

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ANALÝZA SPEKTRA A SMĚROVOSTI XYLOFONU, VIBRAFONU A ZVONKOHRY

THE SPECTRAL AND DIRECTIONAL ANALYSIS OF XYLOPHONE, VIBRAPHONE AND GLOCKENSPIEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Hoffman

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Pavel Hoffman

ID: 195762

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Analýza spektra a směrovosti xylofonu, vibrafonu a zvonkohry

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Student změří a vyhodnotí spektra vybraných tónů hraných různě tvrdými paličkami alespoň ve třech odlišných dynamikách. Zároveň změří a vyhodnotí směrové vyzařování nástrojů. Provede porovnání mezi jednotlivými melodickými bicími nástroji. Výstupem bakalářské práce bude komparace spekter – jednotlivých harmonických i inharmonických složek, porovnání pásem v harmonických spektrech i formantových oblastí ve spektrech. Rovněž porovná směrové grafy – jak tónů hraných různě tvrdými paličkami v odlišných dynamikách na stejném nástroji, tak mezi nástroji různými, tedy zvonkohrou, xylofonem a vibrafonem. Pokud se u měřených nástrojů objeví shodné inharmonické vzorce, měl by je popsat akusticky, ale i hudebně (notačně) a určit, do jaké míry se podílejí na charakteru a osobitosti daného nástroje.

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: 1.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

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

Bakalářská práce se zabývá analýzou spektra a směrovou charakteristikou idiofonních nástrojů, xylofonu, vibrafonu a zvonkohry. Při analýze spektra jsou rozebrány různé detaily, které by mohly mít vliv na spektrum daného nástroje, především na jeho inharmonicitu, tedy vliv tvrdosti paličky, dynamiky a místa udeření paličky do bloku (kamene, destičky). Zkoumá změny v pásmech harmonické řady a formantových oblastí nástrojů. Dále práce popisuje paličky, nástroje samotné, teoretický základ a jakým způsobem byly pořizovány a zpracovávány vzorky tónů.

Klíčová slova

Xylofon, vibrafon, zvonkohra, spektrum tónu, dynamika, tvrdost paličky, analýza spektra, směrová charakteristika

Abstract

Bachelor's thesis deals with spectral analysis and directional characteristics of idiophonic instruments, xylophone, vibraphone and glockenspiel. It analyzes various details during spectral analysis, that could have an effect on the spectrum of a given instrument, and especially on its inharmonicity, thus analyzing its effect on the hardness of mallet, dynamics and the location of the mallet striking the bars (stones, wooden plates). It examines the changes in the harmonic range and the formant areas of instruments. The thesis further describes the mallets, the instruments themselves, theoretical base and the means by which the sound samples were acquired and processed.

Key words

Xylophone, vibraphone, glockenspiel, note spectrum, dynamics, hardness of mallet, spectral analysis, directional characteristics

HOFFMAN, Pavel. *Analýza spektra a směrovosti xylofonu, vibrafonu a zvonkohry* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118127>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Analýza spektra a směrovosti xylofonu, vibrafonu a zvonkohry“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph. D. za odborné vedení, konzultace a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph. D. za zapůjčení techniky potřebné k měření a také panu Mgr. Ctiboru Bártkovi za vypůjčení xylofonu, vibrafonu a zvonkohry. Poděkování patří Robinu Sevránkovi za hru na nástroje. V poslední řadě bych chtěl poděkovat rodinným příslušníkům za korektury pravopisu a podporu.

V Brně dne

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	13
1 Idiofony	14
1.1 Dřevěné idiofony.....	14
1.2 Kovové idiofony.....	14
1.3 Xylofon	15
1.4 Vibrafon.....	15
1.5 Zvonkohra.....	16
2 Druhy paliček pro hru na idiofony	17
2.1 Paličky obecně.....	17
2.1.1 Paličky pro vibrafon.....	17
2.1.2 Paličky pro zvonkohru.....	17
2.1.3 Paličky pro xylofon.....	18
2.2 Vliv paliček na barvu tónu	18
3 Hudební signál a jeho spektrum	19
3.1 Signál.....	19
3.2 Časový průběh hudebního signálu	20
3.3 Harmonická analýza	22
3.3.1 Harmonická řada.....	23
3.3.2 Inharmonicitá.....	24
3.3.3. Formantové oblasti	25
4 Popis měření	26
4.1 Postup měření spektrální analýzy	26
4.2 Postup měření směrové charakteristiky	26
4.3 Použité zařízení pro měření.....	27

4.4 Požadavky na hráče	27
5 Vyhodnocení měření spektrální analýzy	29
5.1 Analýza spektra xylofonu.....	29
5.1.1 Porovnání spektra v závislosti na místě udeření u xylofonu.....	29
5.1.2 Porovnání vlivu tvrdosti paliček a dynamiky u xylofonu	32
5.1.3 Porovnání tónů u xylofonu.....	33
5.1.4 Formantové oblasti u xylofonu.....	37
5.2 Analýza spektra vibrafonu.....	39
5.2.1 Porovnání spektra v závislosti na místě udeření u vibrafonu.....	39
5.2.2 Porovnání vlivu tvrdosti paliček a dynamiky u vibrafonu	42
5.2.3 Porovnání tónů u vibrafonu	43
5.2.4 Formantové oblasti u vibrafonu.....	47
5.3 Analýza spektra zvonkohry	49
5.3.1 Porovnání spektra v závislosti na místě udeření u zvonkohry	49
5.3.2 Porovnání vlivu tvrdosti paliček a dynamiky u zvonkohry	52
5.3.3 Porovnání tónů u zvonkohry.....	53
5.3.4 Formantové oblasti u zvonkohry	57
5.4 Porovnání nástrojů mezi sebou	59
6 Vyhodnocení měření směrové charakteristiky	61
6.1 Směrová charakteristika xylofonu.....	61
6.2 Směrová charakteristika vibrafonu.....	64
6.3 Směrová charakteristika zvonkohry	67
6.4 Porovnání směrové charakteristiky mezi nástroji	70
7 Závěr	71
7.1 Shrnutí	71

8 Doporučení	72
Literatura	73
Seznam příloh	74
A Obsah CD	75

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Paličky použité pro měření zleva: měkká, středně tvrdá a tvrdá.....	18
Obr. 3.1: Schéma obálky ADSR neperkusivního signálu [5].....	21
Obr. 3.2: Schéma obálky ADSR perkusivního signálu [5]	21
Obr. 3.3: Základní dělení spekter [4].....	23
Obr. 3.4: Harmonická řada	23
Obr. 5.1: Tón g^1 v notovém zápise	29
Obr. 5.2: Spektrogram úderu do středu destičky u xylofonu.....	30
Obr. 5.3: Spektrogram úderu do uzlu destičky u xylofonu	30
Obr. 5.4: Spektrogram úderu na okraj destičky u xylofonu	30
Obr. 5.5: Porovnání inharmonicity podle místa úderu u xylofonu.....	31
Obr. 5.6: Porovnání výkonu podle místa úderu u xylofonu	32
Obr. 5.7: Tón a^1 v notovém zápise	32
Obr. 5.8: Inharmonicity paliček u xylofonu	33
Obr. 5.9: Inharmonicity při různých dynamikách u xylofonu	33
Obr. 5.10: Tón c^1 v notovém zápise	34
Obr. 5.11: Spektrogram xyl-c1-mek-mf	35
Obr. 5.12: Spektrogram xyl-c1-mek-f.....	35
Obr. 5.13: Spektrogram xyl-c1-tvr-f.....	35
Obr. 5.14: Inharmonicity mezi tóny u xylofonu	36
Obr. 5.15: Generování harmonických s referenční hodnotou u xylofonu.....	36
Obr. 5.16: Generování harmonických složek u xylofonu.....	37
Obr. 5.17: Formantové oblasti xyl-h1-mek-f	37
Obr. 5.18: Formantové oblasti xyl-h1-tvr-f.....	38
Obr. 5.19: Porovnání šířky formantových oblastí pro různé paličky	38
Obr. 5.20: Porovnání šířky formantových oblastí pro různé dynamiky	38
Obr. 5.21: Tón g v notovém zápise	39
Obr. 5.22: Spektrogram úderu do středu destičky u vibrafonu	40
Obr. 5.23: Spektrogram úderu do uzlu destičky u vibrafonu	40
Obr. 5.24: Spektrogram úderu do okraje destičky u vibrafonu	40
Obr. 5.25: Porovnání inharmonicity podle místa úderu u vibrafonu.....	41
Obr. 5.26 Porovnání výkonu podle místa úderu u vibrafonu	42
Obr. 5.28: Inharmonicity paliček u vibrafonu	43
Obr. 5.29: Inharmonicity paličky při různých dynamikách u vibrafonu	43
Obr. 5.30: Tón c^2 v notovém zápise	44
Obr. 5.31: Spektrogram vib-c2-tvr-mf	45
Obr. 5.32: Spektrogram vib-c2-tvr-fff.....	45
Obr. 5.33: Spektrogram vib-c2-mek-fff	45
Obr. 5.34: Inharmonicity mezi tóny u xylofonu	46
Obr. 5.35: Generování harmonických složek s referenční hodnotou u vibrafonu.....	46
Obr. 5.36: Generování harmonických složek u vibrafonu.....	47

Obr. 5.36: Formantové oblasti vib-h1-mek-f	47
Obr. 5.37: Formantové oblasti vib-h1-tvr-f.....	48
Obr. 5.38: Porovnání šířky formantových oblastí pro různé paličky h^1	48
Obr. 5.39: Porovnání šířky formantových oblastí pro různé dynamika a^1	48
Obr. 5.39: Tón g^2 v notovém zápisu.....	49
Obr. 5.40: Spektrogram úderu do středu destičky u zvonkohry	50
Obr. 5.41: Spektrogram úderu do uzlu destičky u zvonkohry	50
Obr. 5.42: Spektrogram úderu do středu destičky u zvonkohry	50
Obr. 5.43: Porovnání inharmonicity podle místa úderu u zvonkohry	51
Obr. 5.44: Porovnání výkonu podle místa úderu u zvonkohry.....	52
Obr. 5.45: Tón c^3 v notovém zápisu	52
Obr. 5.46: Inharmonicita paliček u zvonkohry	53
Obr. 5.47: Inharmonicita při různých dynamikách u zvonkohry	53
Obr. 5.48: Spektrogram zvo-c3-fff-tvr	55
Obr. 5.49: Spektrogram zvo-c3-fff-mek.....	55
Obr. 5.50: Spektrogram zvo-c3-p-mek.....	55
Obr. 5.51: Inharmonicita pro různé tóny u zvonkohry	56
Obr. 5.52: Generování harmonických složek s referenční hodnotou u zvonkohry	56
Obr. 5.53: Generování harmonických složek u zvonkohry	57
Obr. 5.54: Formantové oblasti zvo-c3-tvr-fff.....	57
Obr. 5.55: Formantové oblasti zvo-c3-str-fff	58
Obr. 5.56: Porovnání šířky formantových oblastí pro různé paličky	58
Obr. 5.57: Porovnání šířky formantových oblastí pro různé dynamiky	58
Obr. 6.1: Směrová charakteristika xylofonu.....	62
Obr. 6.2: Vliv tvrdosti paličky na směr. char. xylofonu.....	62
Obr. 6.3: Vliv tvrdosti paličky na směr. char. xylofonu při zohlednění.....	62
Obr. 6.4: Vliv dynamiky na směr. char. xylofonu.....	63
Obr. 6.5: Vliv dynamiky na směr. char. xylofonu při zohlednění.....	63
Obr. 6.6: Směrová charakteristika vibrafonu.....	65
Obr. 6.7: Vliv tvrdosti paličky na směr. char. vibrafonu.....	65
Obr. 6.8: Vliv tvrdosti paličky na směr. char. vibrafonu při zohlednění.....	65
Obr. 6.9: Vliv dynamiky na směr. char. vibrafonu.....	66
Obr. 6.10: Vliv dynamiky na směr. char. vibrafonu při zohlednění.....	66
Obr. 6.11: Směrová charakteristika zvonkohry	68
Obr. 6.12: Vliv tvrdosti paličky na směr. char. zvonkohry	68
Obr. 6.13: Vliv tvrdosti paličky na směr. char. zvonkohry při zohlednění	68
Obr. 6.14: Vliv dynamiky na směr. char. zvonkohry	69
Obr. 6.15: Vliv dynamiky na směr. char. zvonkohry při zohlednění	69

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Dělení signálu.....	19
Tab. 5.1: Barevné dělení pásem harmonické řady.....	29
Tab. 5.2 Porovnání míst úderů u xylofonu	31
Tab. 5.3: Orientační tabulka naměřených a vypočítaných hodnot	34
Tab. 5.4: Porovnání míst úderů u vibrafonu	41
Tab. 5.5: Orientační naměřené a dopočítané hodnoty tónu c^2 u vibrafonu	44
Tab. 5.6: Porovnání místa úderu u zvonkohry	51
Tab. 5.7: Orientační tabulka naměřených a vypočítaných hodnot u zvonkohry	54
Tab. 5.8: Vzorec vyšších harmonických složek u xylofonu.....	60
Tab. 5.9: Vzorec vyšších harmonických složek u vibrafonu.....	60
Tab. 5.10: Vzorec vyšších harmonických složek u zvonkohry	60

Seznam tabulek a zkratek

Zkratky:

Harm.	...	Harmonický
Inharm.	...	Inharmonický
Char.	...	Charakteristika
Směr.	...	Směrová
FFT	...	Fast Fourier Transform
<i>fff</i>	...	forte fortissimo
<i>f</i>	...	forte
<i>mf</i>	...	mezzoforte
<i>p</i>	...	piano

Úvod

Bakalářská práce se zabývá analýzou frekvenčního spektra, analýzou FFT spektra a směrovou charakteristikou idiofonických nástrojů. V bakalářské práci jsou pomocí naměřených vzorků, vypočítaných hodnot, tabulek a jejich obrázků popsány rozdíly, které se týkají spektra a směrové charakteristiky idiofonických nástrojů. Bakalářská práce se zabývá postupem měření vzorků, vyobrazením vzorků a jejich porovnáním.

V prvních dvou kapitolách bakalářské práce jsou představeny nástroje a paličky, které byly použity při měření. Kapitoly mají za cíl přiblížit dané nástroje, jejich stavbu, střípky historie a také přiblížit paličky, kterými se na dané nástroj hraje, z jakých materiálů se běžně vyrábějí a jejich vliv na barvu tónů.

Třetí kapitola má za úkol seznámit s hudebním signálem, spektrem signálu, harmonickou řadou, inharmonicitou a formantovými oblastmi. Poskytne přehled

o vyhodnocení měření analýzy spektra a směrové charakteristiky.

Ve čtvrté kapitole je pak popsán postup, jakým způsobem se dané vzorky získávaly. Je zde uvedeno, jaké tóny se pro určité analýzy použily a především jsou zde popsány požadavky na hráče, který ovlivňoval kvalitu a použitelnost vzorků pro vyhodnocení.

Vyhodnocení měření je popsáno v páté a šesté kapitole a tato část je jádrem celé bakalářské práce. Jsou zde popsány poznatky vycházející z porovnání. V kapitolách jsou porovnávány a popsány základní rozdíly mezi nástroji ve spektru a směrové charakteristice. Základní rozdíly jsou zde porovnány pomocí tabulek, grafů, obrázků a komentářů.

Pro účel bakalářské práce byly vybrány idiofonické nástroje, dvouřadový xylofon, dále v této práci jen xylofon, vibrafon a zvonkohra. Porovnává se zde vliv 3. typů tvrdosti paliček (tvrdých, středně tvrdých a měkkých) na spektrum daného nástroje. Rovněž také, jaký vliv má různá dynamika na výsledné spektrum tónu. Směrová charakteristika je zde vyobrazena pomocí polárních diagramů.

Cílem je porovnat tyto idiofonické nástroje, jejich spektra, harmonické složky, inharmonické složky, pásma harmonického spektra, formantové oblasti a jejich směrovou charakteristiku pomocí směrových grafů.

Bakalářská práce je určena pro zvukaře, výrobce nástrojů a také pro výrobce softwarových nástrojů. Podle této práce se lze řídit při zvučení, nahrávání či výrobě nástrojů. Je to svým způsobem návod, jak lépe pochopit tyto idiofonické nástroje.

1 Idiofony

Idiofony představují skupinu hudebních nástrojů, která je typická tím, že zvuk vzniká rozechvěním jejich vlastní hmoty. Samotný název pochází z řečtiny a vznikl spojením slov „ídiós“ = vlastní a „fóné“ = hlas. Samozvučnost je hlavní rysem, jenž je vystihuje, proto je lze lehce rozlišit od nástrojů jiného druhu a také se podílí na množství hudebních nástrojů, které tato skupina zahrnuje.

Idiofony jsou vzhledem k jejich zvukové i materiálové rozdílnosti rozděleny na další podskupiny. Ty byly vytvořeny tak, aby došlo k rozdělení idiofonů s ohledem na hudební praxi a zvukovou charakteristiku hudebního nástroje. Hudební nástroje se tedy rozlišují podle druhu materiálu, ze kterého jsou vyrobeny, na nástroje dřevěné (xylofony), kovové (metalofony), kamenné (lithofony), skleněné (krystalofony) a ostatní (elasmatofony). Tato bakalářská práce se zaměřuje právě na dřevěné a kovové idiofony [1].

1.1 Dřevěné idiofony

Již z názvu kapitoly vyplývá, že pojednává o idiofonických hudebních nástrojích, jež jsou vyráběny z dřevěných materiálů. Do této skupiny patří také kastaněty a nástroje, které byly prapůvodně vyráběny z kostí či mušlí. Postupem času se tyto nástroje vyvinuly a jsou dnes vyráběny z různých dřevěných materiálů.

Jak bylo výše naznačeno, původ většiny dřevěných idiofonických nástrojů sahá až k dobám daleké minulosti. Dřevěné idiofony patří k jedněm z nejjednodušších hudebních nástrojů svého typu, proto je lze nalézt mezi primitivními národy celého světa. Tyto jednoduché nástroje se postupem času v každé kultuře upravovaly a vyvíjely do podoby, jaká je známa dnes.

Dřevěné idiofony se rozeznávají různými paličkami (viz kapitola Paličky pro xylofon) nebo úderem dvou stejných nástrojů (či dvou stejných materiálů) o sebe. Převážná většina všech dřevěných idiofonických nástrojů má krátký a suchý zvuk, a to téměř bez dozvuku. Tato vlastnost se dá měnit u některých nástrojů přidáním rezonátoru, které zvyšují dozvuk, čímž se zmírní ostrý rytmický zvuk dřevěných nebo tvrdých paliček [1].

1.2 Kovové idiofony

U idiofonů patřících do této skupiny melodických bicích nástrojů neboli metalofonů je zdrojem zvuku kovové těleso různé velikosti a tvaru. Rozkmitání kovového tělesa je dosaženo pomocí úderů paliček, dřevěných nebo kovových kladívek, dále pak úderem dvou stejných nástrojů o sebe či experimentálně i smyčcem.

Pro výrobu těchto metalofonních bicích nástrojů se používají různé slitiny kovů, například mosazné, ocelové, bronzové nebo hliníkové. Příměsí a poměr těchto slitin nebývají často zveřejňovány z důvodu jejich charakteru jak po stránce zvukové, tak po stránce kvalitativní, proto si je výrobní firmy chrání a svůj výrobní proces tají. Zajímavým detailem je skutečnost, že každý nástroj tohoto typu je svým způsobem originální a má rozdílnou kvalitu i zvuk.

V roce 1957 byl v Číně prováděn archeologický výzkum, při kterém byl nalezen soubor přesně vyladěných zvonů vyrobených přibližně kolem roku 400 př. n. l. Toto odhalení potvrzuje fakt, že nejstaršími metalofonními bicími nástroji jsou zvony a gongy.

Dalšími typy metalofonních bicích nástrojů jsou kupříkladu talíře, tyčové zvony, vibrafony, celesty, zvonkohry, lyry či antické zvony. Většina těchto nástrojů byla používána v kulturách, jakými jsou Řím, Řecko, Sumerská říše, Babylonská říše, Persie a Indie. V mnoha případech se používaly k různým náboženským obřadům [1].

1.3 Xylofon

Xylofon je idiofonický hudební nástroj, který spadá do podskupiny dřevěných idiofonů. Tato podskupina nese stejný název jako nástroj samotný. Pojem „xylofon“ pochází z řečtiny a byl přeložen ze slov „xylon“ = dřevo a „fone“ = zvuk, hlas. V orchestrální praxi je xylofon brán jako chromatický nástroj idiofoního typu.

Nástroj tohoto typu má svůj původ v zemích Afriky a Asie. V 15. století se dostal do Evropy, kde byl z počátku považován za experimentální a často používán hudebními klauny. Než se dostal xylofon do orchestrálního souboru, uběhlo několik století, jelikož do něj pronikl teprve v druhé polovině 19. století. Sólové skladby pro xylofon jsou psány ve značně rychlém tempu, ve kterých se převážně využívá rozložených akordů.

Xylofon je vyráběn z dřevěných destiček (bloků), které mají obdélníkový tvar. Tyto destičky mohou mít různou velikost a jsou nejčastěji vyráběny z tvrdého dřeva. Nejideálnějším tvrdým dřevem je to palisandrové, jež dobře drží svůj naladěný tón díky tomu, že nevysychá a nenasává vlhkost.

Xylofon lze ladit pomocí zkracování, zeslabování anebo vypilování dřevěných destiček. Zatímco zkracováním destičky se dosahuje zvýšení tónů, jejím zeslabením nebo vypilováním zářezu na spodní straně destičky lze docílit tónu nižšího [1].

1.4 Vibrafon

V roce 1907 byl ve Spojených státech amerických H. E. Winterhoffem vyroben první vibrafon. Tento nástroj se poměrně rychle rozšířil do celého světa. Zpočátku byl využíván v tanečních orchestrech a netrvalo dlouho, než pronikl do symfonického orchestru.

Vibrafon se skládá především z hliníkových a ocelových slitin, které jsou tvarovány, do obdélníkových plátů často označovaných jako kameny, jejichž tloušťka se pohybuje od 4 do 6 mm. Podobně jako u xylofonu jsou tyto kameny různých délek sestaveny chromaticky do dvou řad, přičemž ozvučné kovové trubice jsou svisle zavěšeny pod každým kamenem. Důležitou součástí vibrafonu jsou víčka, jež jsou umístěna v každé ozvučné trubici pod všemi kameny. Tato víčka jsou připevněna na otáčející se osu, která je přivedena k elektrickému motoru. Víčka se otáčejí a otevírají, čímž uzavírají ozvučné trubice. Oproti xylofonu je dozvuk u vibrafonu dlouhý a podstatně znatelný. Další částí konstrukce vibrafonu je šlapací pedál, který umožňuje tlumit tóny (frázovat). Jelikož tento pedál tlumí všechny tóny zároveň, využívá se k tomuto účelu také malíková hrana ruky, kterou lze tlumit pouze vybrané tóny [1].

1.5 Zvonkohra

Zvonkohra je metalofon, jenž spadá do skupiny melodických bicích nástrojů. Předchůdcem zvonkohry byly polokulovité nebo hruškovité zvony z bronzu, které byly zavěšeny na tyčové konstrukci a rozeznívány kladívky (tzv. cembaly). Přibližně od 14. století se velké zvonkohry často používaly v kostelech a chrámech. Příklad takové zvonkohry lze nalézt v pražské Loretě, jež se zde skládá z 27 zvonů, přičemž jejich celková hmotnost je 1 700 kilogramů. Menší zvony se začaly používat v orchestrální hudbě až v 18. století, ale i přesto byly tyto zvonkohry svými rozměry značně nevhodné pro potřeby orchestru. Proto se zvonkohra nadále vyvíjela a začátkem 19. století získala podobu, kterou známe dnes.

Zvonkohra, jež se používá v současnosti, je složena stejně jako většina idiofonních hudebních nástrojů z obdélníkových bloků, kamenů, či destiček o různé velikosti. U zvonkohry se často používá označení destiček. Jsou vyráběny nejčastěji z kovů, a to například z takzvané dobře znějící stříbrné oceli nebo hliníku. Destičky jsou navlékány na silonové, střevové nebo hedvábné šňůry (struny) a jejich ladění probíhá chromaticky, dvouřadově. Na zvonkohru se nejčastěji hraje paličkami, jejichž konec je kulatý a bývá vyroben z velmi tvrdých materiálů, například z tvrdého dřeva, gumy či kovu. Rovněž se na ní může hrát kladívky. Zvonkohra nemá kovové ozvučné trubice (rezonátory) a jejím jediným rezonátorem je dřevěná konstrukce, na níž jsou destičky zavěšeny. I přesto má zvonkohra dlouhou dobu dozvuku, která je mnohem delší než například u xylofonu a vibrafonu. Kvůli ní není možné hrát mnoho akordů jdoucích rychle po sobě, neboť se tóny začnou mísit. Z toho plyne, že je nutné tóny ručně tlumit, což brání rychlému hraní [1].

