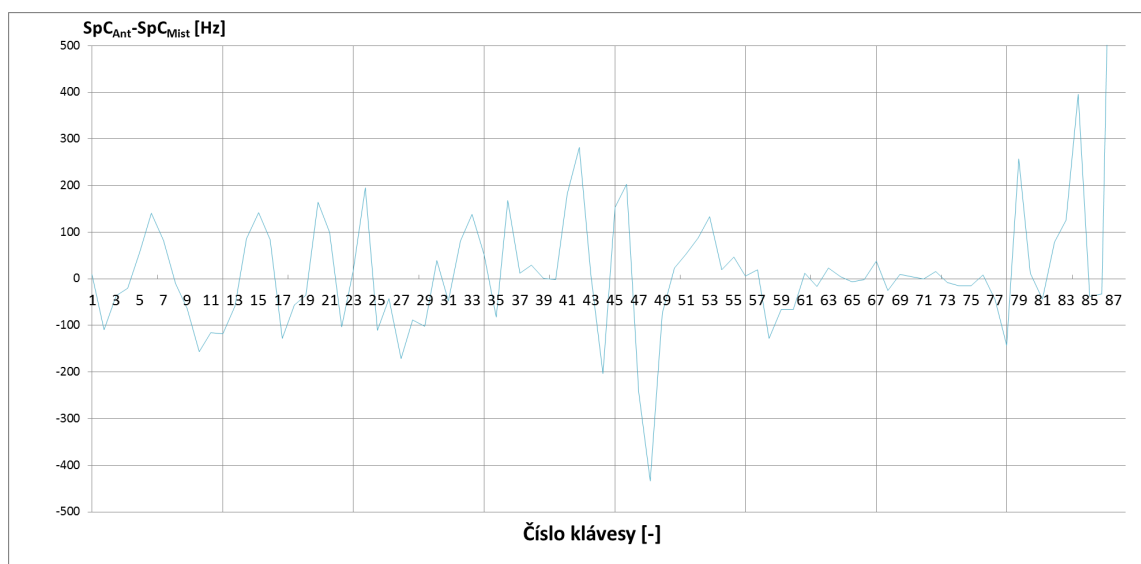
barvou nižších a vyšších tónů nástroje. Konkrétně pak to, že basy jsou bohaté na vyšší harmonické a směrem nahoru se spektrum tónů zužuje, až nakonec tón sestává pouze z malého počtu harmonických. Tomu odpovídá základní průběh zobrazených křivek, který má klesající tendenci. U vysokých tónů pak v rámci celého zvuku nabývají na důležitosti ruchy a hluky vznikající při hře, které jsou u nižších tónů maskovány tónem samotným. Tento jev je patrný obzvláště při dynamicky slabší hře. Proto také vidíme velmi prudké a chaotické výkyvy v oblasti od klávesy 77 výše. V dynamice *pp* k tomuto jevu dochází výrazně dříve.

Ve většině případů můžeme také pozorovat splnění teoretického předpokladu o vývoji barvy tónu se změnou dynamiky. Při dynamicky slabší hře jsou v tónu výrazně zastoupeny pouze harmonické nižších pořadových čísel a při silnější hře se jejich počet naopak výrazně zvyšuje. Tomu také odpovídají nižší hodnoty spektrálních centroidů pro dynamicky slabší hladiny. U obou nástrojů však nalezneme konkrétní klávesy, u kterých je dosaženo nejvyšší hodnoty při hře jinou dynamikou než *ff* (např. klávesy 31, 36, 41, a 58. u Mist při hře *p* a klávesy 47 a 56 a 53 u Ant). Tento jev je možné pozorovat i u výsledků měření popsanych v [6] a zatím nebyl jakkoliv blíže komentován ani vysvětlen. Pro jeho interpretaci by byla nutná bližší analýza parametrů oscilátorů a excitátorů zmíněných tónů obou nástrojů a konzultace s intonérem, který na nástroji pracoval, což může být předmětem navazující vlastní analýzy výrobce na základě podkladů získaných z této práce.