2 Druhy paliček pro hru na idiofony

Tato část práce se zaměřuje na druhy paliček, jež se používají pro hru na dvouřadový xylofon (dále jen xylofon) a vibrafon. Paličky jsou zásadním prvkem neboli excitátorem pro tento typ idiofonických melodických bicích nástrojů. Z hlediska spektrální analýzy mohou paličky generovat rozdílné hodnoty intenzity různých harmonických složek ve spektru. Záleží při tom zejména na jejich tvrdosti, materiálu a zvolené dynamice hry.

2.1 Paličky obecně

Paličky se dají jiným způsobem nazvat také jako excitátory, jelikož udávají prvotní rozkmit (rozechvěv) struny, blan, vzduchu či pevných materiálů. V mnoha dalších případech se samotné paličky používají jako hudební nástroj, který spadá do třídy idiofonů.

Jsou vyráběny z nejrůznějších materiálů, mezi které se řadí například dřevo (hikorové, tonkinové, habrové), plast a kov. Tyto materiály lze kombinovat a měnit v různých částech paličky od hlavičky až po rukojeť, což má pozitivní dopad na hráčskou přívětivost a požadovanou barvu tónu.

Paličky mohou mít různou délku a šířku a být vyrobeny téměř ze všech materiálů, čímž poskytují hráči požadovanou flexibilitu, tíhu, odrazivost a popřípadě image. Důležitou částí paličky je její hlavička, kterou se nejčastěji vytváří tón. Jeho vznik je ve velké míře ovlivněn tvarem hlavičky, její tvrdostí a materiálem, ze kterého byla vyrobena. Paličky použité v této bakalářské práci jsou vidět na obrázku 2.1

2.1.1 Paličky pro vibrafon

Podobně jako u paliček, se kterými se hraje na xylofon, jsou ty požívané pro hru na vibrafon nejčastěji vyráběny z dřevěných a tonkinových prutů (stonků). Jejich délka se pohybuje od 20 mm až do 25 mm. Pruty jsou zakončeny kulatou hlavičkou, která má v poloměru 1 až 1,5 cm a vyrábí z gumy o různé tvrdosti. Pro dosažení požadované tvrdosti paliček lze využít řídkou vlněnou síťku [1].

2.1.2 Paličky pro zvonkohru

Paličky využívané pro hru na zvonkohru jsou menší obměnou paliček, kterými se hraje na všechny idiofonické bicí nástroje, a to především na vibrafon a xylofon. Odpovídá jim délka 20 mm až 25 mm, jež se odvíjí od potřeb hráče. Jedná se o slabé dřevěné pruty, které jsou zakončeny kulatou hlavičkou o poloměru od 0,5 cm do 1,5 cm. Hlavička bývá často vyrobena z velmi tvrdého materiálu, jímž je tvrdé dřevo, umělá hmota, kov či případně kost [1].

2.1.3 Paličky pro xylofon

Paličky tohoto druhu se nejčastěji vyrábějí z nejrůznějších dřevěných nebo tonkinových prutů. Na jejich konci jsou kulaté hlavičky soustružené ze dřeva dosahující velikosti od 20 mm až do 25 mm. Tyto hlavičky se mohou podle potřeby potahovat i kouskem gumy nebo obvazovat nití pro dosažení potřebné tvrdosti, což může být použito pro změnu barvy tónu [1].

2.2 Vliv paliček na barvu tónu

Barva tónu u libovolně vybraného nástroje je často vázána tak, aby se co nejlépe vmísila do melodie, harmonie a dynamiky v různých žánrech. U paliček určených pro hru na idiofonické melodické bicí nástroje je možné měnit především tvrdost a materiál, ze kterého je hlavička paličky vyrobena. Zvolením různého typu materiálu hlavičku můžeme nástroji přidat různé příměsi do spektra hraného tónu například si zkuste poslechnout, nebo využijte pro rozlišení spektrální analyzátor běžící v reálném čase, triangl, který rozeznáte paličkou s kovovou hlavičkou a poté zkuste paličku jejíž hlavička je vyrobena z gumy. Zvolením tvrdosti paličky lze určovat sílu fundamentu, jasnost a hebkost tónu nebo průraznost nástroje hudebním tělesem. Tvrdší paličky generují silný výrazný tón s jasně slyšitelnou rytmickou složkou, zatímco u měkčích paliček bude tón postrádat jasnost úderu, tón bude hebký, ale o to bude zastřenější.



Obr. 2.1: Paličky použité pro měření zleva: měkká, středně tvrdá a tvrdá

3 Hudební signál a jeho spektrum

Tato kapitola je částí, ve které bude seznámeno se základní teorií signálu a jeho spektra pro lepší pochopení kapitol vyhodnocení měření.

3.1 Signál

Signál jako takový je fyzikální veličinou, která dokáže přenášet anebo uchovávat informace [2]. Signál lze rozdělit podle jeho vlastností a charakteru nebo s ohledem na to, jestli se jedná o signál spojitý s časem anebo o diskrétní signál. Dělení signálu podle jeho vlastností je uvedeno v tabulce níže.

Tab. 3.1 Dělení signálu

Signál					
Náhodný			Deterministický		
Stacionární		Nestacionární	Periodický		Neperiodický
Ergodický	Neergodický		Harmonický	Neharmonický	

Další dělení signálu: Spojitý signál – jedná se o signál se spojitým časem, je to takový signál $x(t)$, kde čas t je jeho spojitou proměnou.

Diskrétní signál – jedná se o signál s diskrétním časem, je to takový signál $x[t]$, kde čas t je definován pouze v diskrétních časových okamžicích [3].

Dále se budu zabývat především periodickými signály a měřící metodiky. Pro lepší pochopení dalších částí jsou představeny i základní veličiny harmonického signálu a zároveň vzorce pro výpočet střední a efektivní hodnoty signálu. Jednoduchou funkci harmonického signálu sinus či kosinus lze vyjádřit tímto vztahem:

$$y = 1 \cdot \cos x \quad (3.1)$$

$$u(t) = U_M \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.2)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (3.3)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.4)$$

kde platí že, U_M ... amplituda (maximální hodnota harmonické veličiny), ω ... úhlový kmitočet a φ ... je počáteční fáze signálu [2].

Střední hodnota harmonického signálu se vypočítá následovně:

$$I_a = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (3.5)$$

Pro výpočet efektivní hodnota harmonického signálu se používá tento vzorec:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (3.6)$$

3.2 Časový průběh hudebního signálu

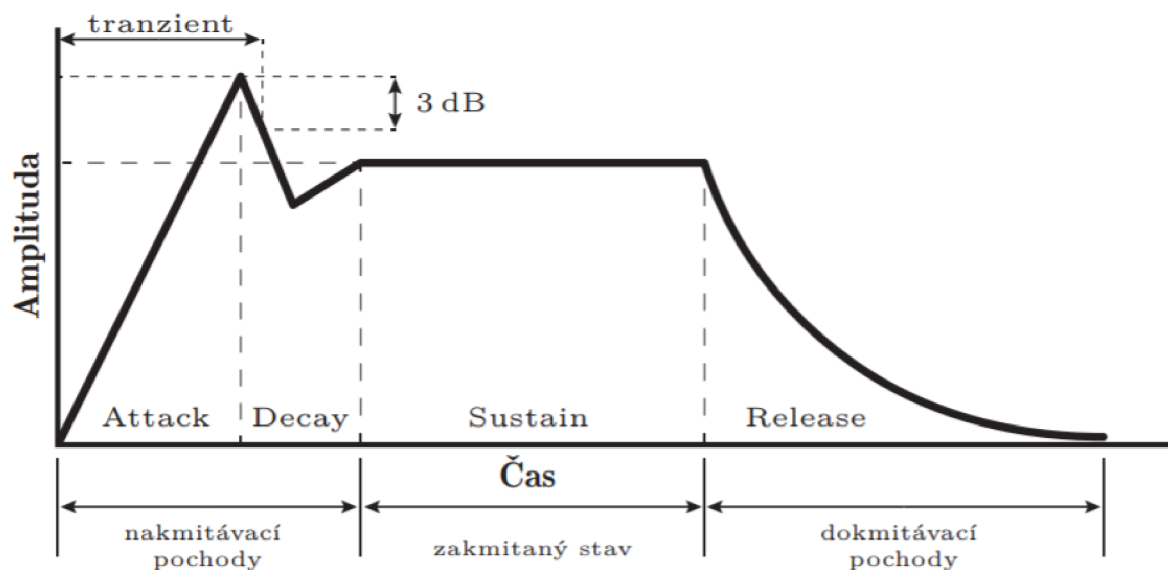
Tón či zvuk lze vyobrazit v závislosti na čase jako tzv. časový průběh, ve kterém se promítají změny dynamiky, amplitudy, akustické hladiny tlaku apod. signálu. Prostřednictvím jeho vizualizace lze přibližně odhadnout, avšak ne přesně určit, frekvenční poměr a frekvenční strukturu signálu. Tvarové změny časového průběhu vyobrazují vznik, trvání a zánik určitého signálu. Z těchto změn a především z jejich velikosti a rychlosti je možné usoudit, zda je signál spíše tónového, nebo hlukového charakteru. Změny v časovém průběhu mohou být periodické, jež budou s větší pravděpodobností tónového charakteru, nebo nahodilé, které budou příslušet hlukům a šumu.

Vyobrazení signálu, které může svým tvarem přiblížit jeho základní časové vlastnosti, se nazývá časová či amplitudová obálka. Podle této obálky lze rozlišit, zda se jedná o signál perkusivního, nebo neperkusivního charakteru. Na časovou obálku je možné pohlížet jako na modulační funkci $A(t)$, která mění maximální hodnotu signálu a lze ji jednoduše vyjádřit vztahem:

$$f(t) = A(t) \cdot g(t) \quad (3.7)$$

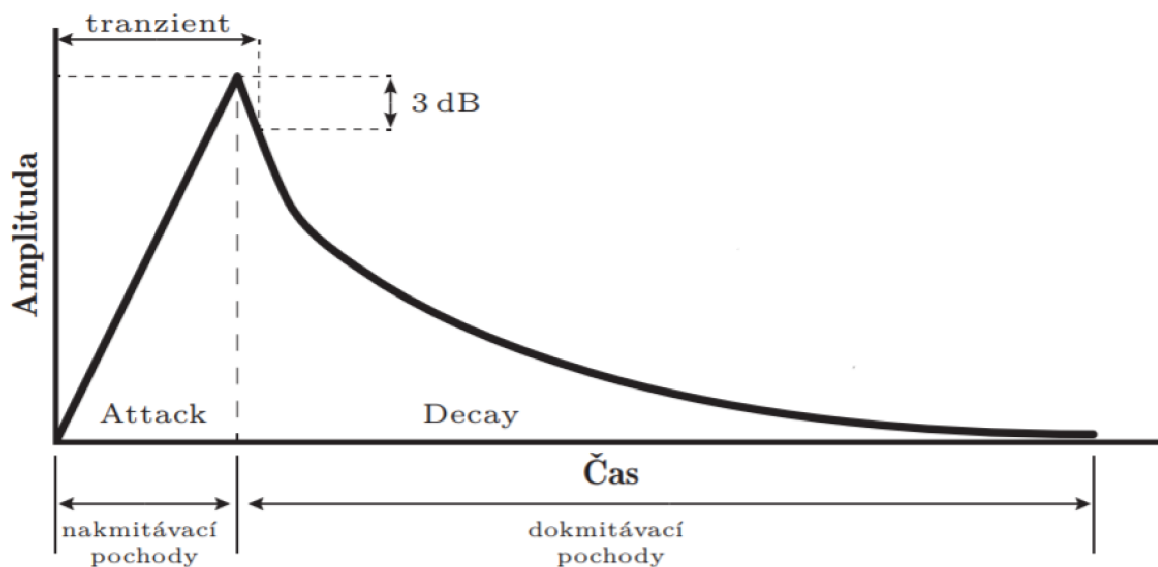
kde platí, že $A(t)$ = obálka reálného signálu a $g(t)$ = nemodulovaný signál (např. $\sin(\omega t + \varphi)$).

Časová obálka tónu nebo zvuku tak dává možnost typologicky rozlišit hudební signál na perkusivní, či neperkusivní. U neperkusivního signálu lze najít tři základní oblasti pochodů, a to nakmitávací, zakmitaný a dokmitávací stav. Perkusivní signál obsahuje pouze dvě základní části, jimiž jsou nakmitávací a dokmitávací stav. Pro oblasti časové obálky se z angličtiny ustálily názvy „attack“ (A), „decay“ (D), „sustain“ (S) a „release“ (R). Každý hudební nástroj vykazuje své časové a amplitudové hodnoty v těchto oblastech, a to při různých dynamikách a zvoleném typu hry [4].



Obr. 3.1: Schéma obálky ADSR neperkusivního signálu [5]

Perkusivní signál postrádá oblast „sustain“ (tj. zakmitaný stav), přičemž oblast „release“ zde přechází do oblasti „decay“, jak lze vidět na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Schéma obálky ADSR perkusivního signálu [5]

3.3 Harmonická analýza

Každý periodický, ale i neperiodický signál je možné rozdělit na dílčí harmonické složky, jelikož je znám jeho základní kmitočet a další harmonické složky jsou dány celočíselným násobkem, tj. f , $2f$, $3f$, $4f$ atd. Amplituda těchto dílčích částí je dána spektrem amplitud [2].

„Jak dovedl již v r. 1811 svou větou J. B. Fourier, (...) na základě matematického postupu se složený zvuk (tón) analyzuje; z tvaru křivky zvuku (tónu) se vypočítají jednotlivé harmonické a jejich amplitudy.“ [6] str. 52

V dnešní době se již harmonická analýza zvuků (tónů) tímto způsobem neprovádí a mnohdy se volí programy s grafickým prostředím, které harmonickou analýzu vypočítají buďto harmonickou, anebo elektroakustickou metodou pomocí spektrálního analyzáru, osciloskopu nebo vyobrazení v prostředí programu Matlab [6].

Harmonickou analýzu neboli Fourierovy řady popsal známý francouzský matematik a fyzik Jean Baptista Fourier v roce 1823 jako součet jednotlivých složek. Tvar Fourierovy řady lze vyjádřit následovně:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t) \quad (3.8)$$

kde proměnná $k = 1, 2, 3, \dots$ určuje pořadové číslo harmonické složky o frekvenci $k\omega$. Ostatní koeficienty Fourierovy řady vypočítáme podle těchto vzorců:

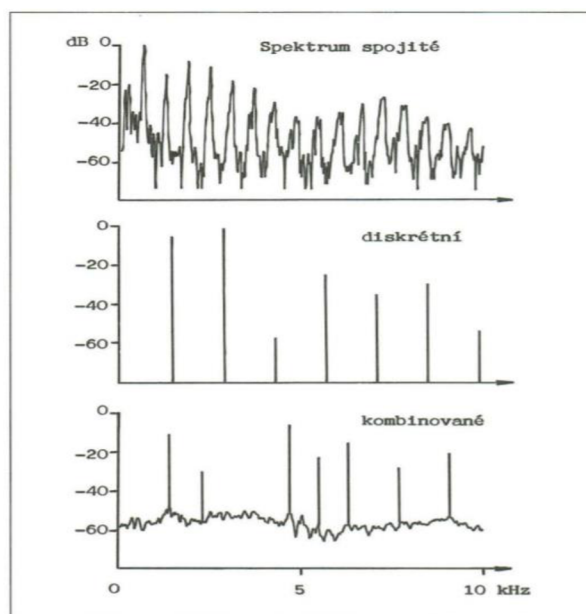
$$a_0 = \frac{2}{T_1} \int_0^T s(t) dt \quad (3.9)$$

$$a_k = \frac{2}{T_1} \int_0^T s(t) \cos(k\omega_1 t) dt \quad (3.10)$$

$$b_k = \frac{2}{T_1} \int_0^T s(t) \sin(k\omega_1 t) dt \quad (3.11)$$

kde proměnná $k = 1, 2, 3, \dots$ určuje pořadové číslo harmonické složky o frekvenci $k\omega$. [2;5].

Vykreslení výsledků se nejčastěji provádí pomocí 2D grafů ve dvou osách s tím, že na horizontální ose x se nachází v logaritmickém měřítku po dekadách frekvence [Hz] a na vertikální ose y hladina L (či intenzita nebo amplituda) [dB]. Takto lze zobrazit grafy ve třech základních podobách spektra, a to ve spektru spojitém, diskrétním a kombinovaném [6].



Obr. 3.3: Základní dělení spekter [4]

3.3.1 Harmonická řada

Harmonická řada je posloupnost celočíselných násobků základní frekvence. Základní frekvence se jinak nazývá fundament a další vzniklé celočíselné násobky se označují jako vyšší harmonické složky nebo také alikvóty. Harmonická řada se dělí na 3 pásma, jež jsou oddělena po oktávách od fundamentu. Každé pásmo, ale také každá vyšší harmonická složka, nese plnou odpovědnost za výslednou barvu, průraznost, mohutnost a nosnost tónu. Například pokud bude mít fundament menší intenzitu než jeho alikvotní tóny, tón bude postrádat nosnost a rychle dozní. Jedná se o to, že fundament nese všechny své alikvoty [7].



Obr. 3.4: Harmonická řada

Pásma harmonické řady se dělí na:

První pásmo, které je ještě dále rozděleno na část A a B, celkově nese prvních 8 vyšších harmonických složek. První pásmo je možné vnímat jako barvu složenou z intervalů. Generuje hebký a dutější tón. Vyšší harmonické složky v něm se dělí na sudé a liché. Sudé složky přidávají tónu mohutnost a jasnost, ale nevytváří barvu tónu, kdežto liché složky naopak vytvářejí barvu tónu a přidávají nazálnost a ostrost.

Funkce jednotlivých vyšších harmonických složek v prvním pásmu jsou následující:

- 1. harmonická (fundament) – nevytváří barvu, jeho vlastností je energie, kterou nese své alikvóty;
- 2. harmonická – nevytváří barvu, zesiluje fundament a přidává na mohutnosti;
- 3. harmonická – přidává tónu dutost, tupost a tělo nástroje;
- 4. harmonická – přidává tónu na jeho jasnosti;
- 5. harmonická – vytváří nazální barvu tónu;
- 6. harmonická – přidává tónu opět na jasnosti;
- 7. harmonická – přidává tónu brysknost a lesk;
- 8. harmonická – rozvine jasnost, jas tónu;
- 9. harmonická – přidává tónu cinkavost a brysknost.

Druhé pásmo obsahuje 9. až 16. vyšší harmonickou složku. Toto pásmo generuje sytý, průrazný a ostrý tón a je vnímán jako klastr. V tomto pásmu jsou důležité formantové oblasti.

Třetí pásmo obsahuje všechny zbylé vyšší harmonické složky od 17. vyšší harmonické složky až po poslední vyskytující se složku. Toto pásmo rovněž lze rozdělit na část A a B z toho důvodu, že od 33. vyšší harmonické složky je vnímáno jako šum a je zcela neharmonické. Třetí pásmo generuje ostrou, cinkavou, kovovou a velice průraznou barvu [7].

3.3.2 Inharmonicity

Inharmonicity je přirozený jev, který nastává u každého hudebního nástroje, nicméně pro perkusivní nástroje je typickým. Inharmonicity je neceločíselný násobek první harmonické, může se jednat o inharmonicity například, kdy má fundament 220 Hz a jeho druhá harmonická má 440,4 Hz, kdežto teoreticky by měla mít 440 Hz, zde se jedná o velmi malou inharmonicity u perkusivních nástrojů jsou tyto rozdíly markantnější a vyšší harmonická může být vychýlena ze své pozice až o půl tón.

U idiofonů záleží především na tuhosti, pružnosti a materiálu, ze kterého jsou kameny, bloky nebo destičky vyrobeny. Pokud je materiálem dřevo, tak se to týká textury jeho vláken. Každý kus dřevěného bloku bude vykazovat jinou inharmonicity. Inharmonicity přímo souvisí s Youngovým modulem pružnosti a je vyjádřena pomocí koeficientu inharmonicity b . Teoreticky lze vypočítat frekvence harmonických složek při započítání vlivu Youngova modulu pružnosti pomocí jeho vztahu 3.12, kde f_n je frekvence n -té harmonické, f_1 je frekvence fundamentu a n je číslo dané harmonické.

$$f_n = nf_1\sqrt{1 + bn^2} \quad (3.12)$$

Ze vztahu vyplývá, že pokud by byl koeficient b roven nule, byly by frekvence harmonických složek vždy celočíselným násobkem.

Hodnoty koeficientu b získáme z následujícího vztahu.

$$Y_n = bX_n, n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.13)$$

$$Y_n = \frac{\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 - f_1^2}{f_1^2 n^2} \quad (3.14)$$

$$X_n = n^2 \quad (3.15)$$

Za prvé se stanoví hodnoty členů Y_n a X_n pro všechna dostupná n a v dalším kroku pomocí metody nejmenších čtverců koeficient b z funkce $Y_n = bX_n$ [8].

3.3.3. Formantové oblasti

Formantovou oblastí se rozumí oblast špičky nebo lokálního maxima ve spektru. U formantových oblastí se určuje střed (c), šířka oblasti (B) a celkové zesílení. Tyto oblasti se vyskytují v místech, které odpovídají rezonančním módům nástroje. Formantové oblasti mohou být pevně dané (např. tělo kytary), či pohyblivé neboli volné. Pokud je v případě pohyblivé formantové oblasti rezonátor zvětšován či zmenšován, mění se rezonanční mód tělesa (např. lidská ústa) [7].

4 Popis měření

Dosažení správného výsledku je možné pouze v případě správně probíhajícího měření a jeho správným vyhodnocením. Jelikož mnohdy může v některé z částí měření vzniknout chyba, ať už se jedná o začátek měření, jeho průběh, závěr či vyhodnocování, je důležité si měření a získané výsledky dobře zaznamenávat.

4.1 Postup měření spektrální analýzy

Pro měření spektrální analýzy bylo využito laboratoře na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií. Nástroje byly poskytnuty panem Mgr. Ctiborem Bártekem, jenž rovněž zajistil hráče, kteří napomáhali při nahrávání vzorků. Z nástrojů byl měřen xylofon značky Adams, vibrafon značky Musser s označením M55G a zvonkohra od výrobce Premier. Nástroje byly snímány kontaktním způsobem ve vzdálenosti 10 cm od kamene (bloku), což bylo změřeno výsuvným metrem. Úhel mikrofonu byl nastaven na 45° ke středu kamene a byl změřen pomocí pravítkového úhloměru. Mikrofon byl přiveden do zvukové karty, která byla pomocí firewire konektoru připojena k počítači, v němž byla propojena s programem Reaper 5.1 pomocí asio ovladačů. V tomto programu se potom uskutečnilo nahrání všech vzorků. S ohledem na možnou dobu měření byly pro měření vzorků zvoleny tóny tak, aby při nejmenším pokryly, jednu oktávu nástroje a mohl se zde pokusit vyhledat shodné inharmonické vzorce, pokud by se objevily, a také tak, aby bylo možné tóny porovnávat mezi ostatními nástroji, které mají jiný rozsah. Pro xylofon s rozsahem od c^1 až po c^5 byly vybrány tóny (c^1 , d^1 , e^1 , f^1 , g^1 , a^1 , h^1 , c^2 , c^3 a f^3), pro vibrafon, který má rozsah od f až po f^3 , byly zvoleny tyto tóny (f , c^1 , d^1 , e^1 , f^1 , g^1 , a^1 , h^1 , c^2 a f^2) a pro zvonkohru s rozsahem g^2 do c^5 byly vybrány tóny (c^3 , gis^3 , cis^4 , f^4 a h^4). Tóny u všech nástrojů byly zahrány hráčem pomocí třech typů paliček, které se odlišovaly svou tvrdostí. Byla použita tvrdá palička s dřevěnou kulatou hlavičkou FS X1, středně tvrdá z plsti 23B XL M. B. a měkká palička Thomann M120. Každou paličkou byly tóny zahrány v určených dynamikách, jimiž byly *fff*, *f*, *mf* a *p*.

4.2 Postup měření směrové charakteristiky

Pro měření směrových charakteristik bylo využito stejných prostor jako při měření spektrální analýzy. Rovněž byly měřeny stejné nástroje. U měření směrové charakteristiky byly tóny zvoleny tak, aby pokryly co největší rozsah měřeného nástroje. Pro vibrafon se jednalo o tóny (f , a , f^1 , f^2 a f^3), u xylofonu o tóny (c^1 , f^1 , a^1 , c^2 , c^3 a c^4) a v případě zvonkohry o tóny (g^2 , c^3 , f^3 , h^3 a e^4). Pro rozeznění nástroje bylo využito stejných paliček jako u měření spektrální analýzy. Tóny byly hrány hráčem ve třech dynamikách, a to ve *fff*, *f* a *p*.

Směrová charakteristika byla měřena pomocí závěsného měřicího kruhu s 9 mikrofony. Tento kruh se nacházel ve vzdálenosti 1,6 m od středu všech nástrojů. Mikrofony byly také postaveny do výšky 1,6 m pro všechny nástroje, a to z důvodu zdlouhavého procesu nastavování měřicího kruhu. Je třeba zmínit, že vzdálenosti byly změřeny pomocí laserového metru. Mikrofony byly umístěny do 9 úhlů s odstupem 40° (0°, 40°, 80°, ..., 320°). Tyto úhly byly voleny s ohledem na počet mikrofonů a také na postavení hráče, který by působil jako stín pro vyšší frekvence. Mikrofony byly stejně jako u předchozího měření připojeny ke zvukové kartě, jež byla připojena do počítače a propojena s programem Reaper 5.1.

4.3 Použité zařízení pro měření

Zařízení, které bylo pro měření použito, bylo vypůjčeno z laboratoří panem doc. Ing. Jiřím Schimmlem Ph.D. Zapůjčeno bylo celkem 10 mikrofonů značky AUDIX Microphones (konkrétně nesly označení AUDIX TM1). Jedná se o kondenzátorové měřicí mikrofony s více směrovou charakteristikou. Jejich frekvenční rozsah se vyznačuje svým extrémně plochým frekvenčním rozsahem od 20 Hz až po 25 kHz, hodnota jejich citlivosti dosahuje 6,5 mV/pa a impedance mikrofonů činí 200 Ω [9].

Pro měření bylo využito externí vícestopé zvukové karty od firmy RME s označením Fireface 800 s rozšířením o zvukovou kartu OctaMic II se vzorkovací frekvencí 192 kHz. Odstup od šumu zvukové karty je +/- 112 dB(A). Zkreslení THD+N u zvukové karty je 0,00063 % pro převod A/D [10].

Dále byly zapůjčeny XLR kabely, laserový metr a laserový úhломěr. Jako DAW rozhraní byl použit softwarový program REAPER 5.1/x64.

4.4 Požadavky na hráče

Základem úspěšné přípravy i samotného měření je kvalita, úspěšnost i rychlost měření. Neméně důležitou součástí měření je i samotný hráč, který s daným nástrojem pracuje. Z důvodu zajištění objektivnosti měření a vyhodnocených vzorků je třeba, aby na dané nástroje při jednom měření hrál pouze jeden hráč. Pro tyto účely lze samozřejmě využít strojového zařízení (robota), u kterého je možné nastavit místo a také sílu úderu. V tomto měření však robot nebyl použit, proto musel být stanovena pravidla tak, aby měření a nahrání vzorků proběhlo co nejlépe.

Měření spektrální analýzy a směrové charakteristiky se účastnil právě jeden student Konzervatoře Brno. Hráči byl vysvětlen postup a základní principy měření a dále i požadavky na něj. Mezi nimi bylo, aby se snažil paličkou trefovat vždy do stejného místa kamene, nejlépe přímo do jeho středu. Hráči bylo také doporučeno, aby si před každým snímaným úderem pár úderů zkusil nanečisto. Rovněž byl požádán, aby po každém úderu nezůstávala palička na kameni nepatřičně dlouho, tj. aby odsadil paličku z kamene co nejrychleji. Hráči bylo také sděleno, aby se pokoušel dodržet jemu zvolenou dynamiku tónu. Speciálním požadavkem u měření vibrafonu bylo, aby hráč držel tlumící (frázovací) pedál po celou dobu tónu. Jelikož by měření mohly rušit pohyby hráče, byl požádán o to, aby se zbytečně moc nehýbal po dobu nahrávání. Těmito požadavky se hráč držel po celou dobu měření a neměl sebemenší problém jim vyhovět. Díky těmto požadavkům bylo dosaženo lepší kvality a vyšší rychlosti snímaných vzorků.

5 Vyhodnocení měření spektrální analýzy

Tato kapitole se zabývá vyhodnocením naměřených vzorků. Vyobrazení vzorků do podoby spektrogramu, fft a směrové charakteristiky bylo provedeno pomocí programu Matlab 2016a. V prostředí tohoto programu byly prostřednictvím editoru napsány jednotlivé funkce či kódy pro vyobrazení vzorků. Tyto funkce a kódy byly vytvořeny na základě zdrojů [8;11]. Dále byly zhotoveny grafy a tabulek, které byly zpracovány v programu Microsoft Excel.

Tato kapitola hodnotí všechny cíle bakalářské práce, vliv tvrdosti paliček a různé dynamiky na spektru tónu, a to vliv na harmonicitu a inharmonicitu. Dále jsou zde porovnána jednotlivá pásma harmonické řady a formantové oblasti. Rovněž je provedeno srovnání xylofonu, vibrafonu a xylofonu mezi sebou s ohledem na jejich rozdílnost ve spektru a směrové charakteristice. V 6. je porovnán vliv tvrdosti paliček a různých dynamik na směrovou charakteristiku.

Každý z obrázků je označen zkratkami podle toho, jaký tón (např. f^2) a jaký nástroj (vibrafon – vib, xylofon – xyl a zvonkohra – zvo) byl měřen. Dále jsou opatřeny zkratkami, jež udávají, jakou paličkou byl daný tón zahrán (např. tvrdou – tvr) a v jaké dynamice (např. forte fortissimo – fff). Ve výsledku vypadá označení takto: vib- f^2 -tvr-fff.

Jak lze vidět v tabulce 5.1, pásma harmonické řady jsou v grafech a tabulkách vyobrazeny pomocí barev.

Tab. 5.1: Barevné dělení pásem harmonické řady

Barvy pásem	
1. Pásma	Zelená
2. Pásma	Žlutá
3. Pásma	Modrá

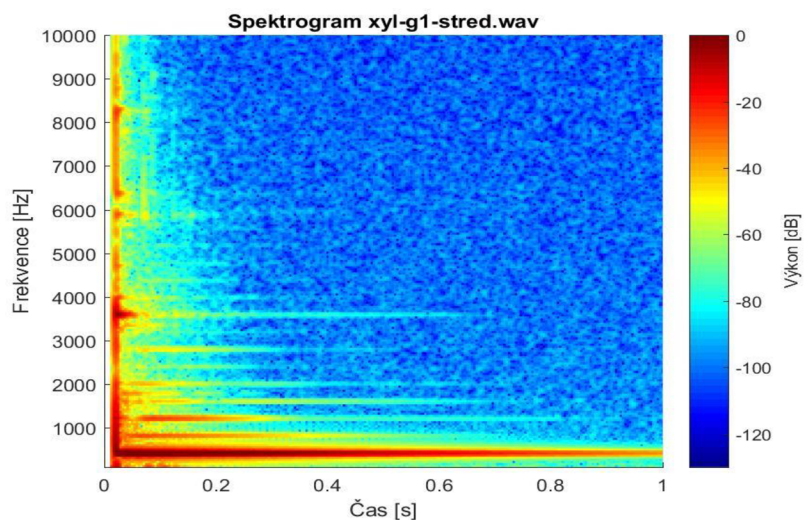
5.1 Analýza spektra xylofonu

5.1.1 Porovnání spektra v závislosti na místě udeření u xylofonu

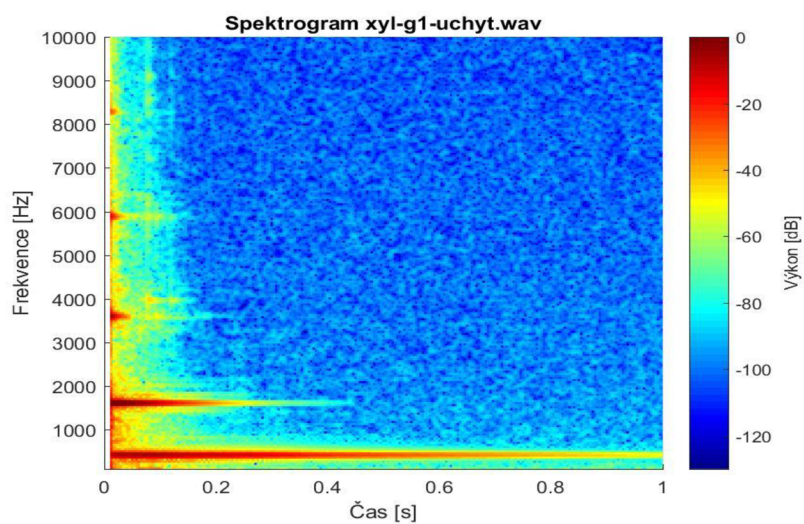
Tato kapitola poukazuje na to, jaký vliv má místo úderu na spektrum tónu. Pro porovnání byl vybrán tón g^1 , který byl zahrán středně tvrdou paličkou v dynamice forte. Jako místa úderu byly zvoleny různé části destičky, a to její střed, místo provrtání destičky (uzel) a okraj. Na obrázcích 5.2–4 jsou vyobrazeny spektrogramy, jež ukazují, že se generování vyšších harmonických složek liší podle místa úderu jak intenzitně, tak i svým počtem.



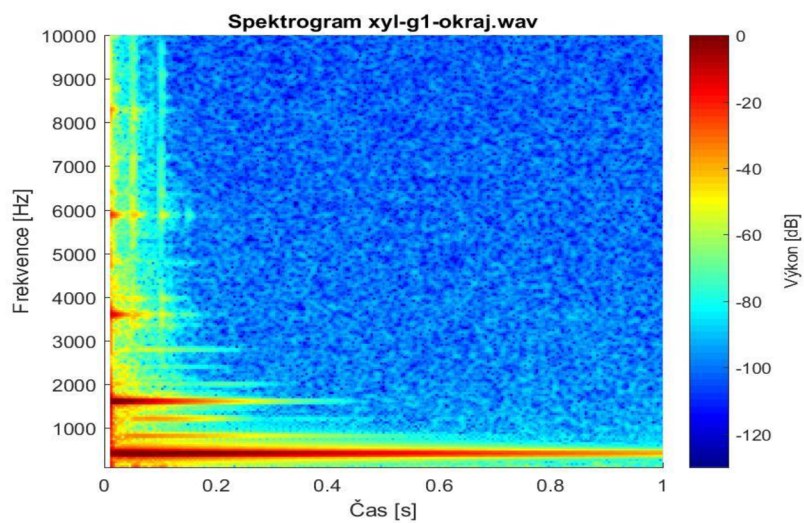
Obr. 5.1: Tón g^1 v notovém zápise



Obr. 5.2: Spektrogram úderu do středu destičky u xylofonu



Obr. 5.3: Spektrogram úderu do uzlu destičky u xylofonu



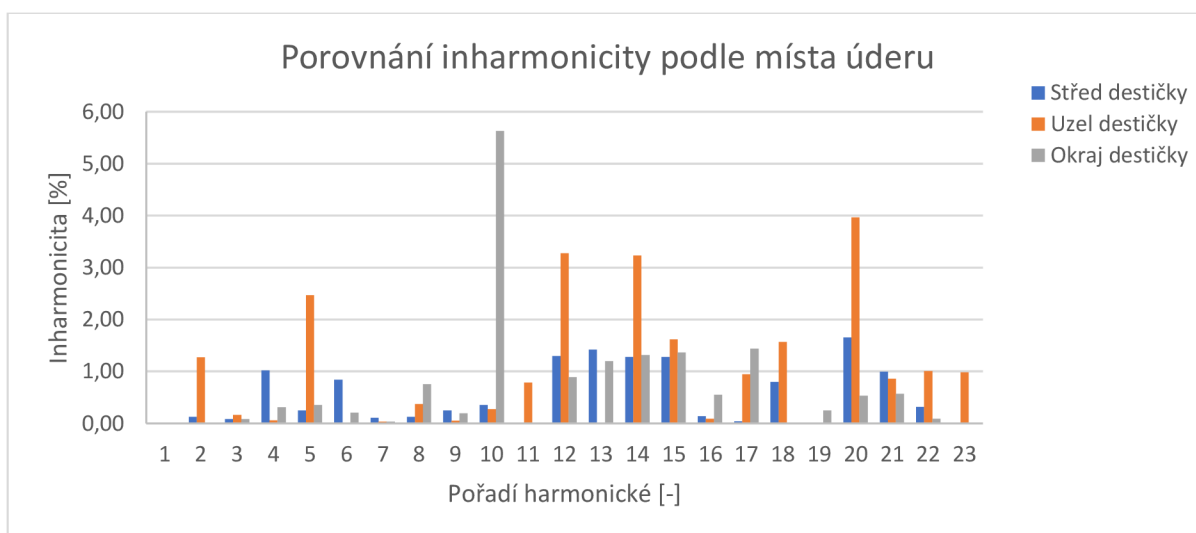
Obr. 5.4: Spektrogram úderu na okraj destičky u xylofonu

Tab. 5.2 Porovnání míst úderů u xylofonu

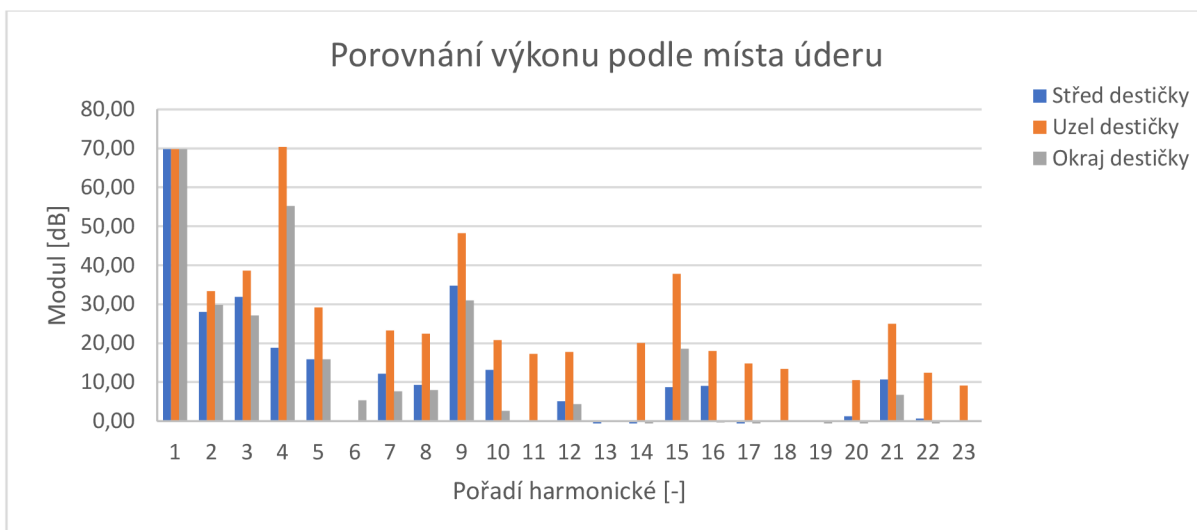
Úder do:	středu destičky			uzlu destičky			okraj destičky		
	Pořadí harm. složky	Frekvence [Hz]	Inharm. [%]	Výkon [dB]	Frekvence [Hz]	Inharm. [%]	Výkon [dB]	Frekvence [Hz]	Inharm. [%]
1.	396,01	0,00	0,00	397,01	0,00	0,00	396,01	0,00	0,00
2.	791,02	0,13	-41,75	784,02	1,28	-36,45	792,02	0,00	-39,96
3.	1187,02	0,08	-37,89	1193,02	0,17	-31,16	1187,02	0,08	-42,70
4.	1568,03	1,02	-50,99	1589,03	0,06	0,63	1589,03	0,32	-14,62
5.	1985,04	0,25	-53,94	2034,04	2,47	-40,59	1987,04	0,35	-53,90
6.	2396,05	0,84	-69,72	-	-	-	2381,05	0,21	-64,43
7.	2769,06	0,11	-57,63	2778,06	0,04	-46,58	2773,06	0,04	-62,15
8.	3164,07	0,13	-60,47	3188,07	0,38	-47,33	3192,07	0,76	-61,83
9.	3573,07	0,25	-35,07	3575,07	0,06	-21,59	3571,07	0,20	-38,84
10.	3946,08	0,36	-56,62	3959,08	0,28	-49,03	4183,09	5,63	-67,14
11.	-	-	-	4333,09	0,79	-52,53	-	-	-
12.	4691,10	1,30	-64,66	4920,10	3,27	-52,07	4710,10	0,89	-65,43
13.	5076,11	1,42	-74,78	-	-	-	5087,11	1,20	-69,95
14.	5474,11	1,28	-73,20	5384,11	3,23	-49,74	5472,11	1,32	-78,92
15.	5865,12	1,28	-61,03	5860,12	1,62	-31,97	5860,12	1,37	-51,25
16.	6345,13	0,14	-60,78	6358,13	0,09	-51,78	6371,13	0,55	-70,07
17.	6735,14	0,04	-71,76	6813,14	0,95	-55,01	6829,14	1,44	-76,39
18.	7185,15	0,80	-69,80	7258,15	1,57	-56,40	-	-	-
19.	-	-	-	-	-	-	7505,16	0,25	-76,58
20.	7791,16	1,66	-68,55	7637,16	3,97	-59,28	7878,16	0,53	-74,54
21.	8234,17	1,00	-59,09	8266,17	0,86	-44,84	8269,17	0,57	-63,05
22.	8740,18	0,32	-69,14	8647,18	1,01	-57,36	8720,18	0,09	-75,71
23.	-	-	-	9042,19	0,98	-60,65	-	-	-

pozn. zvonkohra je laděná pro a1 = 442 Hz, 100 cent = 8,3333 % = 1 půl tón

Místo úderu má velký vliv na podíl inharmonicity ve spektru hraného tónu. Při úderu do středu destičky činila inharmonicitu 12 %, na okraj destičky to bylo 14 % a při úderu do uzlu destičky byla inharmonicitu největší, a to 23 %. Tuto skutečnost má na svědomí několik faktorů jako například struktura materiálu či sčítání podélných, příčných a torzních kmitů. Na základě této tabulky byly vytvořeny grafy, které porovnávají inharmonicitu a výkon jednotlivých vyšších harmonických složek v závislosti na místě úderu. Na obrázku 5.5 lze vidět, že při úderu do středu a okraje destičky je inharmonicitu přibližně stejná, kdežto při úderu do uzlu destičky se inharmonicitu vyšších harmonických složek zvyšuje. Právě tyto skutečnosti hrají roli při hledání inharmonických vzorců.



Obr. 5.5: Porovnání inharmonicity podle místa úderu u xylofonu



Obr. 5.6: Porovnání výkonu podle místa úderu u xylofonu

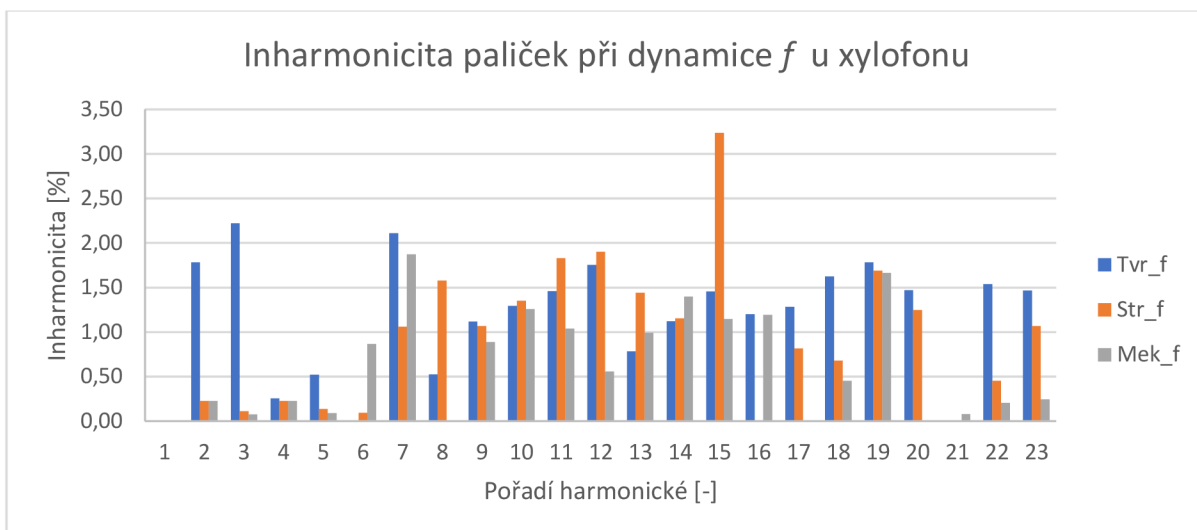
Při porovnání výkonu vyšších harmonických složek, jež jsou vyobrazeny na obr. 5.6, je možné vidět, že při úderu do uzlu destičky se výkon celého spektra tónu zvýší, zatímco když se udeří do středu a okraje destičky, tak je výkon vyšších harmonických složek opět velmi podobný, nikoliv však stejný.

5.1.2 Porovnání vlivu tvrdosti paliček a dynamiky u xylofonu

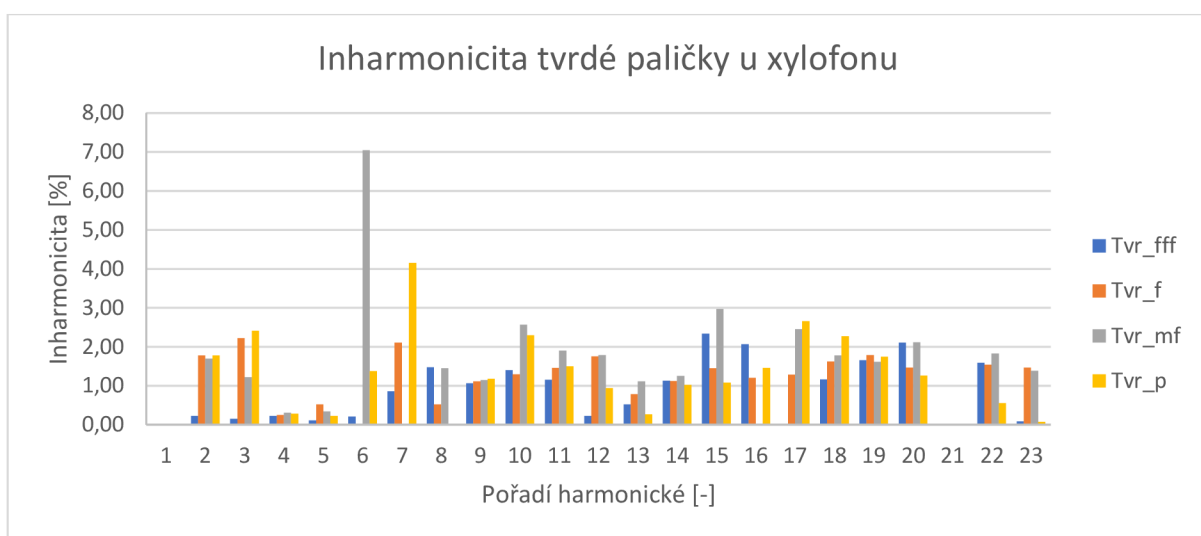
Pro porovnání vlivu tvrdosti paliček a různé dynamiky na spektrum tónu a především na jeho inharmonicitu byl vybrán tón a^1 . Na obrázku 5.8 je vyobrazena inharmonicitu při zahrání tónu paličkami s různou tvrdostí v dynamice forte. Lze vidět, že pro fundament, 4., 9., 10., 14. a 19. harmonickou složku je inharmonicitu podobná. Tyto vyšší harmonické složky budou tvořit především základ pro barvu tónu a tón samotný. Ostatní vyšší harmonické složky jsou mezi sebou skokově odlišné a ve spektru jsou spíše jakousi příměsí do barvy tónu s odstupem od fundamentu ± 40 dB. Vyobrazení vlivu odlišné dynamiky na inharmonicitu je vidět na obrázku 5.9, kde byl tón zahrán tvrdou paličkou. Je patrné, že při hře silnější dynamikou se inharmonicitu snižuje, zatímco největší inharmonicity je dosaženo při dynamice piano a mezzoforte. Podobná inharmonicitu se zde vyskytuje pro fundament, 4., 9., 11., 14. a 19. harmonickou složku. Z těchto skutečností se jeví, že je inharmonicitu \pm shodná a že tvrdost paličky a dynamika na ní nebude mít zásadní dopad. Tvrdost paličky a dynamická síla bude mít vliv na intenzitu a počet vyšších harmonických složek, které vygenerují.



Obr. 5.7: Tón a^1 v notovém zápisu



Obr. 5.8: Inharmonicity of mallets in xylophone

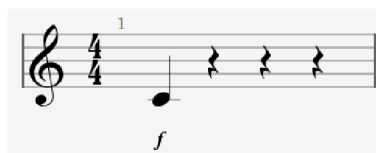


Obr. 5.9: Inharmonicity at various dynamics in xylophone

5.1.3 Comparison of tones in xylophone

In this chapter, the generation of higher harmonic components is first compared, and then the number, their amplitude, inharmonicity and the harmonic series bands for one selected tone. In the further part of this chapter, selected tones are compared from the point of view of their inharmonicity and the generation of higher harmonic components in dependence on the amplitude.

For comparison, the tone c^1 was chosen, which was played with a hard mallet in the dynamic forte and was evaluated using table 5.3 and spectrograms. In the first row, it is possible to find from the table that the tuning of the mallet differs by approximately 1 Hz from the theoretical frequency. A slight detuning of the mallets can be noticed in all played tones. The most strongly generated harmonic components are the fundamental, 4., 10. and 18. harmonic components. In the 1. band, the fundamental and 4. harmonic component are present, which are the tones c^1 and c^3 . The 2. band is formed by 10. harmonic component and it is the tone e^4 . In the last row, the 18. harmonic component is present, which is the tone d^5 . The total inharmonicity is 38 % (15 % in the first band, 15 % in the second band and 8 % in the third band).