U Ant je také patrný výrazně odlišný průběh křivky reprezentující hru *p*, jako tomu bylo i u výše zmíněných pozorování maximálních hodnot výkonu signálu.

Vzhledem k tomu, že hodnota koeficientů Fourierovy transformace používaná pro výpočet spektrálního centroidu závisí na zesílení signálu z mikrofonu při záznamu,

opět nemůžeme použít spektrální centroid pro přímé porovnání obou nástrojů. Bylo by možné všechny audio vzorky nejprve normalizovat a až poté stanovit spektrální centroid, avšak tím by naopak došlo ke zkreslení souvislosti dynamických rozdílů a barvou. Proto jsme zvolili *mf* jako reprezentativní dynamiku pro porovnání a vzorky obou nástrojů při této dynamice normalizovali. Následně jsme znovu stanovili hodnoty spektrálních centroidů. Výsledky vidíme na obrázku 7.11, kde jsou zobrazeny přímo jako rozdíl hodnot Ant – Mist. Avšak ani z tohoto porovnání, kvůli



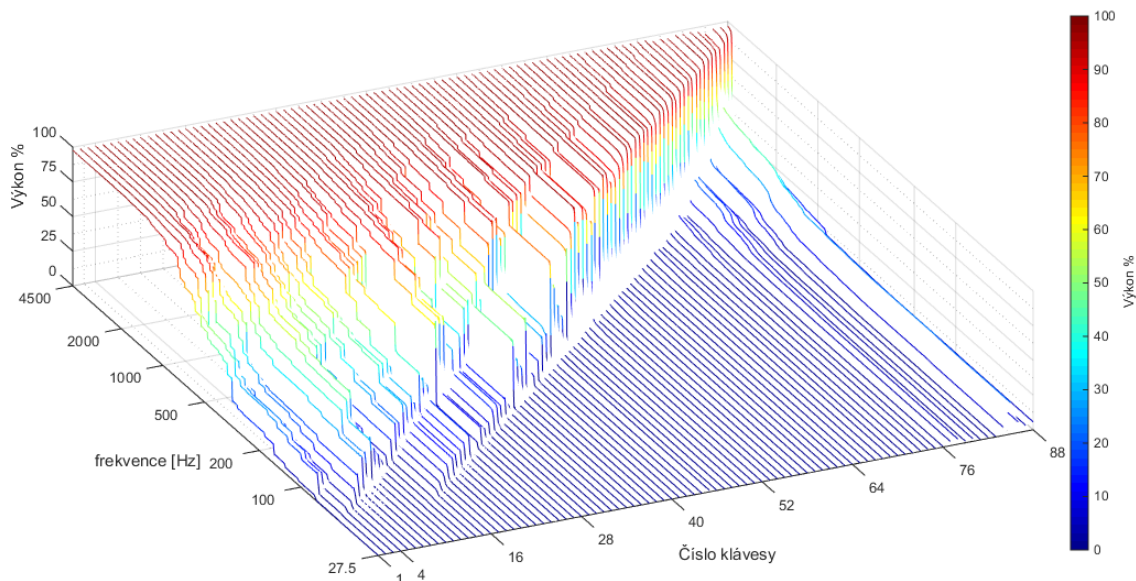
Obr. 7.11: Rozdíl hodnot SpC obou nástrojů po normalizaci hlasitosti vzorků

značné chaotičnosti průběhu křivky, není možné jednoznačně určit, který nástroj má více energie ve vyšších harmonických a díky tomu i vyšší hodnoty SpC.

7.4.2 Matice CLS

Při hromadném porovnání 3D zobrazení CLS všech tónů obou nástrojů můžeme jasně vidět vývoj distribuce výkonu mezi harmonickými (obrázky 7.12 a 7.13).