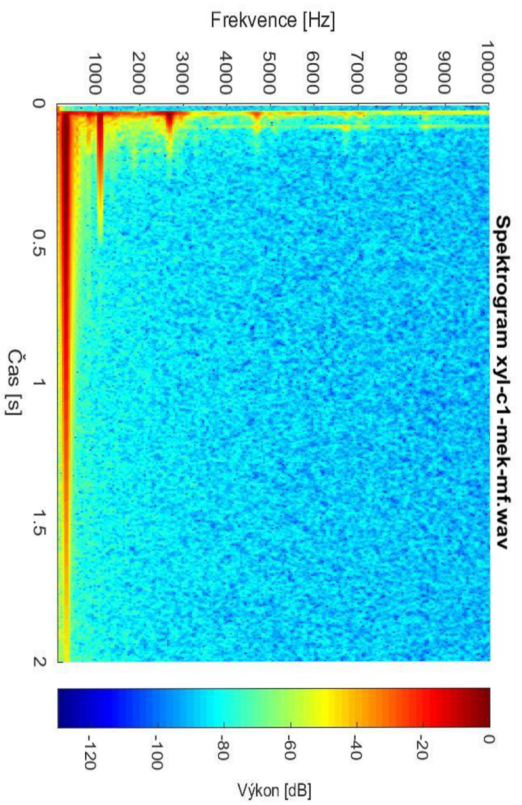
Obr. 5.10: Tón c¹ v notovém zápisu

Tab. 5.3: Orientační tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

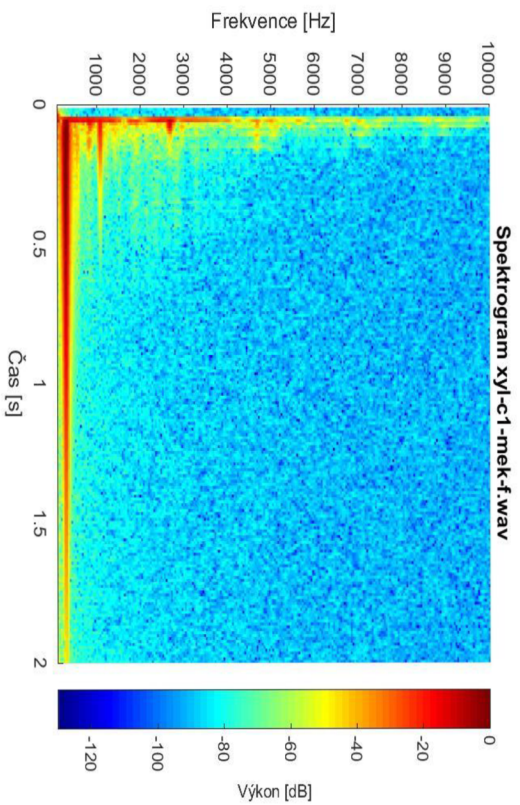
Pořadí harm. složky	Frekvence			Inharm. [%]	Výkon [dB]	Inharm. V centech [-]
	Teor. Správná [Hz]	Teor. Dopočítaná [Hz]	Naměřená [Hz]			
1.	262,82	263,50	263,50	0,00	0	0,01
2.	525,64	527,00	526,51	0,09	-44	1,13
3.	788,46	790,50	794,51	0,51	-40	6,08
4.	1051,28	1054,00	1054,51	0,05	-6	0,58
5.	1314,10	1317,50	1353,01	2,70	-32	32,35
6.	1576,92	1581,00	1685,52	6,61	-36	79,33
7.	1839,74	1844,50	-	-	-	-
8.	2102,56	2108,00	2003,02	5,24	-35	62,89
9.	2365,38	2371,50	2383,02	0,49	-26	5,83
10.	2628,20	2635,00	2653,53	0,70	-4	8,44
11.	2891,02	2898,50	-	-	-	-
12.	3153,84	3162,00	3018,53	4,75	-25	57,04
13.	3416,66	3425,50	3342,53	2,48	-30	29,79
14.	3679,48	3689,00	-	-	-	-
15.	3942,30	3952,50	3827,54	3,26	-33	39,18
16.	4205,12	4216,00	4087,54	3,14	-30	37,71
17.	4467,94	4479,50	4381,55	2,24	-26	26,83
18.	4730,76	4743,00	4655,05	1,89	-3	22,67
19.	4993,58	5006,50	4968,55	0,76	-23	9,17
20.	5256,40	5270,00	5288,56	0,35	-36	4,23
21.	5519,22	5533,50	5574,06	0,73	-27	8,80
22.	5782,04	5797,00	5848,06	0,88	-31,03	10,57
23.	6044,86	6060,50	6137,56	1,27	-35,81	15,26

pozn. Xylofon je laděný pro a1 = 442 Hz, 100 cent = 8,3333 % = 1 půl tón

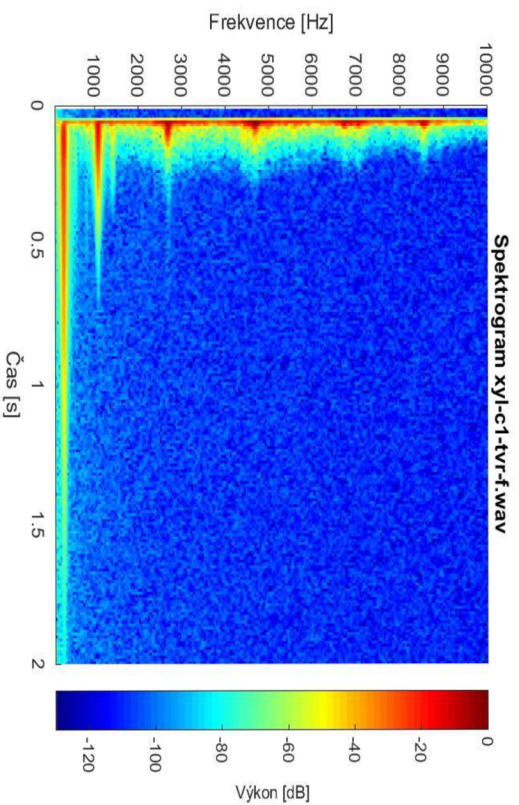
Pro vyobrazení generování vyšších harmonických složek byly zvoleny spektrogramy. Na obrázku 5.12 je zobrazen tón zahráný měkkou paličkou v dynamice mezzoforte, zatímco na obrázku 5.13 je zahrán tvrdou paličkou v dynamice forte. Je patrné, že jak palička, tak i zvolená dynamika má velký vliv na generování počtu, intenzity a diskretnosti vyšších harmonických složek, a tím i na výslednou barvu hraného tónu. Tón hraný tvrdou paličkou bude průraznější a ostřejší než tón hraný měkkou paličkou, který bude naopak méně průrazný a spíše zastřený. Kompozičně se dá tohoto využít.



Obr. 5.11: Spektrogram xyl-c1-mek-mf

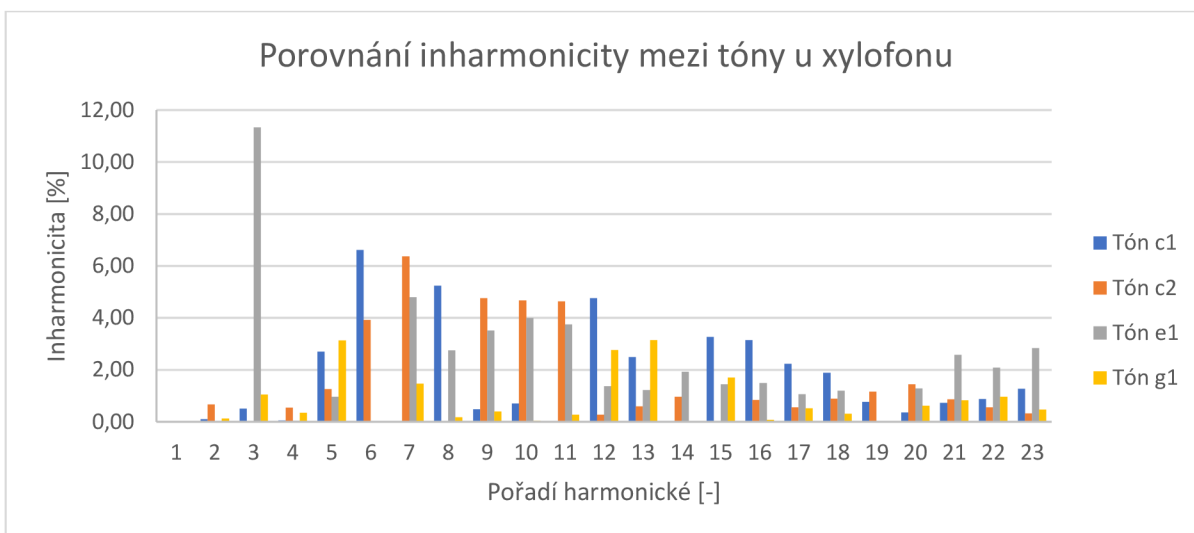


Obr. 5.12: Spektrogram xyl-c1-mek-f

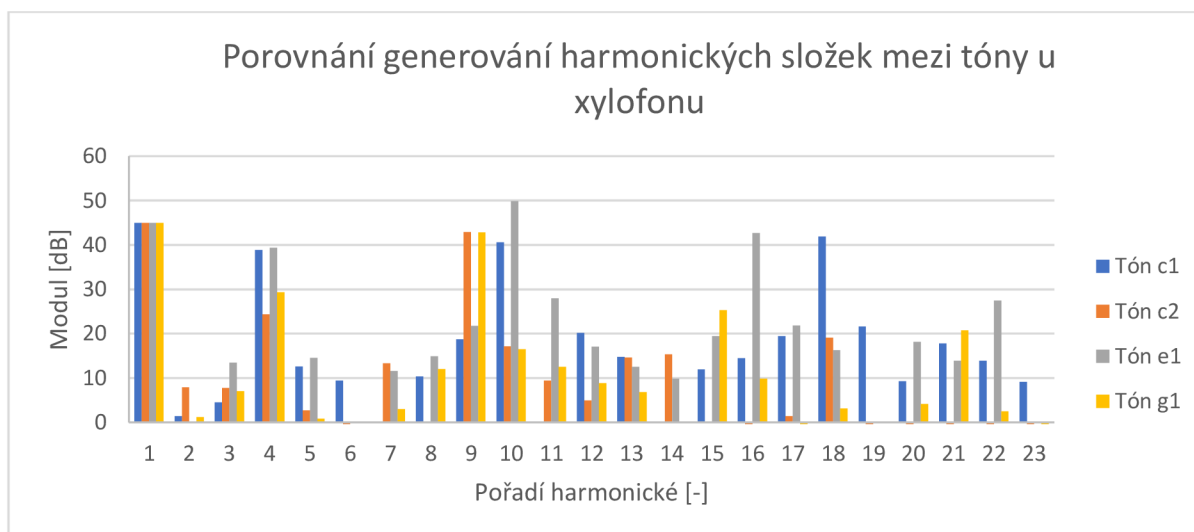


Obr. 5.13: Spektrogram xyl-c1-tvr-f

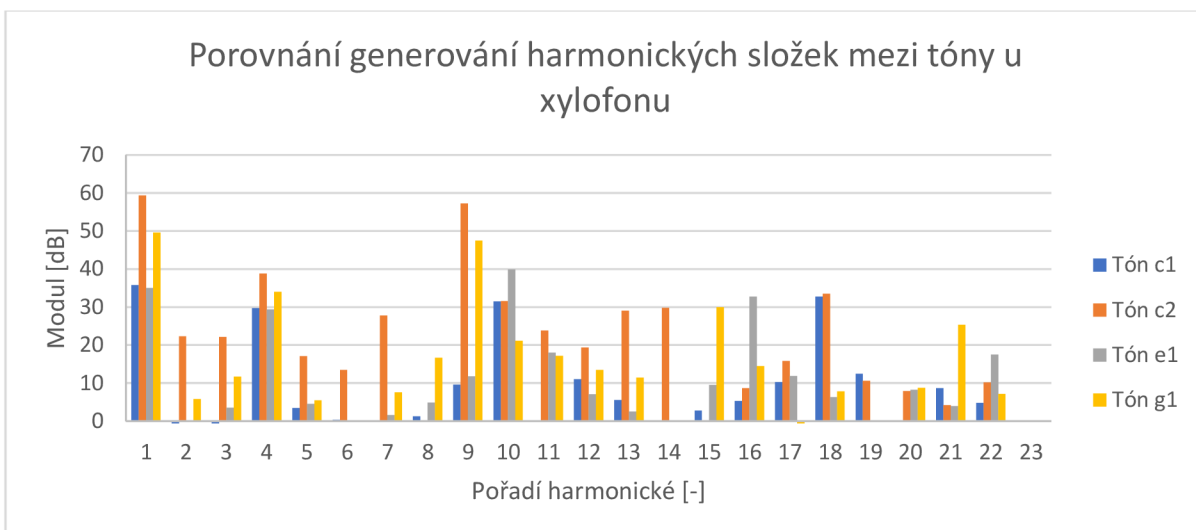
Zde jsou mezi sebou porovnány tóny c^1 , c^2 , e^1 a g^1 , které vzájemně vytvářejí kvintakord. Cílem bylo zjistit, zda budou mít tóny inharmonicitu a generování vyšších harmonických složek. Porovnání inharmonicity všech čtyř tónů je zobrazeno na obrázku 5.14. Zdá se, že určité tóny mají na některých vyšších harmonických podobnou inharmonicitu, ale v zásadě si inharmonicity není vůbec podobná a nenachází se zde žádný větší vzorec s výjimkou fundamentu, 2. a 4. harmonická složka, u kterých se inharmonicity liší pouze o několik setin. Na obrázcích 5.15 a 5.16 lze pozorovat, jak se liší generování vyšších harmonických složek. Je možné si povšimnout jistého vzorce, který se u tohoto nástroje s malými proměnami opakuje. Základem všech tónů je fundament, 4., 9., 10., 18. a 20. harmonická složka. Tyto harmonické složky by měly zachytit a vystihnout zvuk xylofonu.



Obr. 5.14: Inharmonicity mezi tóny u xylofonu



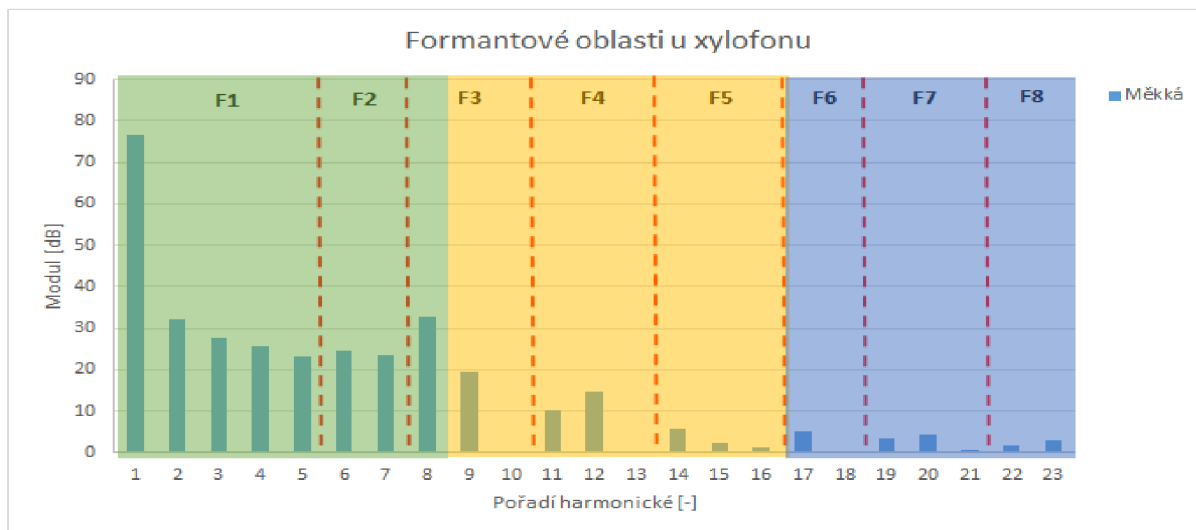
Obr. 5.15: Generování harmonických s referenční hodnotou u xylofonu



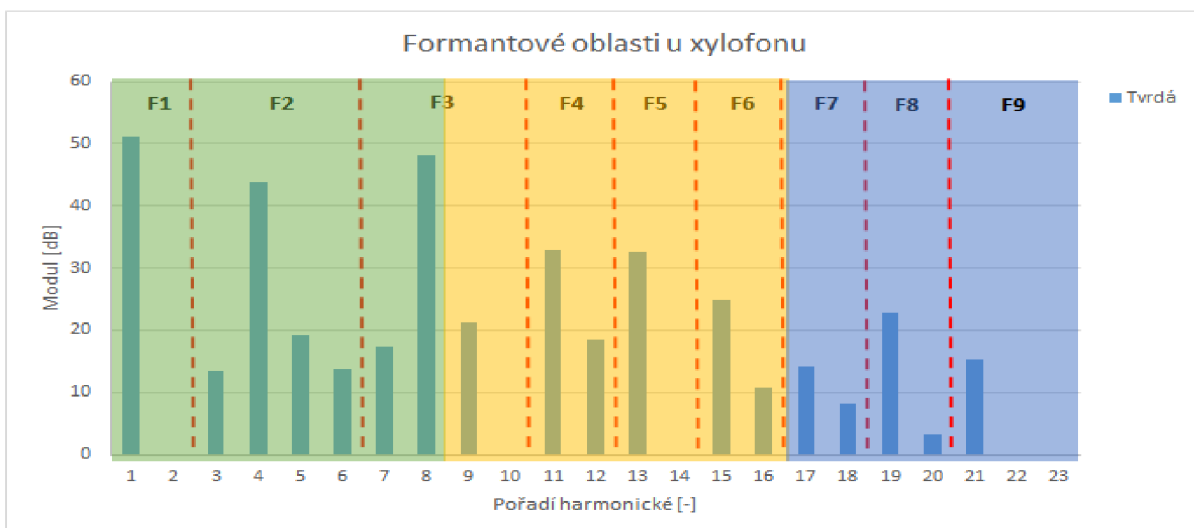
Obr. 5.16: Generování harmonických složek u xylofonu

5.1.4 Formantové oblasti u xylofonu

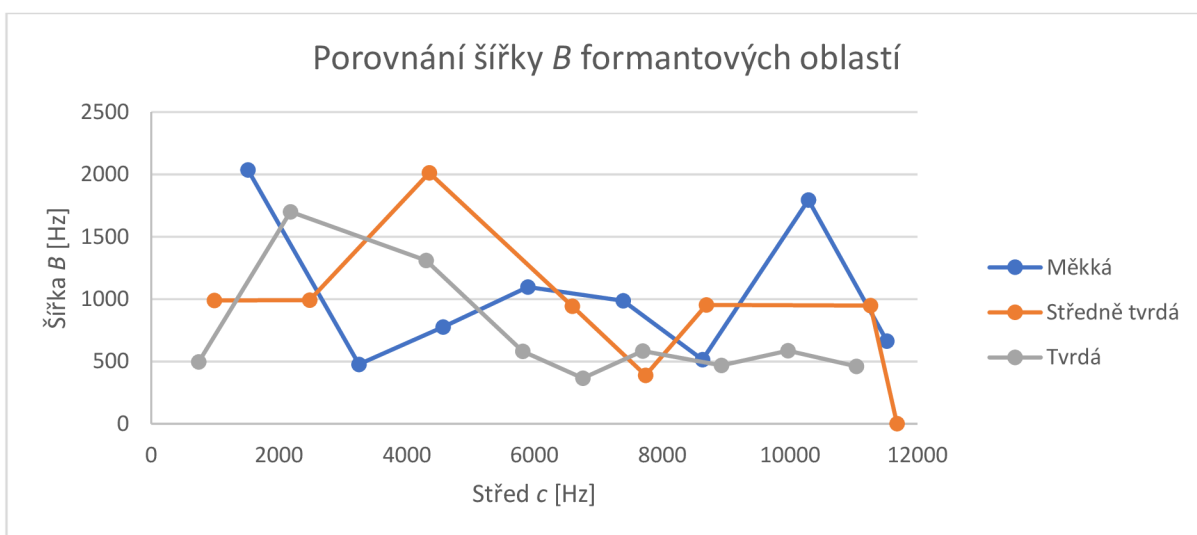
Pro vyobrazení formantových oblastí byly vybrány tóny h^1 a a^1 . Formantové oblasti byly porovnány v závislosti na tvrdosti paličky a dynamice, což bylo přeneseno do grafů. Každá různě tvrdá palička generuje jiný počet, šířku i lokální maximum formantových oblastí. V závislosti na dynamice si jsou tyto oblasti podobné, avšak stále se mezi sebou liší. Rovněž se odlišuje i počet formantů na pásma harmonické řady.



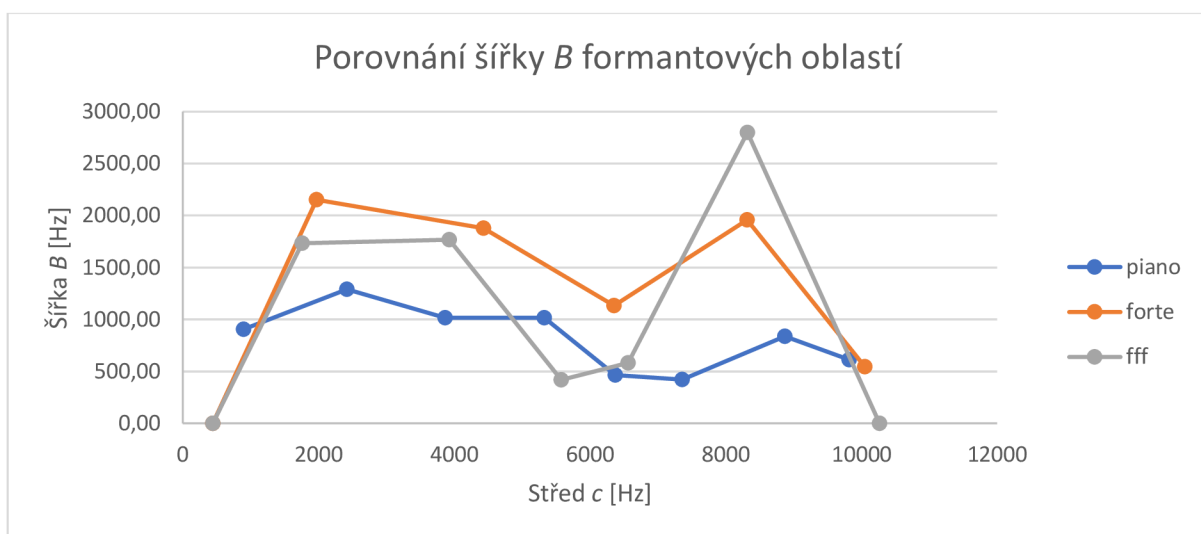
Obr. 5.17: Formantové oblasti xyl-h1-mek-f



Obr. 5.18: Formantové oblasti xyl-h1-tvr-f



Obr. 5.19: Porovnání šířky formantových oblastí pro různé paličky



Obr. 5.20: Porovnání šířky formantových oblastí pro různé dynamiky

5.2 Analýza spektra vibrafonu

Analýzu spektra vibrafonu je popsána stejně jako analýzy spektra xylofonu. Budou zde rovněž zmíněny všechny cíle bakalářské práce, avšak nebudou zobrazeny všechny tabulky, grafy a obrázky. Ty, které nebudou uvedeny přímo v textu, budou k nahlédnutí v příloze této práce.

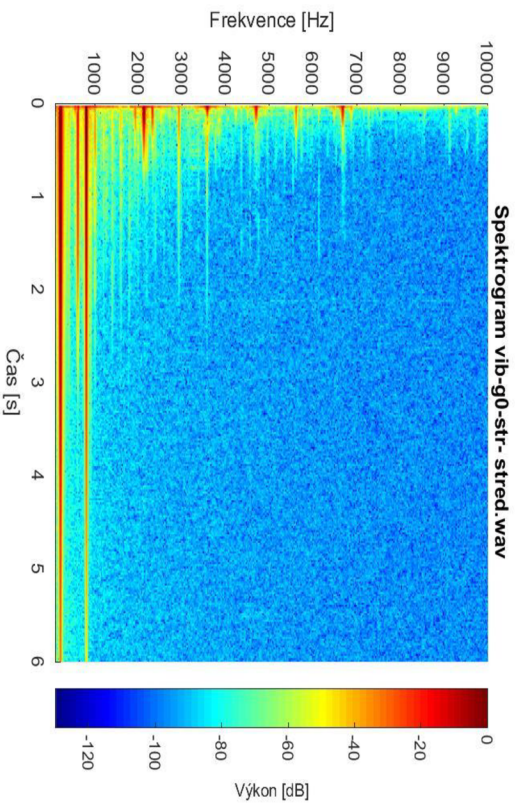
5.2.1 Porovnání spektra v závislosti na místě udeření u vibrafonu

Tato kapitola ukazuje vliv místa udeření na inharmonicitu a výkon jednotlivých harmonických složek. Pro porovnání byl vybrán tón g, který byl zahrán středně tvrdou paličkou v dynamice forte. Na obrázcích 5.22–24 jsou vyobrazeny tři spektrogramy, ze kterých je vidět, že úder do středu a okraje destičky generuje stejné vyšší harmonické složky, avšak při úderu do okraje destičky mají vygenerované vyšší harmonické složky menší výkon. U úderu do uzlu destičky je spektrum lehce odlišné od obou úderů, jelikož rozdíl vygenerovaných vyšších harmonických složek je zde menší než u xylofonu. Uzlem je myšlen bod, kde je destička provrtána.