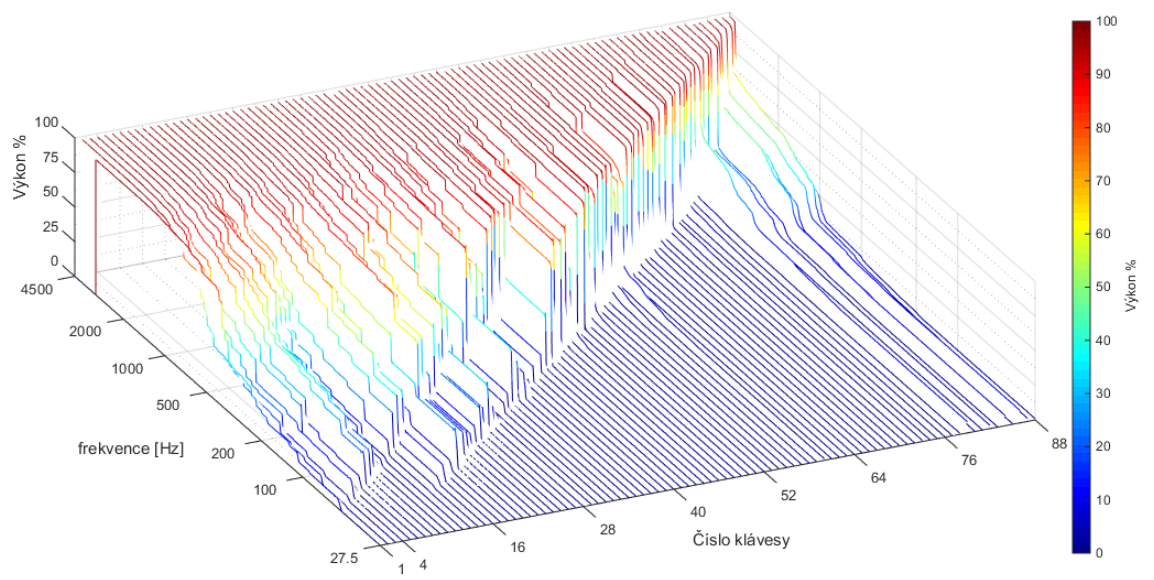
U obou nástrojů je jasně patrná absence energie ve fundamentu u nejhlubších tři- nácti tónů. Tento jev bývá dáván často do souvislosti s 1. módem rezonátoru, který bývá u nástrojů této velikosti v oblasti 55 – 70 Hz.[22] Fundament začíná disponovat pozorovatelným množstvím energie teprve u 13. klávesy s frekvencí fundamentu 55 Hz, což odpovídá teoretickému předpokladu. Dále je jasně patrná tendence postupného přesunu energie směrem k fundamentu se zvyšujícím se číslem klávesy. Ve čtyřčárkované oktávě pak jasně vidíme množství energie ležící pod úrovní fundamentu, které odpovídá energetickému příspěvku hluků vzniklých při hře.



Obr. 7.12: Matice CLS při hře *mf* u Ant

Dalo by se předpokládat, že v místech, kde dochází k významným konstrukčním zlomům (přechod bas–diskant, opředené struny–hladké struny), bude možné pozorovat i konkrétní barevné zlomy, ty jsme však nezaznamenali.

Při porovnání CLS obou nástrojů můžeme konstatovat, že nejsou patrné žádné významnější odlišnosti, které by nebyly lokálního charakteru a mohly by mít za následek subjektivně rozpoznatelný rozdíl v barvě nástrojů. U obou nástrojů jsou však z grafů CLS patrné výrazné barevné rozdíly především v rámci velké a malé oktávy, kde vývoj změny v kontextu celého nástroje není plynulý. Toto zjištění může výrobcům napovědět, na které oblasti nástroje je potřeba se z hlediska barevné vyrovnanosti zaměřit.



Obr. 7.13: Matice CLS při hře *mf* u Mist

8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provedení měření dvou typově podobných klavírů v různých dynamikách, následná analýza vzorků tímto měřením získaných a hledání souvislostí výsledků analýzy s konstrukčním řešením. Aby toto bylo možné, bylo nejprve nutné detailněji promluvit o metodice návrhu a konstrukce nástroje a jeho součástí a o úskalích s tím spojených. S tím souvisí uvedené rozbory výrobních postupů rezonančních desek, kladívkové plsti a kladívek, popis vývoje a funkce klavírové mechaniky a dalších součástí nástroje a jejich funkcí v mechanicko-akustickém řetězci.

Z fyzických parametrů nástroje, jejichž konkrétní hodnoty dodal výrobce nástroje, je nejpatrnější souvislost mezi umístěním úhozové linie kladívka na struně a přítomností ve spektru se vyskytujícími antiformantových oblastí odpovídajících poměrnému vyjádření umístění úhozové linie k menzurační délce, jejichž souvislost již byla mnohokrát popsána a je odborné veřejnosti dobře známa. Na základě výsledků analýzy nebylo možné poukázat na žádné další konkrétní spojení zvukových vlastností s vlastnostmi strunového potahu a dalších elementů konstrukčního řešení.

V oblasti porovnání výkonu signálu získaného audio vzorku s nastavením dynamiky úhozu měřicí lavice byly prokázány jasné rozdíly v rozložení výkonových hladin obou nástrojů a s tím související důsledky pro hru. Pomocí zobrazení matice dynamických obálek všech tónů pak byly detailněji komentovány časové průběhy, doba dozívání tónů, míra výskytu efektu „dýchání“ a vlivy tyto jevy způsobující. Konkrétní pozorování provedená v této oblasti mohou, při dostatečném množství změřených nástrojů, pomoci výrobcům při efektivním odhalování konstrukčních nedostatků a při konzultaci s ladiči a intonéry objektivně hodnotit akustické vlastnosti problémových oblastí nástrojů.

Při snaze o porovnání barvy obou nástrojů pomocí spektrální analýzy jsme nenašly uspokojivý průkaz odlišnosti nástrojů, kterou však při sluchové analýze subjektivně vnímáme. Oba nástroje vykazují téměř totožné barevné charakteristiky jak při popisu metodou CLS, tak při porovnávání hodnot spektrálních centroidů. Vzhledem k velké variabilitě rozložení energie mezi prvními barvotvornými harmonickými nebylo možné provést porovnání selekce vzorků z obou nástrojů, aniž by došlo k výraznému zkreslení popisu základního barevného charakteru nástrojů. Na základě výsledků CLS však můžeme jasně konstatovat, že v případě obou nástrojů nejsou velká a malá oktáva z hlediska distribuce energie mezi harmonickými příliš vyrovnané. Zajímavé by tak bylo porovnání s nástroji jiných výrobců. V případě provedení měření většího počtu nástrojů stejného modelu by pak bylo možné odlišit barevné výkyvy lokálního charakteru konkrétního nástroje od těch, které charakterizují daný model nástroje.

Mimo jiné se v rámci plnění zadání této práce podařilo nasbírat velké množství

audio vzorků (oba klavíry změřeny v pěti dynamikách včetně směrovosti vyzařování v rozsahu 180° s přesností 12°), které mohou být podrobeny dalším analýzám a porovnání s dalšími nástroji. V těchto zmíněných oblastech můžeme spatřovat potenciál pro další navazující práci.