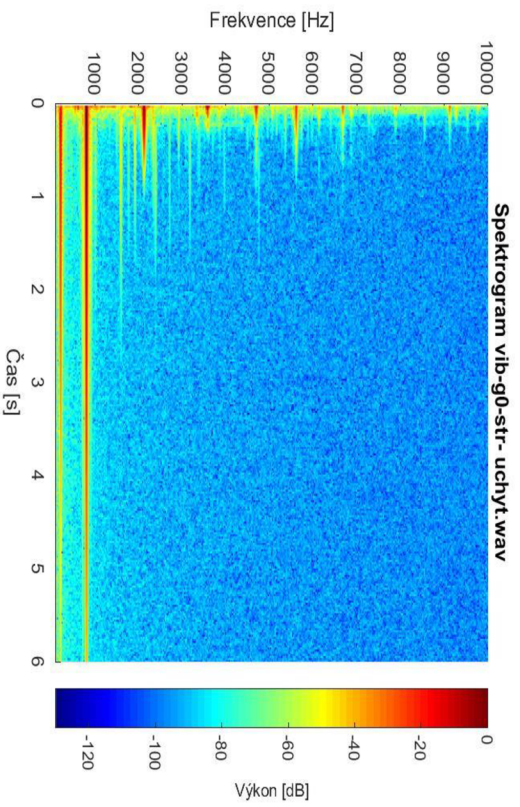
K dalšímu prozkoumání závislosti na místě udeření poslouží tabulka 5.4, ve které je uvedena inharmonicitu a výkon všech tří úderů. Tabulka je také rozdělena na 3 pásma harmonické řady.



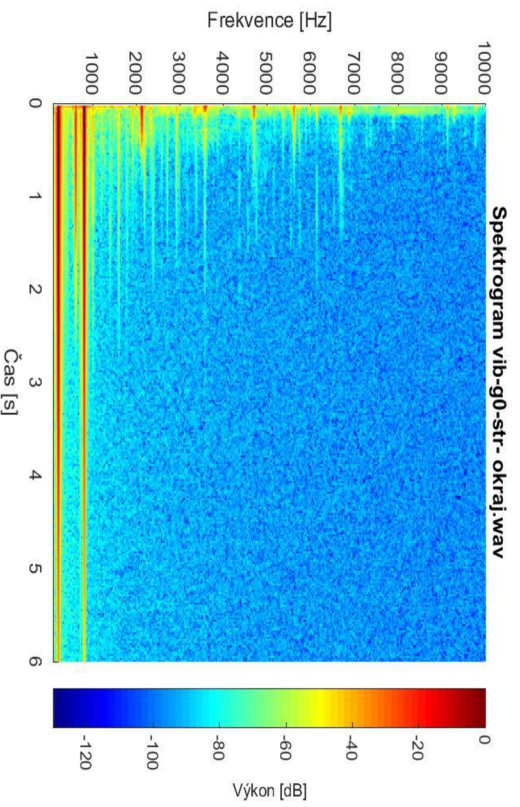
Obr. 5.21: Tón g v notovém zápisu



Obr. 5.22: Spektrogram úderu do středu desičky u vibrafonu



Obr. 5.23: Spektrogram úderu do uzlu desičky u vibrafonu



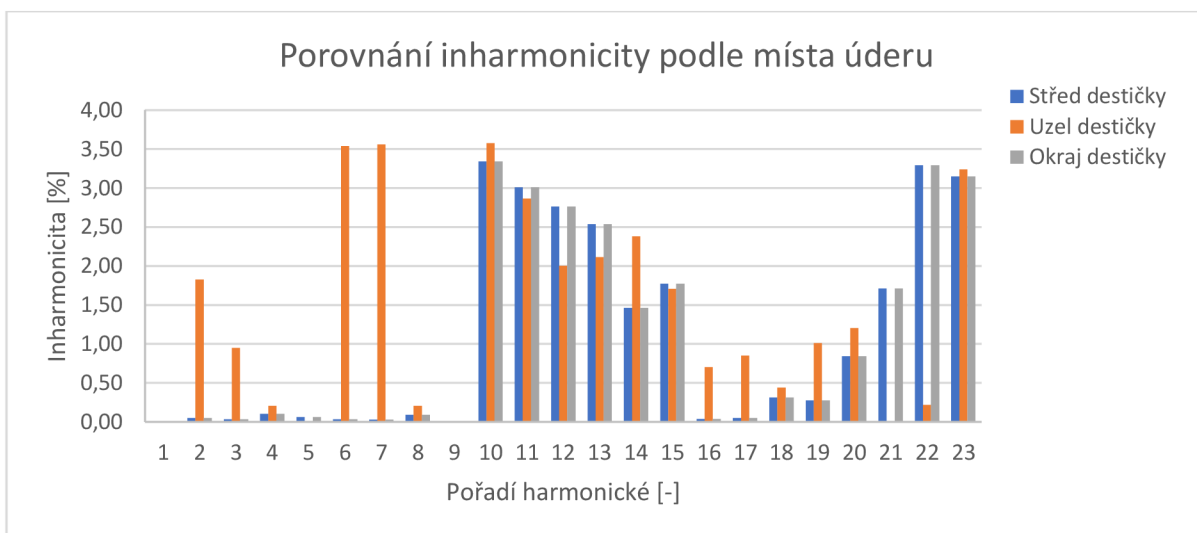
Obr. 5.24: Spektrogram úderu do okraje desičky u vibrafonu

Inharmonicitu úderu do středu destičky činí 24,95 % a je shodná s úderem do okraje destičky. Při udeření do uzlu destičky se inharmonicitu celého spektra tónu zvýší přibližně o 7,5 % na 35,59 %. Největší inharmonicitu vykazuje druhé pásmo harmonické řady pro všechny místa úderů. Místo úderu na spektrum u vibrafonu se jeví jako méně náchylné ke změně inharmonicity s výjimkou úderu do uzlu destičky.

Tab. 5.4: Porovnání míst úderů u vibrafonu

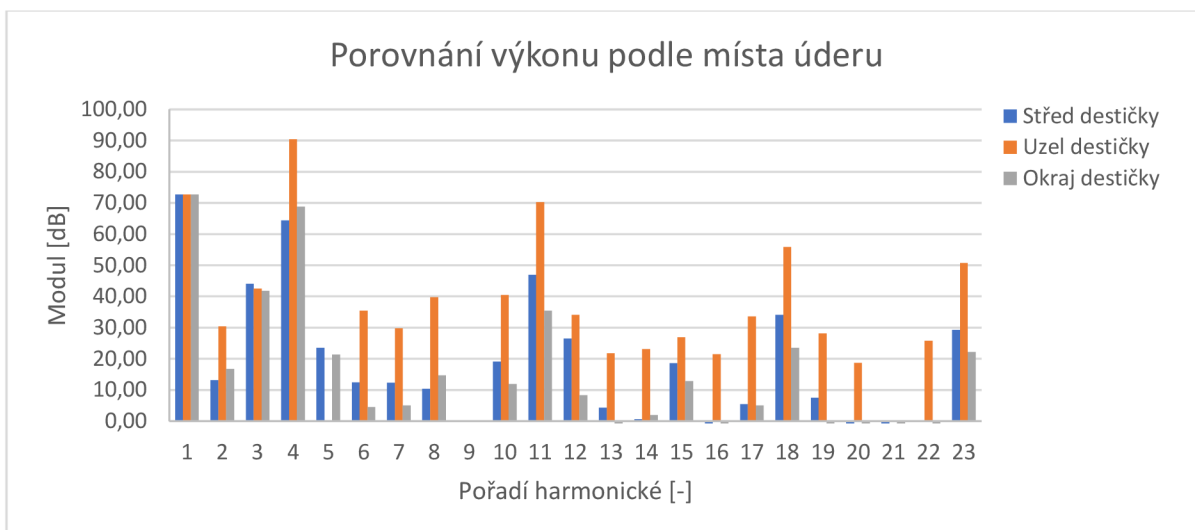
Úder do:	středu destičky			uzlu destičky			okraj destičky		
	Pořadí harm. složky	Frekvence [Hz]	Inharm. [%]	Výkon [dB]	Frekvence [Hz]	Inharm. [%]	Výkon [dB]	Frekvence [Hz]	Inharm. [%]
1.	197,20	0,00	0,00	197,00	0,00	0,00	197,20	0,00	0,00
2.	394,20	0,05	-59,48	401,20	1,83	-42,29	394,20	0,05	-55,89
3.	591,40	0,03	-28,62	596,60	0,95	-30,19	591,20	0,03	-30,90
4.	789,60	0,10	-8,27	789,60	0,20	17,76	789,60	0,10	-3,83
5.	985,40	0,06	-49,09	-	-	-	986,60	0,06	-51,26
6.	1183,60	0,03	-60,24	1141,60	3,54	-37,18	1182,60	0,03	-68,14
7.	1380,01	0,03	-60,31	1331,61	3,56	-42,91	1380,21	0,03	-67,63
8.	1579,01	0,09	-62,26	1579,21	0,20	-32,90	1579,21	0,09	-58,00
9.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10.	1908,21	3,34	-53,58	1902,01	3,57	-32,17	1902,01	3,34	-60,70
11.	2105,81	3,01	-25,74	2106,61	2,87	-2,43	2106,01	3,01	-37,26
12.	2302,81	2,76	-46,18	2317,61	2,00	-38,54	2303,21	2,76	-64,27
13.	2500,21	2,54	-68,30	2508,01	2,11	-50,91	2506,01	2,54	-76,99
14.	2721,01	1,46	-72,06	2693,81	2,38	-49,58	2693,81	1,46	-70,66
15.	2906,41	1,77	-54,02	2905,41	1,71	-45,79	2905,81	1,77	-59,82
16.	3156,41	0,04	-74,10	3130,01	0,70	-51,15	3102,21	0,04	-80,58
17.	3354,01	0,05	-67,20	3320,81	0,85	-39,09	3330,21	0,05	-67,62
18.	3560,61	0,31	-38,56	3561,61	0,44	-16,81	3558,41	0,31	-49,11
19.	3757,02	0,27	-65,11	3780,82	1,01	-44,50	3767,82	0,27	-75,04
20.	3977,22	0,84	-74,31	3987,42	1,20	-53,90	3972,82	0,84	-81,75
21.	4212,02	1,71	-74,75	-	-	-	4160,42	1,71	-89,30
22.	4481,22	3,29	-72,71	4343,42	0,22	-46,87	4346,62	3,29	-76,59
23.	4678,42	3,15	-43,43	4677,82	3,24	-21,89	4678,22	3,15	-50,46

pozn. zvonkohra je laděná pro $a_1 = 442 \text{ Hz}$, $100 \text{ cent} = 8,3333 \% = 1 \text{ půl tón}$



Obr. 5.25: Porovnání inharmonicity podle místa úderu u vibrafonu

Vyobrazení rozdílů inharmonicity a výkonu vyšších harmonických složek mezi úderu je zobrazeno na obrázcích 5.25 a 5.26.



Obr. 5.26 Porovnání výkonu podle místa úderu u vibrafonu

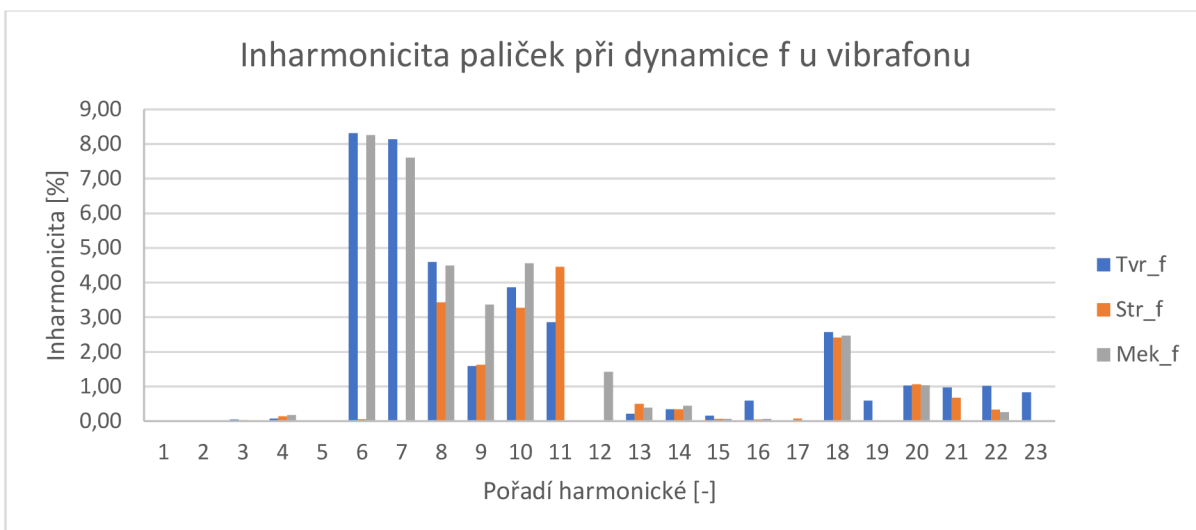
Při porovnání výkonu jednotlivých harmonických složek je vidět, že při úderu do uzlu destičky ztrácí fundament na výkonu a nejmocnější je 4. harmonická složka, v důsledku čehož bude tón postrádat svou nosnost. Mezi úderu do středu a okraje destičky jsou vidět odlišnosti v intenzitě, nicméně generují stejné vyšší harmonické složky oproti úderu do uzlu destičky, který generuje pár vyšší harmonických složek, a to navíc především ve třetím pásmu harmonické řady.

5.2.2 Porovnání vlivu tvrdosti paliček a dynamiky u vibrafonu

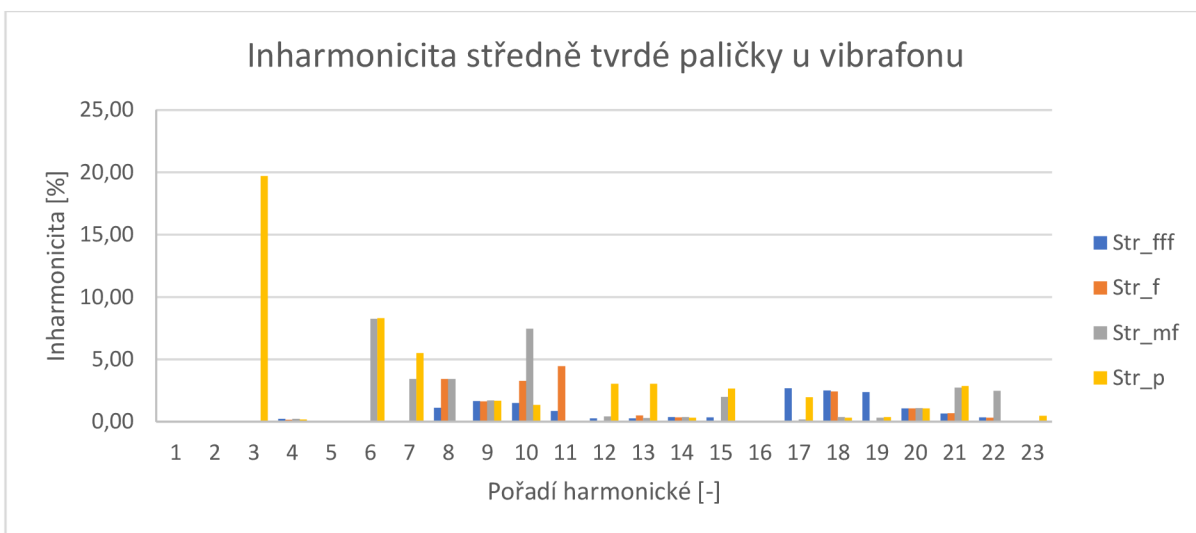
Vliv tvrdosti paliček na inharmonicitu je vyobrazen pomocí grafu na obrázku (5.28). Pro porovnání byl vybrán tón a^1 , který je u vibrafonu laděný na 443 Hz. Z obrázku je patrné, že všechny tři jinak tvrdé paličky mají stejnou nebo hodně podobnou inharmonicitu pro následující harmonické složky fundament, 2., 3., 4., 5., 13., 14., 15., 17., 18., a pro 20. U ostatních vyšších harmonických složek se inharmonicity liší, občasně se pouze pro dvě jinak tvrdé paličky inharmonicity téměř shoduje. Rozdílná inharmonicity se však nejvíce vyskytuje tam, kde jsou vyšší harmonické složky intenzitně nejslabší. Na obrázku 5.29 je graf vyobrazující inharmonicitu různých dynamik hraných středně tvrdou paličkou. S rostoucí silou dynamiky inharmonicity klesá, zatímco při hře ve slabších dynamikách roste. Pro fundament, 2., 4., 5., 9., 14., 16., a 20. harmonickou složku je inharmonicity stejná. Lze usoudit, že tvrdost paličky nemá až takový vliv na inharmonicity jako dynamika. Tvrdost paličky bude mít především vliv na generování vyšších harmonických složek.



Obr. 5.27: Tón a^1 v notovém zápise



Obr. 5.28: Inharmonicitu paliček u vibrafonu



Obr. 5.29: Inharmonicitu paličky při různých dynamikách u vibrafonu

5.2.3 Porovnání tónů u vibrafonu

Stejně jako v kapitole 5.1.3 je nejprve analyzováno pouze jeden vybraný tón. Konkrétně je hodnoceno generování vyšších harmonických složek, inharmonicitu a pásma harmonické řady. V další části této kapitoly jsou srovnány různé tóny mezi sebou.

Pro analýzu byl vybrán tón c^2 , jenž tvoří fundament, 4., 9., 13., a 19. harmonická složka. V prvním pásmu harmonické řady je to fundament a 4., harmonická složka a tóny c^2 a c^4 . Ve druhém pásmu se jedná o 9. a 13. harmonickou složku a tóny d^5 a aes^5 . V posledním, třetím pásmu jde o tón des^6 náležící 19. harmonické složce. Inharmonicitu je největší pro první pásmo a činí 18 %, zatímco u druhého pásma má 16 % a u třetího 12 %. Podobně jako u xylofonu zde s rostoucím pásmem klesá inharmonicitu (přitom se třetí pásmo harmonické řady již skládá s kvaziharmonických složek). Tyto informace byly zaznamenány do tabulky 5.5.



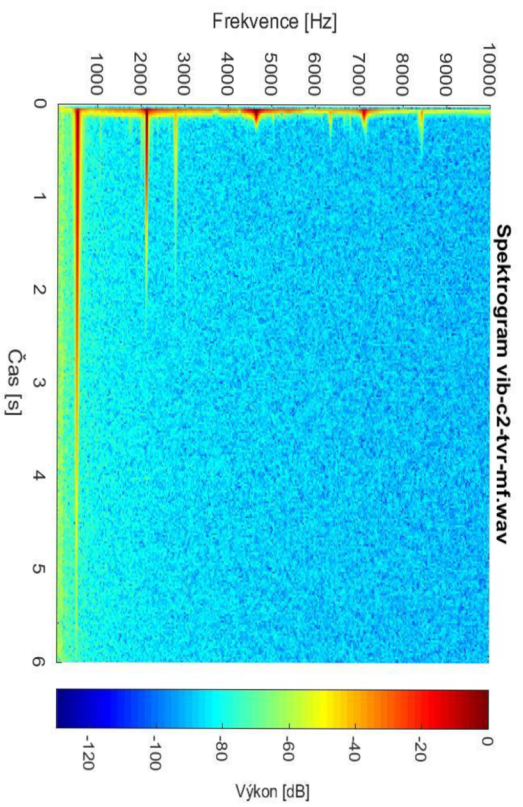
Obr. 5.30: Tón c^2 v notovém zápisu

Tab. 5.5: Orientační naměřené a dopočítané hodnoty tónu c^2 u vibrafonu

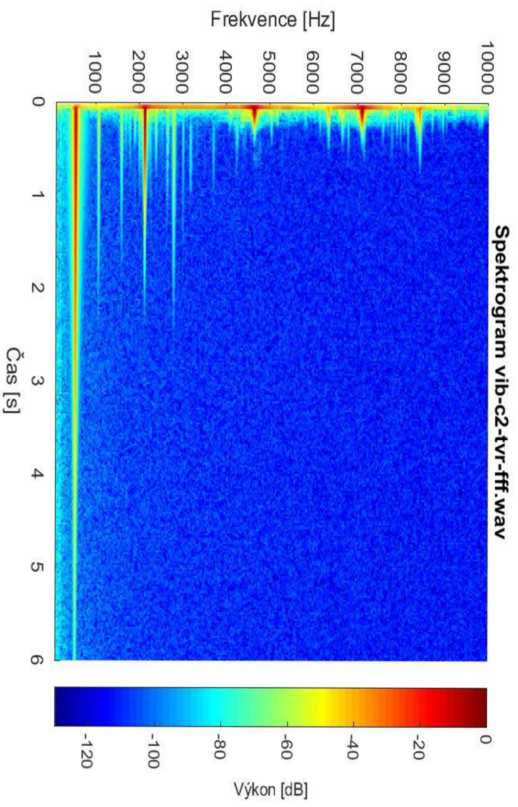
Pořadí harm. složky	Frekvence			Inharm. [%]	Výkon [dB]	Inharm. v centech [-]
	Teor. správná [Hz]	Teor. dopočítaná [Hz]	Naměřená [Hz]			
1.	526,82	526,60	526,60	0,00	0,00	0,00
2.	1053,64	1053,20	1053,20	0,00	-53,16	0,00
3.	1580,46	1579,80	1579,81	0,00	-56,72	0,01
4.	2107,28	2106,40	2112,01	0,27	-5,34	3,20
5.	2634,10	2633,00	2775,61	5,42	-51,81	65,00
6.	3160,92	3159,60	3391,21	7,33	-54,71	87,96
7.	3687,74	3686,20	-	-	-	-
8.	4214,56	4212,80	4023,22	4,71	-51,55	56,55
9.	4741,38	4739,40	4621,02	2,56	-12,77	30,74
10.	5268,20	5266,00	5144,42	2,36	-52,68	28,36
11.	5795,02	5792,60	5635,82	2,78	-63,03	33,38
12.	6321,84	6319,20	6323,03	0,06	-33,98	0,73
13.	6848,66	6845,80	7090,83	3,58	-22,81	42,95
14.	7375,48	7372,40	-	-	-	-
15.	7902,30	7899,00	7607,63	3,83	-63,35	45,96
16.	8429,12	8425,60	8349,43	0,91	-54,16	10,95
17.	8955,94	8952,20	8852,04	1,13	-75,92	13,58
18.	9482,76	9478,80	9673,84	2,06	-75,49	24,69
19.	10009,58	10005,40	10340,64	3,35	-37,46	40,21
20.	10536,40	10532,00	10932,25	3,80	-57,24	45,60
21.	11063,22	11058,60	-	-	-	-
22.	11590,04	11585,20	11433,25	1,33	-75,69	15,95
23.	12116,86	12111,80	12038,85	0,61	-83,88	7,27

pozn. vibrafon je laděná pro $a_1 = 443$ Hz, 100 cent = 8,3333 % = 1 půl tón

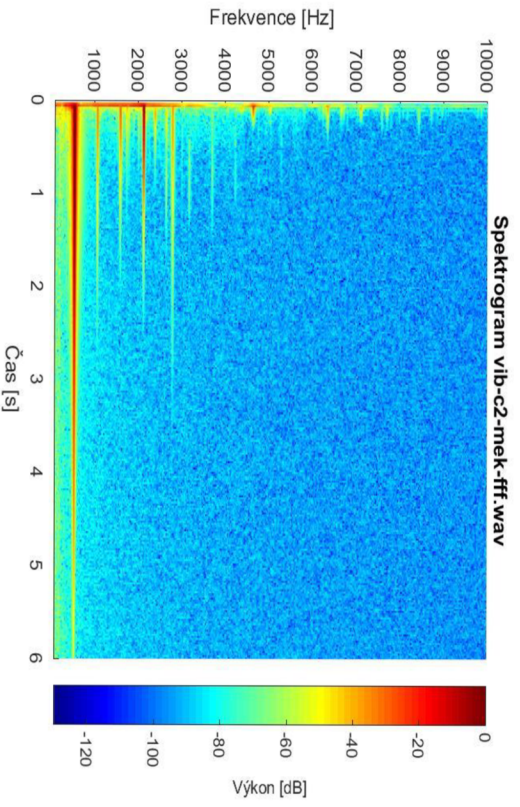
Pro porovnání vlivu tvrdosti paličky a dynamiky na generování vyšších harmonických složek bylo zvoleno vyobrazení pomocí spektrogramů. Na obrázku 5.31 je vidět tón zahráný tvrdou paličkou v dynamice mezzoforte, na obrázku 5.32 je zobrazen tón zahráný stejně tak tvrdou paličkou v dynamice forte fortissimo a na obrázku 5.33 je uveden tón zahráný měkkou paličkou v dynamice forte fortissimo. Z obrázku lze vidět, že tvrdost paličky má vliv na vygenerování počtu vyšších harmonických složek a jejich intenzitu. Největší vliv na generování vyšších harmonických složek má však dynamika (počet harmonických složek je zde nižší). Vyšší harmonické složky, které tvoří základ tónu a barvy tónu zde však přetrvávají. Jedná se o fundament, 4., 9 a 13. harmonickou složku.



Obr. 5.31: Spektrogram vib-c2-tvr-mf

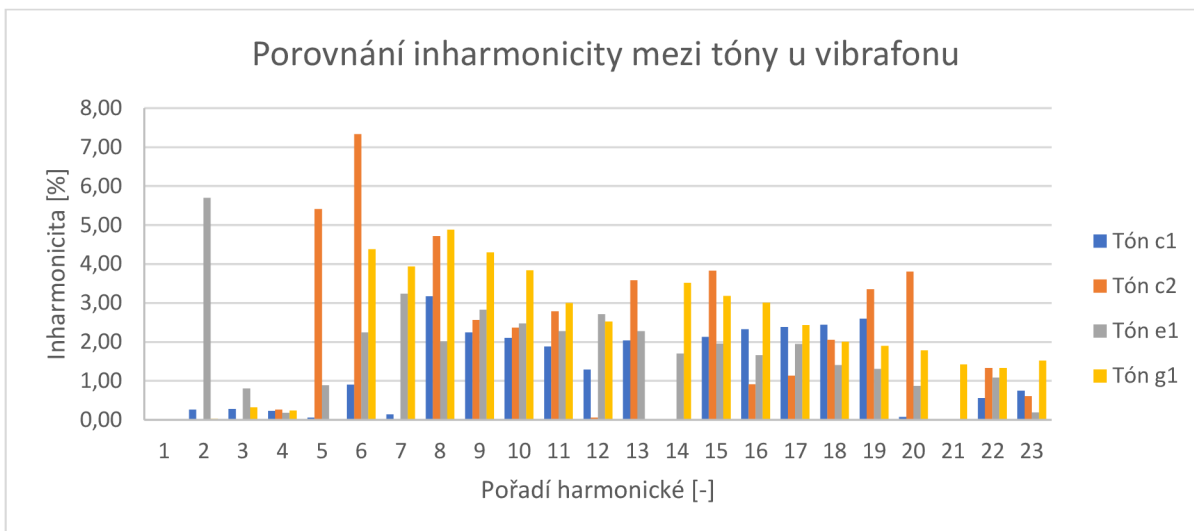


Obr. 5.32: Spektrogram vib-c2-tvr-fff



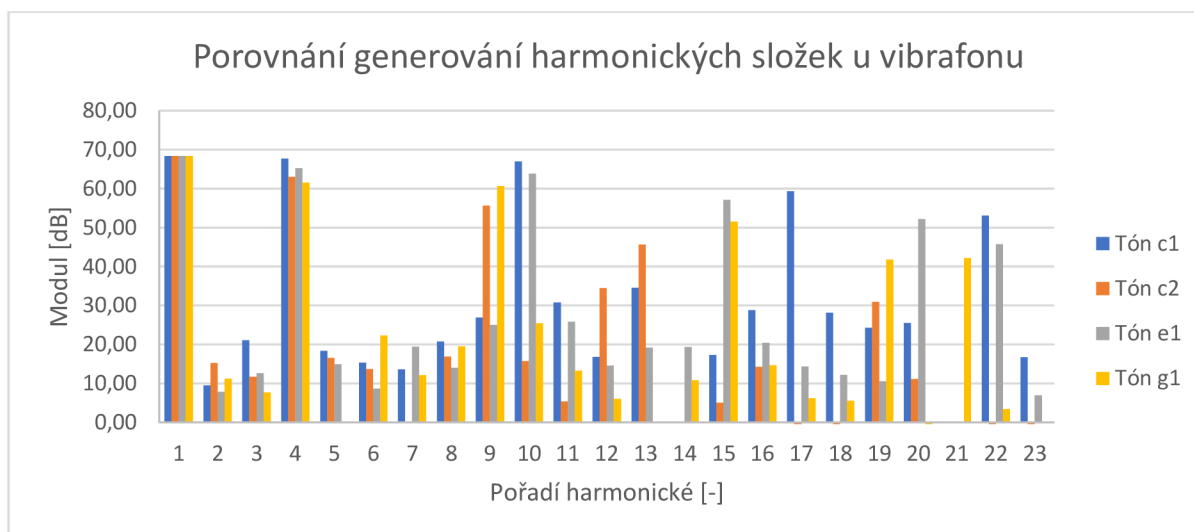
Obr. 5.33: Spektrogram vib-c2-mek-fff

Dále je porovnáváno více tónů mezi sebou. Stejně jako u xylofonu byly vybrány tóny c^1 , c^2 , e^1 a g^1 , které vzájemně vytvářejí kvintakord. Při porovnání jejich inharmonicity, což lze vidět na obrázku 5.34, možné usoudit, že inharmonicitu tónů se od sebe liší kromě fundamentu a 4. harmonické složky v 1. pásmu harmonické řady.

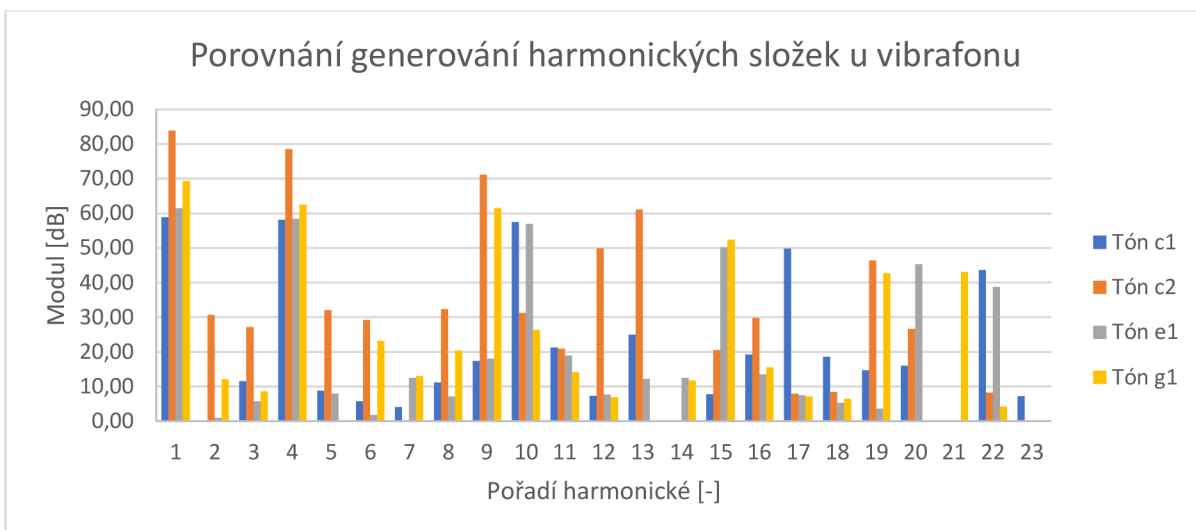


Obr. 5.34: Inharmonicity mezi tóny u xylofonu

Na obrázku 5.35 je vyobrazen výkon jednotlivých harmonických složek mezi různými tóny. Fundament, 4., 16. harmonická složka tvoří všem 4 tónům velmi podobný základ. Lze si všimnout, že se 9. a 10. harmonická složka generuje mezi tóny odlišně, ale že jsou také součástí základu tónu. Tón c^1 generuje své vyšší harmonické složky s největší intenzitou. Hráč však nemusel dodržet mu zvolenou dynamiku.



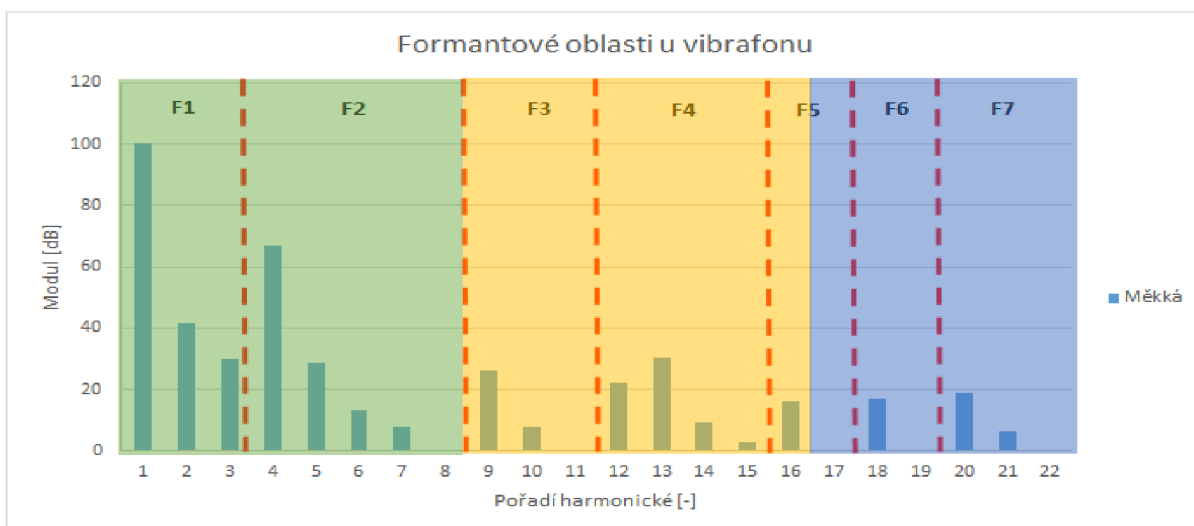
Obr. 5.35: Generování harmonických složek s referenční hodnotou u vibrafonu



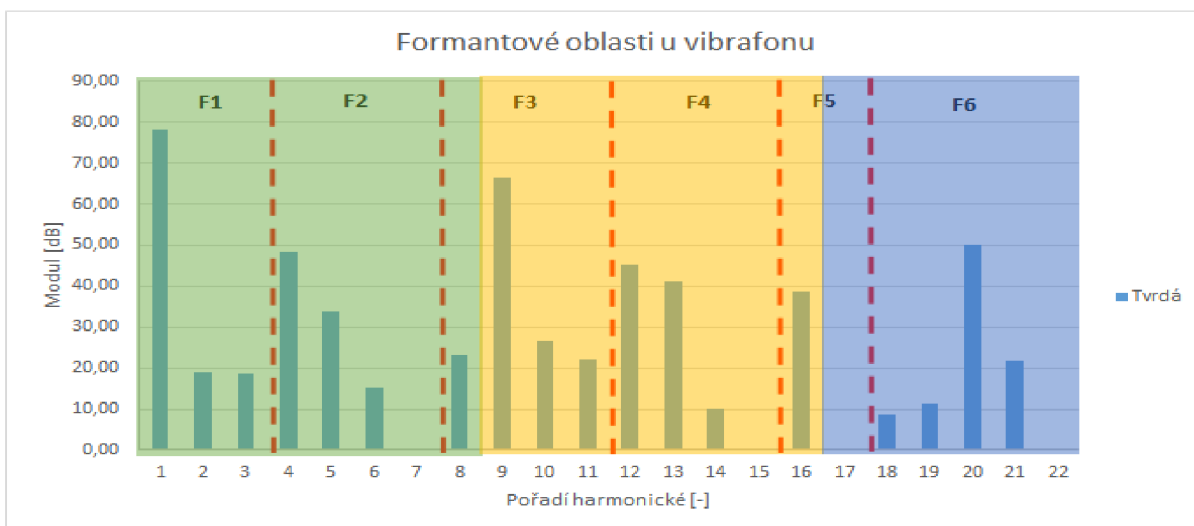
Obr. 5.36: Generování harmonických složek u vibrafonu

5.2.4 Formantové oblasti u vibrafonu

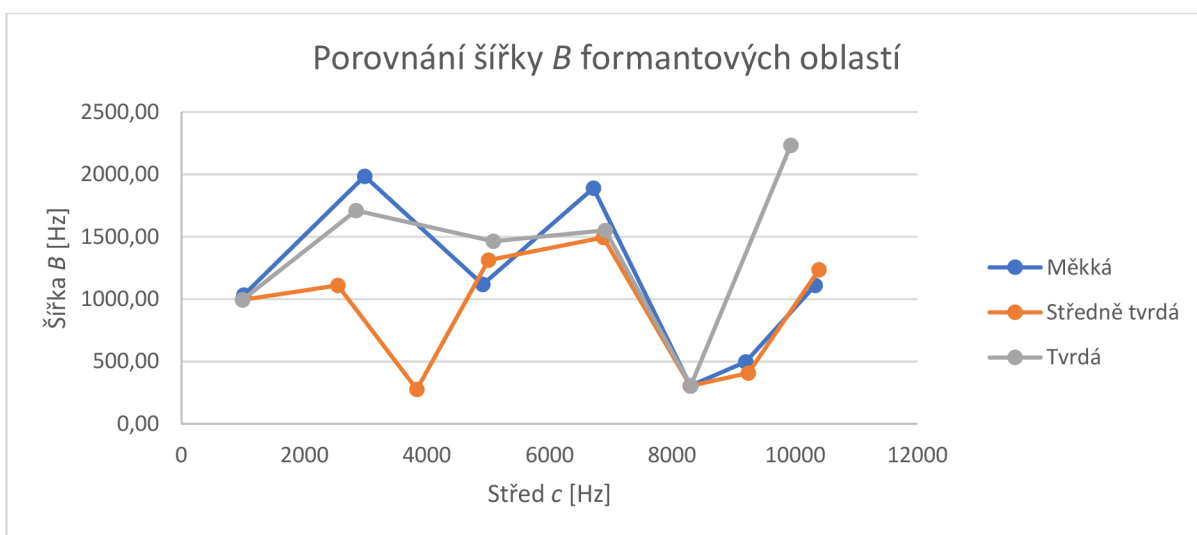
Pro porovnání formantových oblastí byly vybrány tóny h^1 a a^1 , k nimž bylo vytvořeno několik tabulek a grafů v závislosti na dynamice a tvrdosti paličky. Stejně jako u xylofonu se zde formantové oblasti málokdy shodnou. Tón h^1 vytváří 6 až 8 formantových oblastí, které mají rozdílnou šířku pásem, střed i lokální maximum (špičky) v pásmech. Lokální maximum se mění nejméně a tvoří jej 4 až 5 vyšších harmonických složek, které se podílejí na stavbě tónu. Na obrázcích 5.36 a 5.37 je vyobrazeno porovnání měkké a tvrdé paličky v dynamice forte. Obrázek 5.38 ukazuje porovnání šířky pásem tónu h^1 hraného rozdílně tvrdými paličkami. Porovnání šířky pásma tónu h^1 hraného ve 3 dynamikách lze vidět na obrázku 5.39.



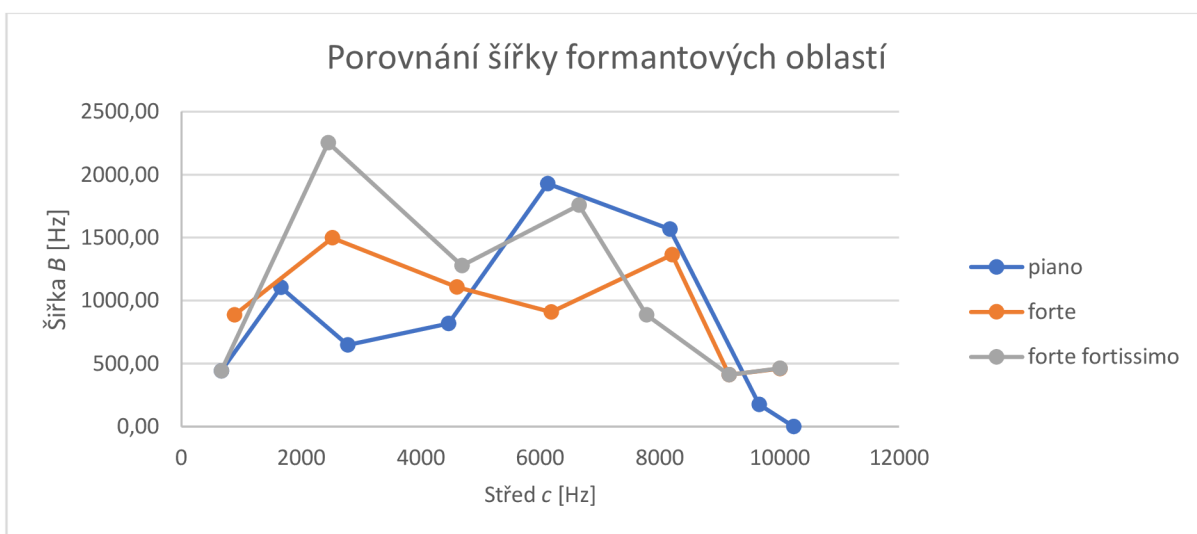
Obr. 5.36: Formantové oblasti vib-h1-mek-f



Obr. 5.37: Formantové oblasti vib-h1-tvr-f



Obr. 5.38: Porovnání šířky formantových oblastí pro různé paličky h¹



Obr. 5.39: Porovnání šířky formantových oblastí pro různé dynamika a¹

5.3 Analýza spektra zvonkohry

Analýza spektra zvonkohry je v této kapitole vyobrazena a popsána stejně jako ostatní hudební nástroje v předešlých dvou kapitolách.

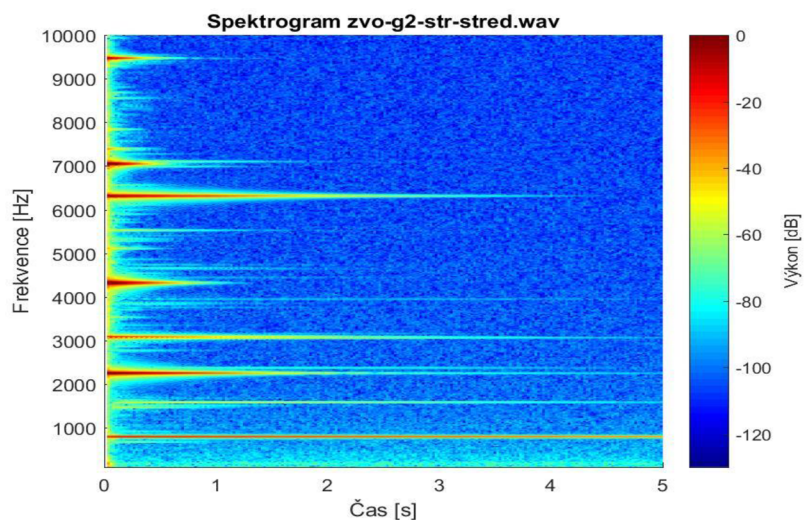
5.3.1 Porovnání spektra v závislosti na místě udeření u zvonkohry

Pro možnost odhalení inharmonických vzorců nebo základního vzorce stavby tónu bude u zvonkohry hrát velkou roli místo úderu. Tuto skutečnost je třeba brát v potaz při malých odchylkách v následujících grafech.

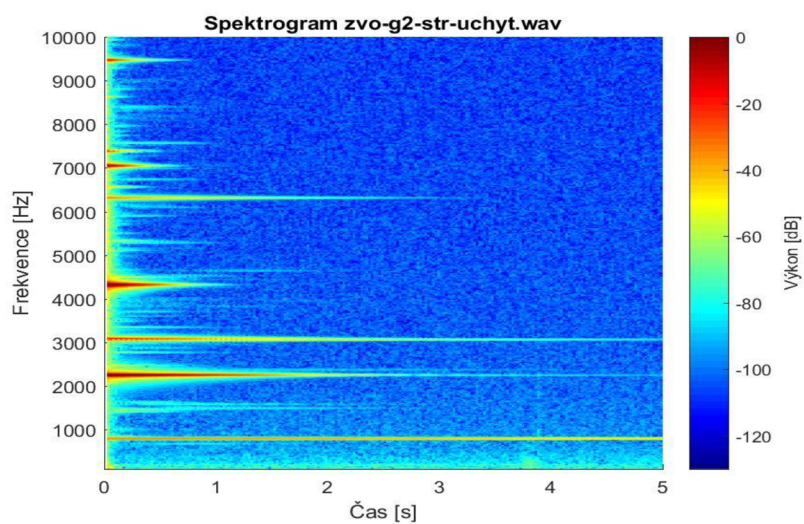
Pro porovnání byl vybrán tón g^2 , který byl zahrán středně tvrdou paličkou v dynamice forte na třech různých místech, a to ve středu, v místě uchycení (uzlu) a na okraji destičky. Na obrázcích 5.40–42 jsou zobrazeny tři spektrogramy, které zachycují rozdíly generování vyšších harmonických složek ve spektru tónu, jejich počet, intenzitu a dobu trvání při odlišném místě udeření. Ze spektrogramů lze zjistit, že místo udeření nemá sice velký vliv na počet vygenerovaných vyšších harmonických složek, ale ovlivňuje intenzitu těchto složek. Ta se zdá být největší při úderu paličky do středu destičky. Úder do okraje destičky se jeví přibližně stejně jako úder do jeho uzlu. V tomto případě se jedná o velký rozdíl oproti údajům zaznamenaných u xylofonu a vibrafonu.



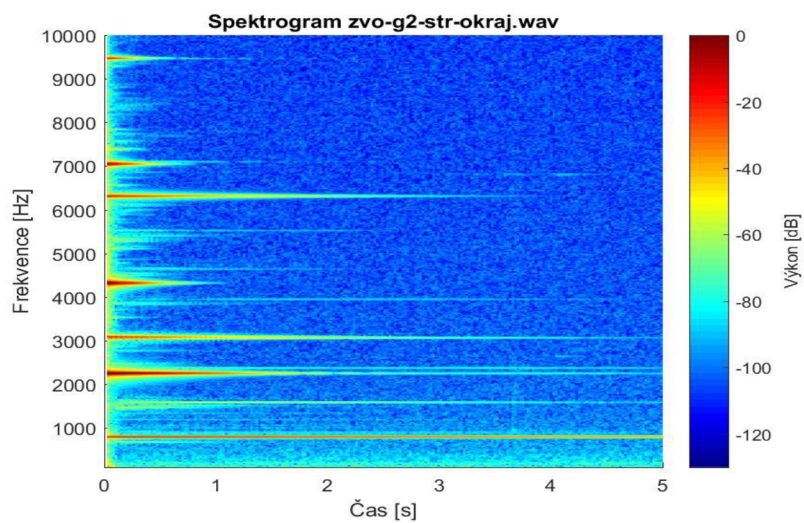
Obr. 5.39: Tón g^2 v notovém zápisu



Obr. 5.40: Spektrogram úderu do středu destičky u zvonkohry



Obr. 5.41: Spektrogram úderu do uzlu destičky u zvonkohry



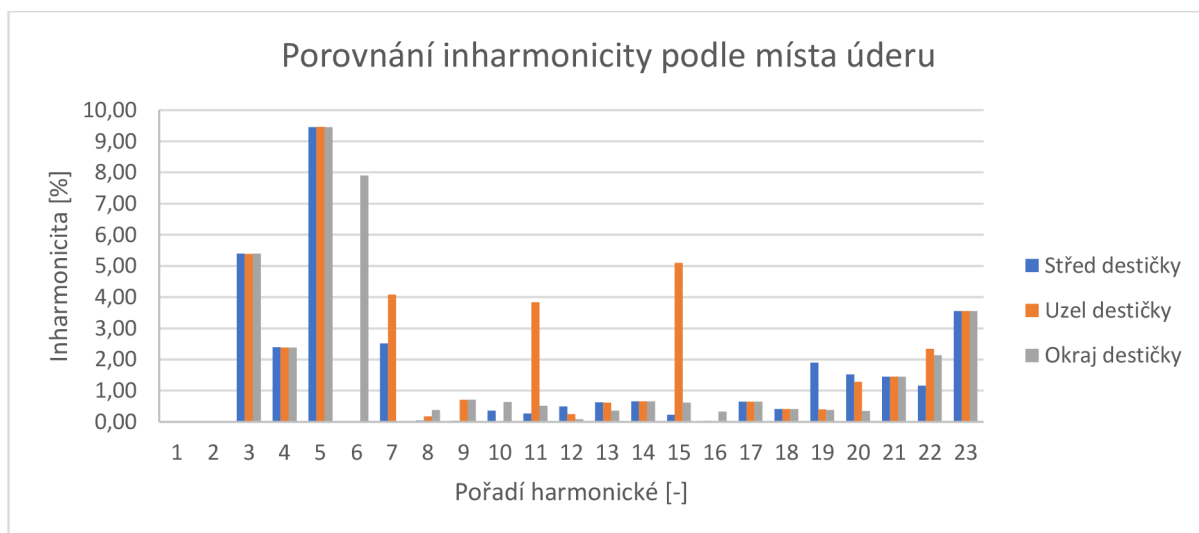
Obr. 5.42: Spektrogram úderu do středu destičky u zvonkohry

Tabulka 5.6 ukazuje vliv místa úderu především na inharmonicitu, kterou velmi ovlivňuje. Největší inharmonicity (43 %) je dosaženo při udeření do uzlu destičky. Oproti tomu při udeření do středu destičky činí inharmonicity 33 % a při úderu do okraje 38 %. Obrazné vyobrazení inharmonicity je možné vidět na obrázku 5.43. pro fundament, 2., 3., 4., 5., 14., 17., 18., 21. a 23. harmonickou složku je inharmonicity shodná pro různá místa úderů do destičky.