LITERATURA

- [1] PRACH, Josef. *Stavba klavírů a pianin a její problematika: metodická příručka pro učitele konzervatoří, hudebních a tanečních škol a střední ladičské školy při konzervatoři pro mládež s vadami zraku ; Josef Prach*. Praha: SPN, 1987.
- [2] 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.
- [3] Hornbostel—Sachs. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Hornbostel%E2%80%93Sachs#Composite_chordophones_.2832.29
- [4] *Renner Piano Hammerheads* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://rennerusa.com/products/renner-piano-hammerheads/>
- [5] *ABEL hammer company* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://abel-pianoparts.de/index.php?index=1&lng=en>
- [6] TAN, Jin Jack. *Metrics for objective comparison of pianos played by an automated play bench*. Liberec, 2017.
- [7] SMĚLÝ, Pavel. *Analýza časově proměnného spektra klavírů*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] KLÍMOVÁ, Hana. *Modální analýza rezonanční desky pianina metodou konečných prvků*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně.
- [9] MELKA, Alois. *Základy experimentální psychoakustiky*. Praha: Akademie múzických umění, 2005. ISBN 80-7331-043.
- [10] *ANT. PETROF 275, technická specifikace* [online]. [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: <http://antpetrof.cz/cs/#fndtn-nastroje-275>
- [11] *Spectral analysis of musical sounds with emphasis on the piano*. Oxford: Oxford University Press, 2015. ISBN 978-0-19-872290-8.
- [12] WEINREICH, Gabriel. *The coupled motion of piano strings* [online]. In: . Royal Swedish Academy of Music, 1990, s. 7 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://www.speech.kth.se/music/5_lectures/weinreic/weinreic.html#introduction

- [13] HALL, Donald E. *The hammer and the string* [online]. In: . Royal Swedish Academy of Music, 1990, s. 6 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.speech.kth.se/music/5_lectures/hall/hall.html#intro
- [14] ASKENFELT, Anders a Erik JANSSON. *From touch to string vibration* [online]. In: . Royal Swedish Academy of Music, 1990, s. 14 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.speech.kth.se/music/5_lectures/askenflt/askenflt.html
- [15] WOGRAM, Klaus. *The strings and the soundboard* [online]. In: . Royal Swedish Academy of Music, 1990, s. 10 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.speech.kth.se/music/5_lectures/wogram/index.html
- [16] CONKLIN JR, Harold A. *Piano design factors* [online]. Royal Swedish Academy of Music, 1990, , 12 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.speech.kth.se/music/5_lectures/conklin/conklin.html#top
- [17] ČSN 01 1600: *Akustika — Terminologie*. Česká technická norma. Český normalizační institut, 2003.
- [18] SCHIMMEL, Jiří. *Elektroakustika*. FEKT, 2012
- [19] SMĚKAL, Z., *Analýza signálů a soustav-BASS*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [20] Uncertainty principle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty_principle#Signal_processing
- [21] BURRED, Juan José. *The Acoustics of the Piano*. Madrid, 2004. Professional Conservatory of Music Arturo Soria.
- [22] Squicciarini, Giacomo & Corradi, R & al, et. *Modal analysis of a grand piano soundboard*. 2010. Politecnico di Milano, Department Mechanical Engineering.
- [23] BANK, Balazs a László SUJBERT. *MODELING THE LONGITUDINAL VIBRATION OF PIANO STRINGS* [online]. In: . 2003, s. 4 [cit. 2018-05-28]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/0f98/97121ddce39237e82ef95f1aff8631a60f15.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

<i>pp</i>	pianissimo - v hudebním názvosloví znamená velmi slabě
<i>p</i>	piano - v hudebním názvosloví znamená slabě
<i>mf</i>	mezzoforte - v hudebním názvosloví znamená středně silně
<i>f</i>	forte - v hudebním názvosloví znamená silně
<i>ff</i>	fortissimo - v hudebním názvosloví znamená velmi silně
FFT	Fast Fourier Transform - algoritmus pro rychlý výpočet diskrétní Fourierovy transformace
CLS	Cumulative line spectrum - veličina kterou získáme postupnou sumací čtverců spektrálních koeficientů a poměrovým vyjádřením průběžné hodnoty této sumy vůči její výsledné hodnotě v závislosti na frekvenci
ADAT	Alesis Digital Audio Tape, digitální rozhraní pro vícekanálový přenos zvuku
Ant	klavír ANT. PETROF 275
Mist	klavír P 284 Mistral