Tab. 5.6: Porovnání místa úderu u zvonkohry

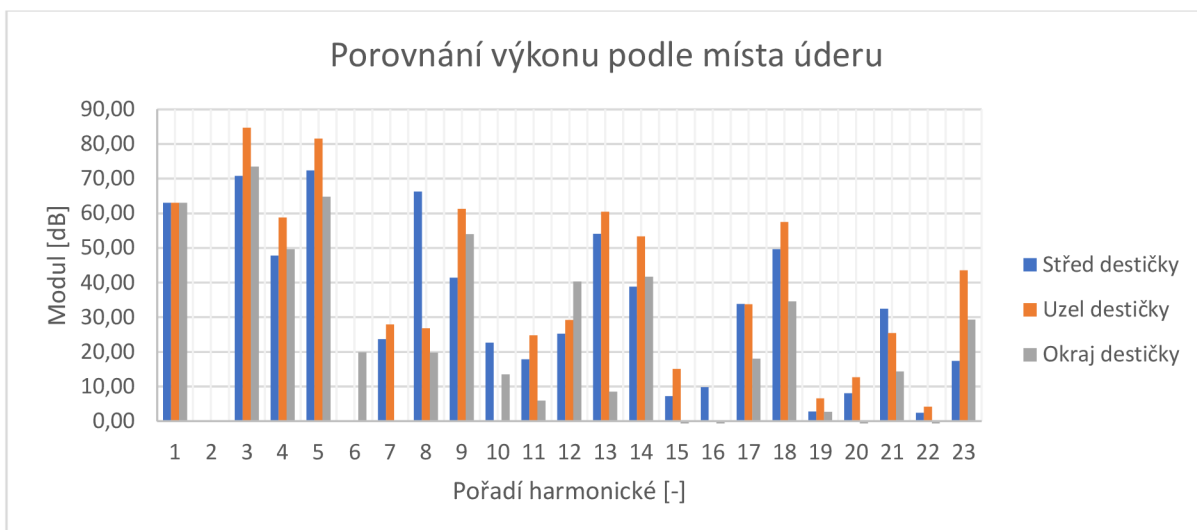
Úder do:	středu destičky			uzlu destičky			okraj destičky		
	Pořadí harm. složky	Frekvence [Hz]	Inharm. [%]	Výkon [dB]	Frekvence [Hz]	Inharm. [%]	Výkon [dB]	Frekvence [Hz]	Inharm. [%]
1.	787,80	0,00	0,00	787,80	0,00	0,00	787,80	0,00	0,00
2.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.	2242,41	5,40	7,71	2242,61	5,39	21,72	2242,41	5,40	10,42
4.	3077,61	2,39	-15,23	3078,01	2,38	-4,27	3077,81	2,38	-13,45
5.	4311,42	9,45	9,29	4311,62	9,46	18,55	4311,42	9,45	1,76
6.	-	-	-	-	-	-	5100,42	7,90	-43,15
7.	5379,42	2,51	-39,37	5298,02	4,09	-35,10	-	-	-
8.	6304,63	0,04	3,24	6291,43	0,17	-36,24	6278,83	0,38	-43,26
9.	7092,03	0,03	-21,62	7040,43	0,71	-1,82	7040,23	0,71	-9,08
10.	7850,03	0,36	-40,42	-	-	-	7828,23	0,64	-49,50
11.	8642,64	0,27	-45,19	8345,83	3,83	-38,24	8621,44	0,51	-57,15
12.	9407,84	0,49	-37,77	9430,84	0,24	-33,88	9461,44	0,08	-22,73
13.	10178,24	0,62	-8,99	10178,44	0,62	-2,59	10204,84	0,36	-54,54
14.	11101,45	0,66	-24,18	11101,85	0,66	-9,69	11101,45	0,66	-21,37
15.	11843,05	0,22	-55,78	12420,25	5,10	-47,98	11889,45	0,61	-69,68
16.	12608,65	0,03	-53,22	-	-	-	12645,85	0,33	-69,63
17.	13478,86	0,64	-29,21	13479,06	0,65	-29,27	13479,06	0,65	-45,01
18.	14238,46	0,41	-13,39	14238,86	0,41	-5,57	14238,26	0,41	-28,51
19.	15252,06	1,90	-60,29	15028,46	0,40	-56,49	15025,06	0,38	-60,37
20.	15994,67	1,51	-54,96	15957,87	1,28	-50,39	15810,07	0,34	-64,09
21.	16782,87	1,45	-30,64	16783,47	1,45	-37,58	16783,27	1,45	-48,69
22.	17533,27	1,16	-60,59	17737,87	2,34	-58,84	17701,87	2,14	-65,15
23.	18762,28	3,55	-45,68	18762,88	3,55	-19,56	18762,48	3,55	-33,79

pozn. zvonkohra je laděná pro a1 = 442 Hz, 100 cent = 8,3333 % = 1 půl tón



Obr. 5.43: Porovnání inharmonicity podle místa úderu u zvonkohry

Při porovnání výkonu vyšších harmonických složek, jak je vyobrazeno na obrázku 5.44 je patrné, že se výkon pro různá místa úderů do destičky skokově liší o +/- 10 dB. Také je vidět, že fundament tohoto tónu je výkonově slabší než 3. a 5. harmonická složka.



Obr. 5.44: Porovnání výkonu podle místa úderu u zvonkohry

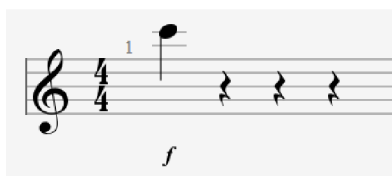
5.3.2 Porovnání vlivu tvrdosti paliček a dynamiky u zvonkohry

Pro porovnání vlivu tvrdosti paliček a dynamiky u zvonkohry především na inharmonicitu byl zvolen tón c^3 . Pro znázornění jsou použity dva grafy.

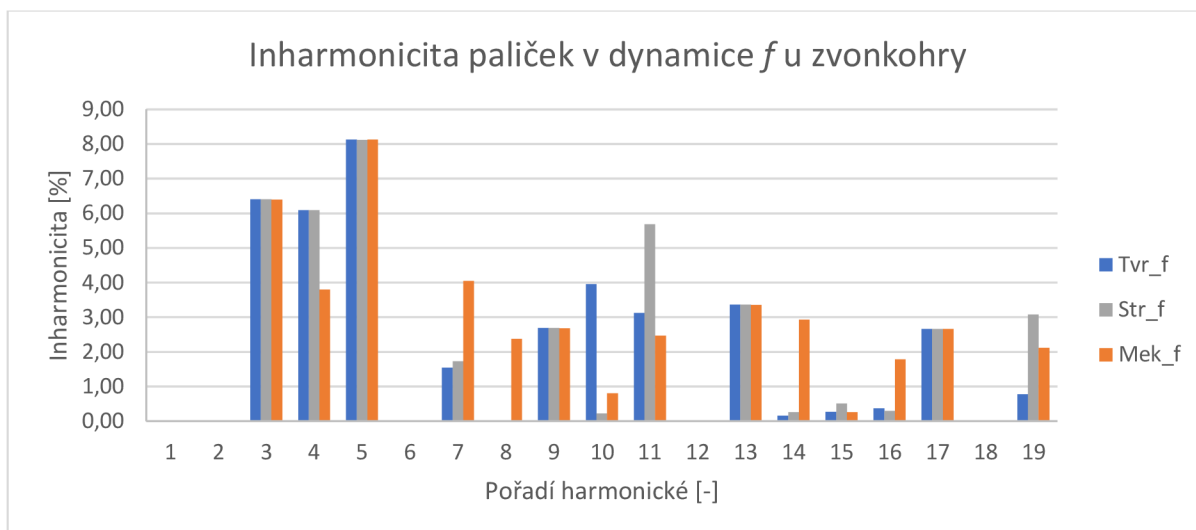
Na obrázku 5.46 je vidět vliv různé tvrdosti paliček v dynamice forte na inharmonicitu spektra daného tónu. Pro tóny, které mají ve spektru největší výkon a tvoří základní stavbu tónu, je inharmonicitu pro všechny typy tvrdosti paliček stejná a liší se pouze pro tóny, které jsou příměsí v barvě tónu. Inharmonicitu u zvonkohry je největší v prvním pásmu, které je vnímané jako složené z intervalů. Zkušenějším posluchačům by tato inharmonicitu mohla při poslechu vadit. Zvonkohra by tak mohla špatně ladit do oktáv a čistých kvintakordů.

Porovnání vlivu dynamiky, která byla zahrána středně tvrdou paličkou, na inharmonicitu je vyobrazeno na obrázku 5.47. Inharmonicitu je zde pro fundament, 2., 3., 4., 5., 9., 13., 17. a 18. harmonickou složku stejná pro všechny zahrané dynamiky.

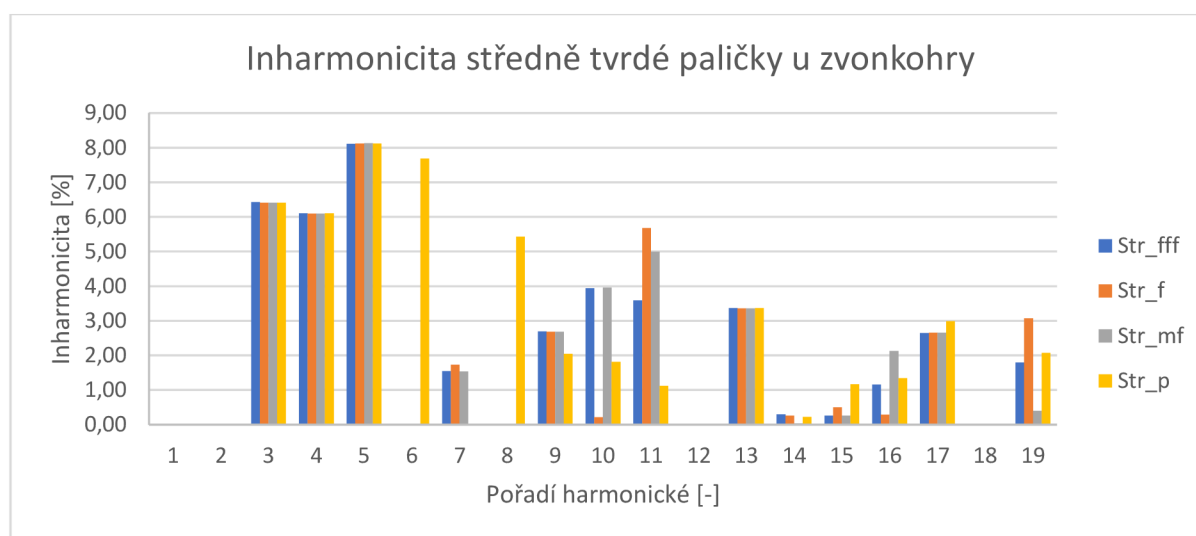
Tvrdost paličky a různá dynamika nemá velký vliv na změnu inharmonicity ve spektru daného tónu. V další kapitole 5.3.3 bude vyobrazen vliv tvrdosti paličky a různé dynamiky na generování vyšších harmonických složek.



Obr. 5.45: Tón c^3 v notovém zápisu



Obr. 5.46: Inharmonicity of piano hammers in dynamic f



Obr. 5.47: Inharmonicity at different dynamics of piano hammers

5.3.3 Comparison of tones in piano

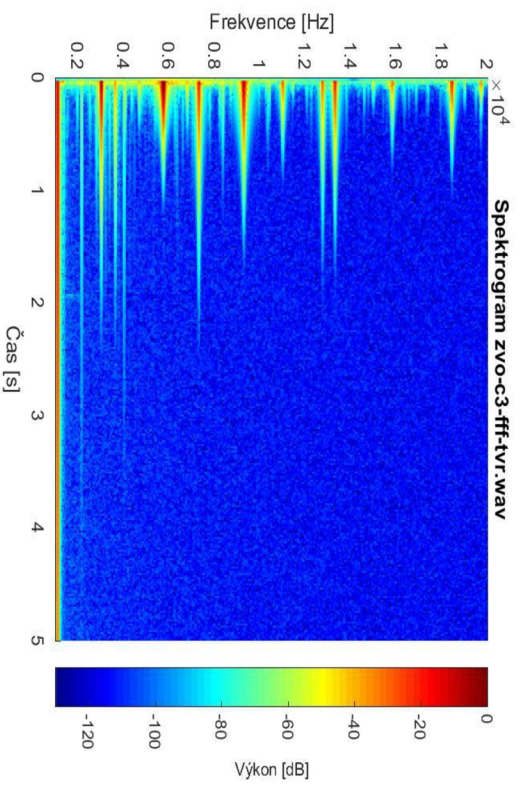
Just as in the previous chapters, here we first compare one selected tone and then compare the generation of higher harmonic components, inharmonicity and harmonic bands. In the further part of the chapter, different tones are compared with each other.

For comparison, the tone c^3 was chosen, which was played with a hard hammer in dynamic forte (its notation is visible in picture 5.45). The evaluation was done using table 5.7 and spectrograms. The tone here creates the fundamental, 3., 5., 7., 9., 13. and 17. harmonic component. When divided into bands, it is in the first band the fundamental, 3., 5. and 7. harmonic component. It is about the tones c^3 , g^4 , e^5 and a^{is5} , which will fit well with the septakord $C7$. The second band contains 9. and 13. harmonic component d^6 and g^{is6} . In the last, third band, it is the tone c^{is7} for 17. harmonic component. Inharmonicity of the tone in the whole spectrum is 44 % (22 % in the first band, 14 % in the second band and 8 % in the third band).

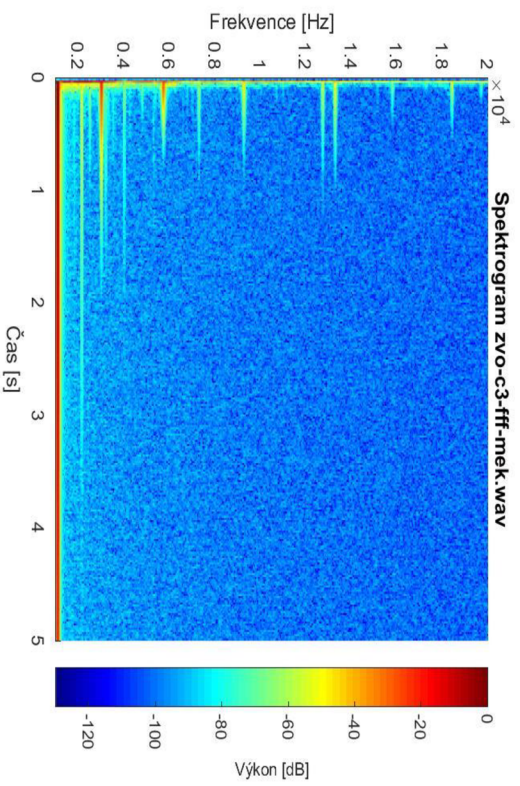
Tab. 5.7: Orientační tabulka naměřených a vypočítaných hodnot u zvonkohry

Pořadí harm. složky	Frekvence			Inharm. [%]	Výkon [dB]	Inharm. v centech [-]
	Teor. správná [Hz]	Teor. dopočítaná [Hz]	Naměřená [Hz]			
1.	1051,26	1054,20	1054,20	0,00	0	0,00
2.	2102,52	2108,40	-	-	-	-
3.	3153,78	3162,60	2972,21	6,41	-9	76,87
4.	4205,04	4216,80	3974,62	6,09	-46	73,12
5.	5256,30	5271,00	5699,42	8,13	-8	97,53
6.	6307,56	6325,20	-	-	-	-
7.	7358,82	7379,40	7267,03	1,55	-33	18,56
8.	8410,08	8433,60	-	-	-	-
9.	9461,34	9487,80	9239,64	2,69	-18	32,23
10.	10512,60	10542,00	10958,65	3,95	-54	47,43
11.	11563,86	11596,20	11958,65	3,13	-80	37,51
12.	12615,12	12650,40	-	-	-	-
13.	13666,38	13704,60	13259,06	3,36	-32	40,32
14.	14717,64	14758,80	14735,66	0,16	-76	1,88
15.	15768,90	15813,00	15771,07	0,27	-60	3,19
16.	16820,16	16867,20	16804,87	0,37	-74	4,45
17.	17871,42	17921,40	18398,28	2,66	-33	31,93
18.	18922,68	18975,60	-	-	-	-
19.	19973,94	20029,80	19875,28	0,78	-70	9,33
20.	21025,20	21084,00	20875,89	1,00	-71	11,96
21.	22076,46	22138,20	21877,49	1,19	-73	14,30
22.	23127,72	23192,40	23690,50	2,15	-68	25,77
pozn. zvonkohra je laděná pro a1 = 442 Hz, 100 cent = 8,3333 % = 1 půl tón						

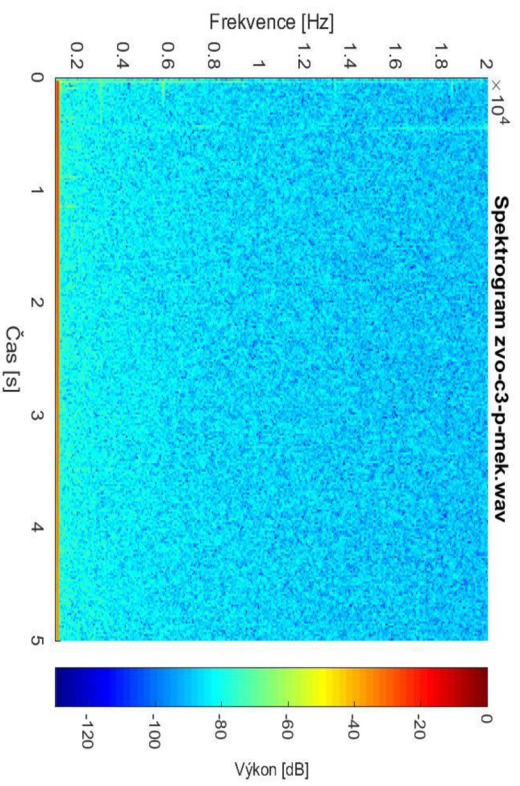
Vliv tvrdosti paliček a dynamiky na generování vyšších harmonických složek je ukázán na obrázcích 5.48–50). Při hře tvrdou paličkou v dynamice forte fortissimo bylo vygenerováno nejvíce vyšších harmonických složek. Při hře ve stejné dynamice ale s užitím měkké paličky bylo generováno menší množství vyšších harmonických složek s viditelným poklesem výkonu celého spektra tónu, a to především ve třetím pásmu. Vzorek, který byl zahrán měkkou paličkou v dynamice piano, významně strádá na počtu vyšších harmonických složek a z obrázku 5.50 lze vidět pouze fundament. Tento tón bude mít velice hebkou barvu, avšak na úkor jeho průraznosti hudebním tělesem. Proto jsou pro hru na zvonkohru zvolené velmi tvrdé paličky z kovu nebo tvrdého dřeva.



Obr. 5.48: Spektrogram zvo-c3-fff-tvr

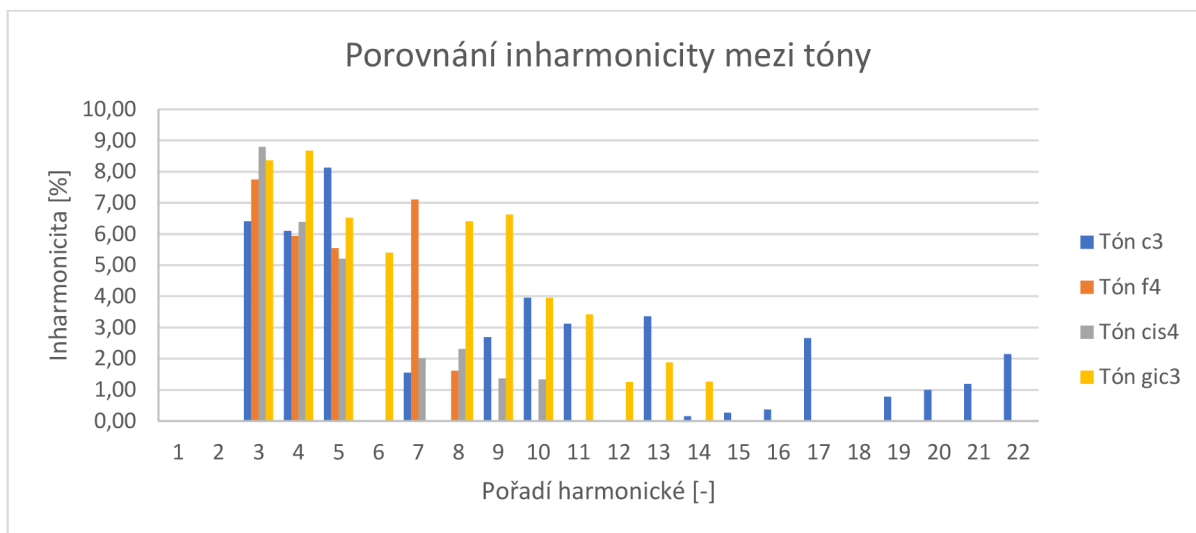


Obr. 5.49: Spektrogram zvo-c3-fff-mek



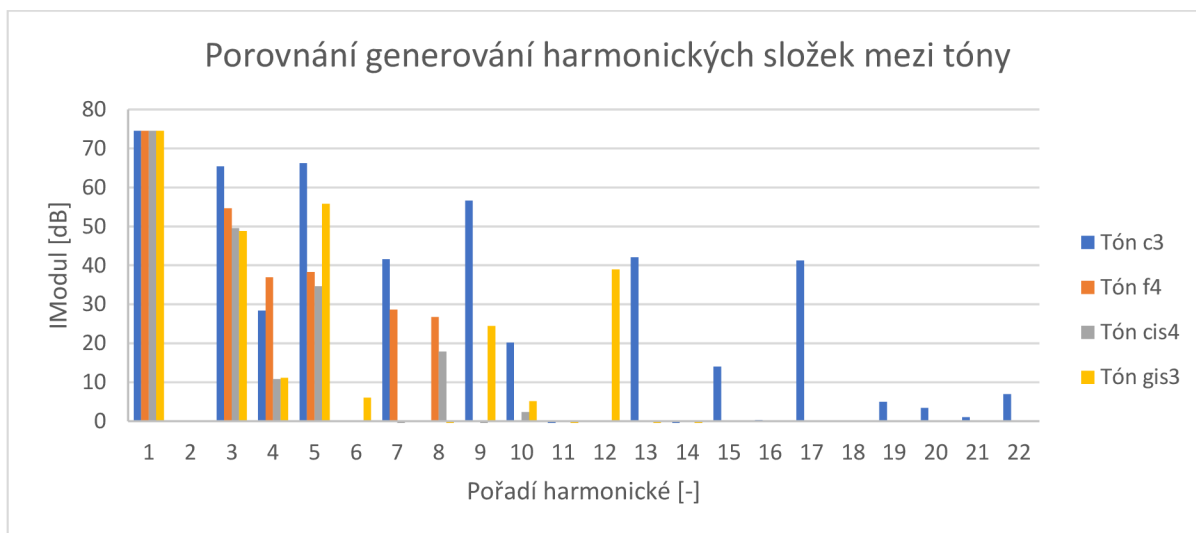
Obr. 5.50: Spektrogram zvo-c3-p-mek

Následuje porovnání inharmonicity a výkonů jednotlivých vyšších harmonických složek více tónů mezi sebou. Tóny c^3 , gis^3 , cis^4 a f^4 byly zahrány tvrdou paličkou v dynamice forte. Inharmonicity mezi jednotlivými tóny se od sebe odlišuje. Přesto mají všechny tóny největší inharmonicitu v prvním pásmu pro 3., 4. a 5. harmonickou složku. Jejich porovnání je k vidění na obrázku 5.51.

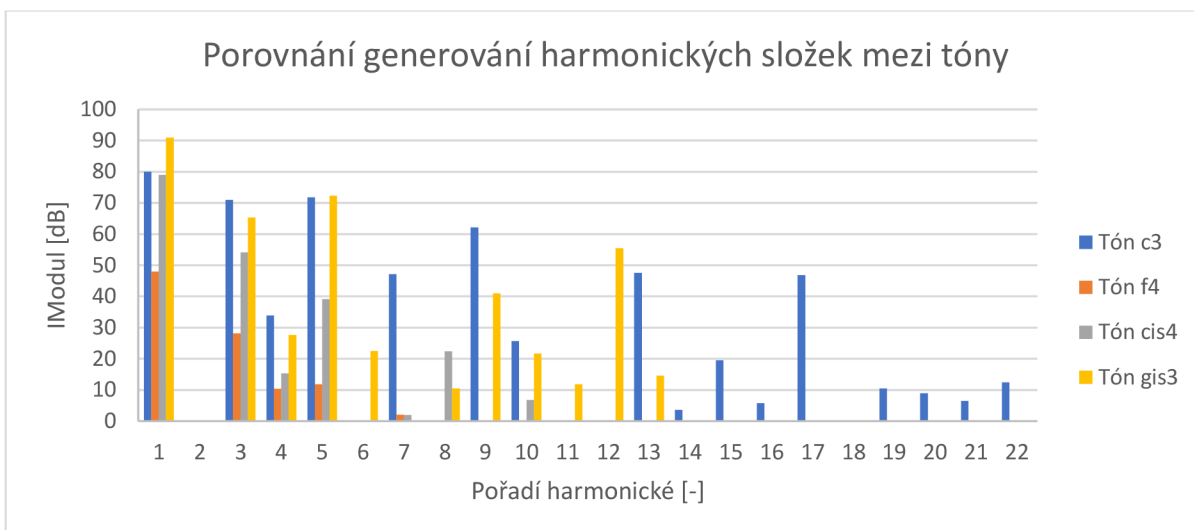


Obr. 5.51: Inharmonicity pro různé tóny u zvonkohry

Porovnání výkonů mezi tóny je zobrazeno na obrázcích 5.52 a 5.53. Různé tóny generují odlišný poměr výkonů pro své vyšší harmonické složky. Nicméně generují stejné vyšší harmonické složky, a to fundament, 3. a 5. harmonickou složku.



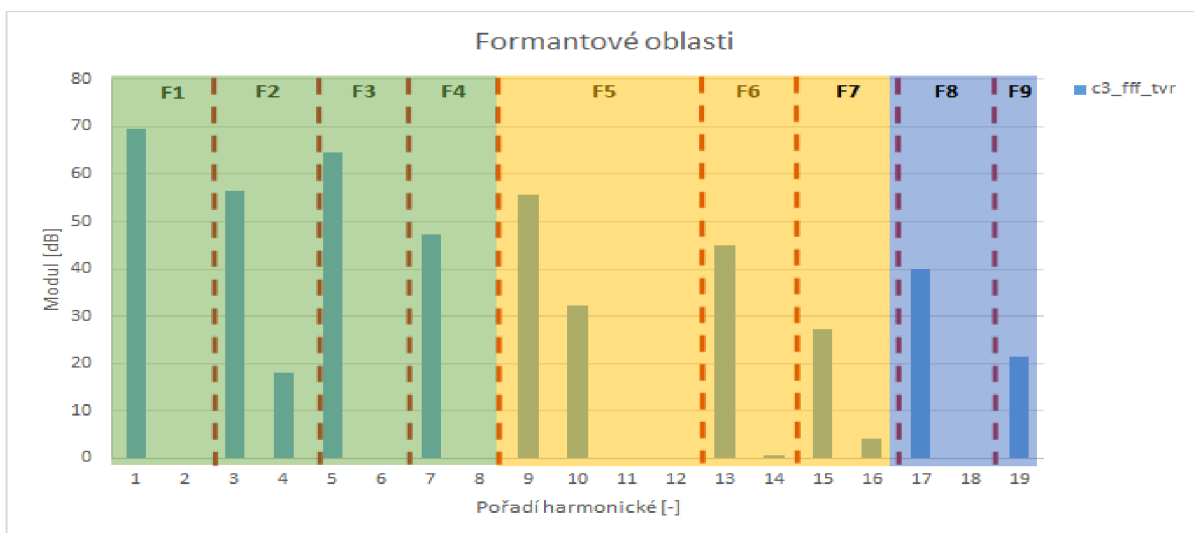
Obr. 5.52: Generování harmonických složek s referenční hodnotou u zvonkohry



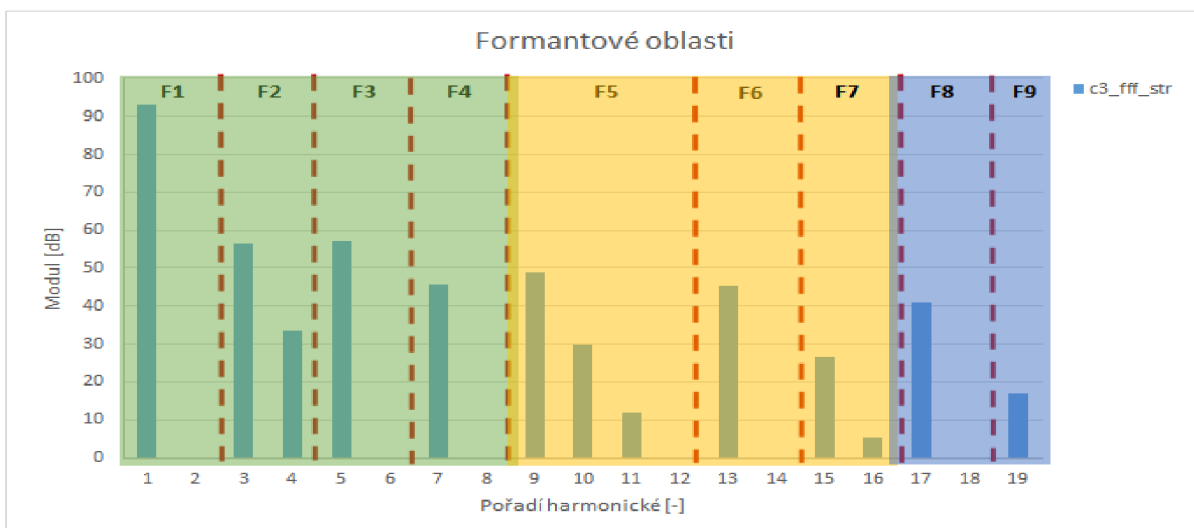
Obr. 5.53: Generování harmonických složek u zvonkohry

5.3.4 Formantové oblasti u zvonkohry

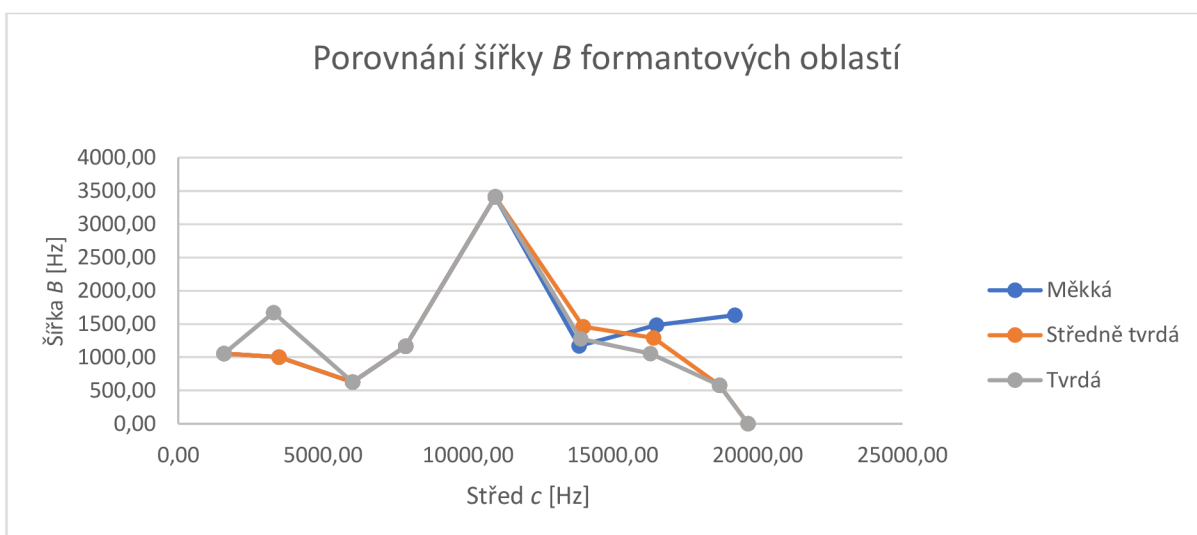
Tóny c^3 a gis^3 byly vybrány pro porovnání formantových oblastí u zvonkohry. Tón c^3 byl vybrán pro porovnání formantových v závislosti na tvrdosti paliček je vidět na obrázku (5.54) a (5.55). Tón gis^3 byl potom vybrán pro porovnání již zmíněných oblastí při různých dynamikách a je zobrazen na obrázku (5.56) a (5.57). Formantové oblasti jsou téměř identické svou šířkou, středem a svým lokálním maximem, a to při hře tvrdšími paličkami a silnější dynamikou. Tón c^3 disponuje 9 formantovými oblastmi a tón gis^3 má formantových oblastí 6.



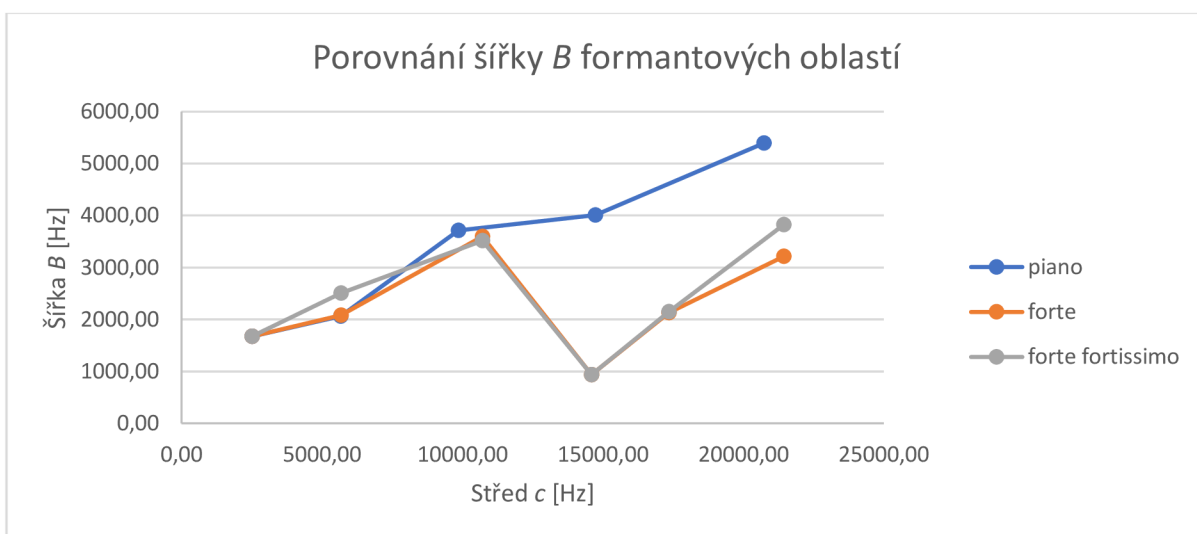
Obr. 5.54: Formantové oblasti zvo-c3-tvr-fff



Obr. 5.55: Formantové oblasti zvo-c3-str-fff



Obr. 5.56: Porovnání šířky formantových oblastí pro různé paličky



Obr. 5.57: Porovnání šířky formantových oblastí pro různé dynamiky

5.4 Porovnání nástrojů mezi sebou

V této kapitole jsou výše analyzované nástroje, kterými byly xylofon, vibrafon a zvonkohra, porovnány mezi sebou. Je třeba zmínit, že se jedná o odlišné nástroje z různých skupin idiofonů. Zatímco vibrafon spolu se zvonkohrou spadají do skupiny metalofonů, a xylofon patří do skupiny, jež nese stejný název jako samotný idiofon. Nástroje se neliší pouze tímto rozřazením, ale také svým rozsahem, délkou rezonátoru, paličkami užívanými ke hře na něj, dobou dozvuku, materiálem kamenů (destiček, bloků), rozměry, počtem formantových oblastí, inharmonicitou celého spektra a generováním vyšších harmonických složek. Naopak se shodují v tom, že největší inharmonicita se u všech nástrojů nachází vždy v prvním pásmu harmonické řady a ta nejmenší naopak ve třetím pásmu této řady.

Přestože jsou kameny xylofonu a vibrafonu vyrobeny z jiných materiálů, generují oba nástroje dvě stejné vyšší harmonické složky, a to 4. a 9. složku. U různých tónů se občas jedná o 10. harmonickou složku, nicméně ve zbytku spektra se liší poměry zbylých vyšších harmonických složek. Poměr odstupu zbylých vyšších harmonických složek od vyšších harmonických složek, které tvoří tón a barvu tónu, je u xylofonu menší a pohybuje se okolo +/- 40 dB, kdežto u vibrafonu je větší a pohybuje se okolo +/- 50 dB. Xylofon a vibrafon se liší především materiálem a dobou dozvuku, která se u xylofonu pohybuje okolo 2 sekund a u vibrafonu kolem 12 sekund. Zvonkohra se liší od obou nástrojů v největším měřítku. Její základní vyšší harmonické složky jsou liché – jedná se o 3., 5., 7., 9., 13. a 17. složku. Vyšší harmonické složky po 13. složce vytvářejí tóny septakordu; je však nutno podotknout, že tóny jsou od sebe vzdáleny o oktávu/y a 13. harmonická složka až o 3 oktávy. Dobu dozvuku má zvonkohra ze všech měřených nástrojů největší – u nižších tónů se pohybuje okolo 20 sekund a s rostoucí výškou tónu klesá.

Při porovnání jednotlivých nástrojů byl objeven vzorec základních vyšších harmonických složek, které se podílejí na barvě tónu (zvuku) každého z nástrojů. Díky němu je také možné tyto nástroje mezi sebou rozlišit při pozorování jejich spektra. Tyto vzorce jsou zobrazeny v tabulkách 5.8–10. Nutno podotknout, že u těch to vzorců není připočítána inharmonicita a od 2. pásma se můžou vzorce základních vyšších harmonických složek lišit.

Tab. 5.8: Vzorec vyšších harmonických složek u xylofonu


Nástroj:	Vzorec, jakým jsou tvořeny tóny nástroje			
Xylofon	Frekvence [Hz]	Poř. Harm.	Tón vyšší harm.	Interval od fundamentu
Tón vzorku: c ¹	1051,26	1.	c ¹	-
	5256,30	4.	c ³	2 oktávy
	9461,34	9.	d ⁴	3 oktávy + velká sekunda
	10512,60	10.	e ⁴	3 oktávy + velká tercie



Ilustrační obrázek notového zápisu vyšších harmonických složek

Tab. 5.9: Vzorec vyšších harmonických složek u vibrafonu


Nástroj:	Vzorec, jakým jsou tvořeny tóny nástroje			
Vibrafon	Frekvence [Hz]	Poř. Harm.	Tón vyšší harm.	Interval od fundamentu
Tón vzorku: c ²	526,82	1.	c ²	-
	2107,28	4.	c ⁴	2 oktávy
	4741,38	9.	d ⁵	3 oktávy + velká sekunda
	5268,20	10.	e ⁵	3 oktávy + velká tercie
	6848,66	13.	gis ⁵	3 oktávy + malá sexta
	7902,30	15.	h ⁵	3 oktávy + velká septima



Ilustrační obrázek notového zápisu vyšších harmonických složek

Tab. 5.10: Vzorec vyšších harmonických složek u zvonkohry

Nástroj:	Vzorec, jakým jsou tvořeny tóny nástroje			
Zvonkohra	Frekvence [Hz]	Poř. Harm.	Tón vyšší harm.	Interval od fundamentu
Tón vzorku: c ³	1051,26	1.	c ³	-
	3153,78	3.	g ⁴	oktáva + čistá kvinta
	5256,30	5.	e ⁵	2 oktávy + velká tercie
	7358,82	7.	ais ⁵	2 oktávy + malá septima
	9461,34	9.	d ⁶	3 oktávy + velká sekunda
	13666,38	13.	gis ⁶	3 oktávy + malá sexta



Ilustrační obrázek notového zápisu vyšších harmonických složek

6 Vyhodnocení měření směrové charakteristiky

Pomocí prostředí programu Matlab jsou v této kapitole vyobrazeny směrové charakteristiky vybraných tónů, jež byly zahrány různou tvrdostí paličky, a dynamiky pro xylofon, vibrafon a zvonkohru pomocí polárních grafů. Hodnoty intenzity jednotlivých mikrofonů byly vypočítány z efektivní hodnoty signálu, přičemž referenční hodnotou je aritmetický průměr efektivních hodnot signálů. V Polárním diagramu potom určuje 1 jednotka útlum nebo zesílení o 10 dB.

Vliv tvrdosti paličky a dynamiky na směrovou charakteristiku bude porovnán prostřednictvím vždy dvou grafů při stejné a rozdílné referenční hodnotě. Následně budou srovnány směrové charakteristiky mezi jednotlivými nástroji.

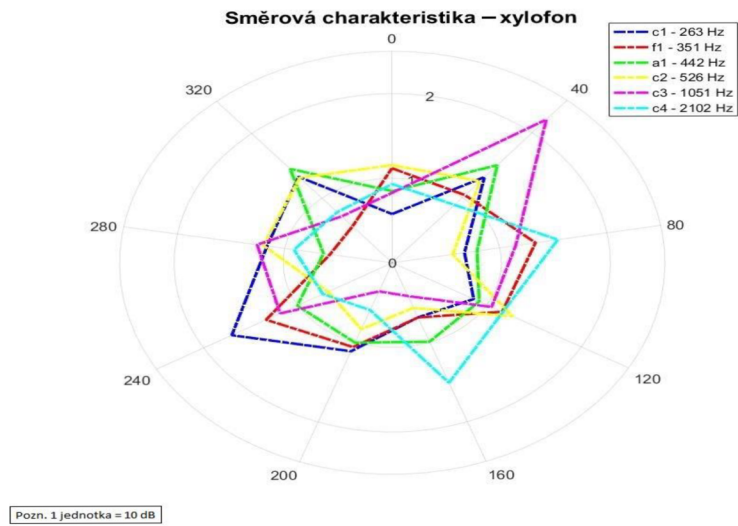
Obrázky jsou označeny zkratkami podle toho, o jaký nástroj se jednalo (vibrafon – vib, xylofon – xyl, zvonkohra – zvo), jaký tón byl měřen (např. f^2), přičemž pokud bylo měřeno více tónů, nebude tato zkratka uvedena, dále jakou paličkou byl daný tón zahrán (např. tvrdou – tvr) a v jaké dynamice (např. forte fortissimo – fff), přičemž pokud se nachází v grafu více dynamik a tvrdostí paliček, nebudou zkratky uvedeny. Ve výsledku má označení například následující podobu: vib- f^2 -tvr-fff.

6.1 Směrová charakteristika xylofonu

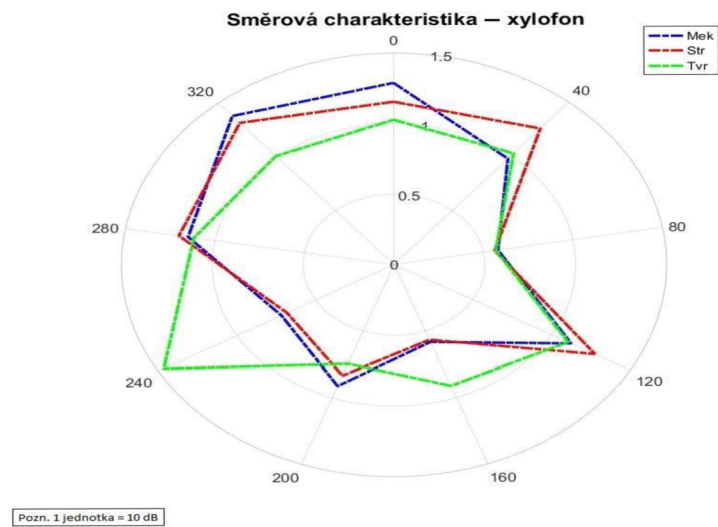
Pro vyobrazení směrové charakteristiky xylofonu bylo změřeno šest tónů (c^1 , f^1 , a^1 , c^2 , c^3 a c^4), což přibližně odpovídá rozsahu xylofonu, jímž je c^1 – c^5 . Při pozorování polárního grafu na obrázku 6.1, který zobrazuje tóny zahrané středně tvrdou paličkou v dynamice forte, je patrné, že na směrovou charakteristiku má vliv poloha tónu. Je třeba zmínit, že se jedná o velký nástroj s přibližnou délkou 1,5 m. Pokud se daný tón nachází v pravé části nástroje, bude vyzařovat především do této strany a stejně tak tón zahráný do levé části nástroje například c^4 bude vyzařovat do levé strany. Výška tónu nemá vliv na směrovou charakteristiku nástroje. Každý tón má své směrové maximum položené v odlišných úhlech. Tato skutečnost může být způsobená místem společné rezonance tónu a nástroje (deska, rezonanční trubice atd.) nebo tím, že xylofon nevyzařuje do všech stran (úhlů) se stejnou intenzitou.

Vliv tvrdosti paliček u xylofonu je zobrazen na obrázcích 6.2 a 6.3. Pro srovnání byl vybrán tón c^2 , který byl zahrán v dynamice forte. Při hře měkkou a středně tvrdou paličkou byla směrová charakteristika přibližně shodná, čímž je myšleno, že měla přibližně stejný tvar, jenž se však lišil v intenzitě vyzařování. Úder tvrdou paličkou má odlišnou charakteristiku a vyzařuje v největší intenzitě za nástroj k úhlu 240° . Zároveň je jeho intenzita menší než při zahrání tónu středně tvrdou paličkou. Samozřejmě je nutné podotknout, že hráč mohl udeřit nástroj v lehce jiné intenzitě, případně do jiného místa destičky.

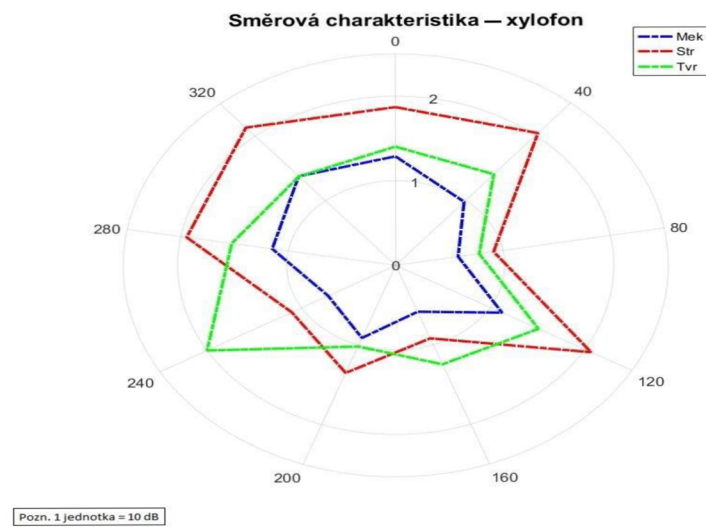
Vliv dynamiky na směrovou charakteristiku u xylofonu je k vidění na obrázcích 6.4 a 6.5. Pro porovnání byl vybrán tón c^3 , který byl zahrán středně tvrdou paličkou. Vliv dynamiky na obraz vyzařování je minimální. Je patrné, že směrová charakteristika je shodná a odlišuje se pouze v intenzitě, což je z důvodu používání různých dynamik dalo očekávat.



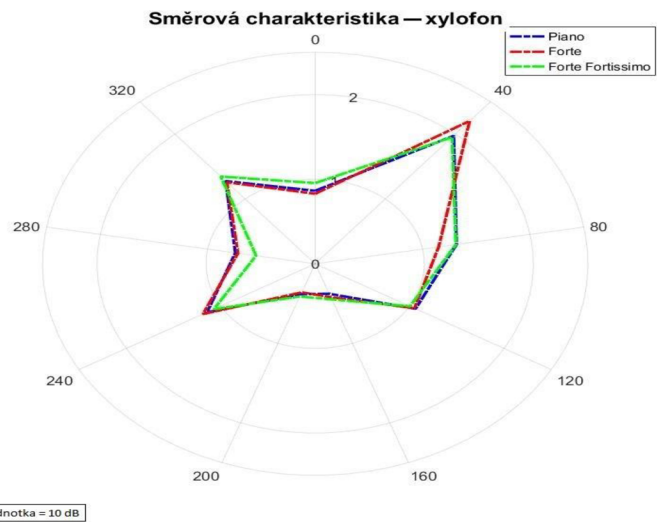
Obr. 6.1: Směrová charakteristika xylofonu



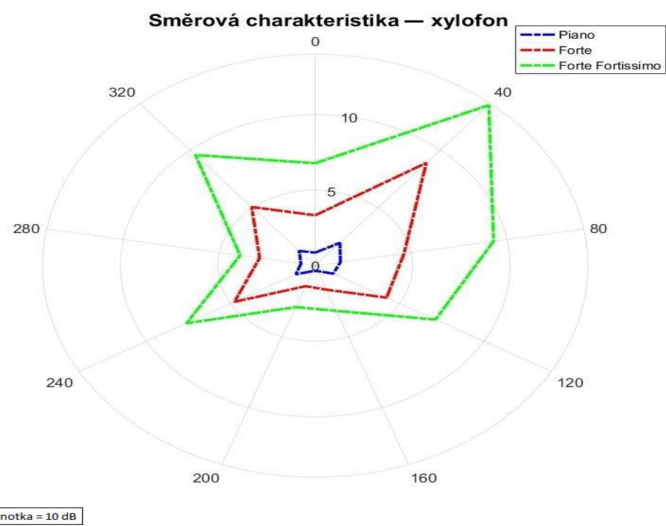
Obr. 6.2: Vliv tvrdosti paličky na směr. char. xylofonu



Obr. 6.3: Vliv tvrdosti paličky na směr. char. xylofonu při zohlednění



Obr. 6.4: Vliv dynamiky na směr. char. xylofonu



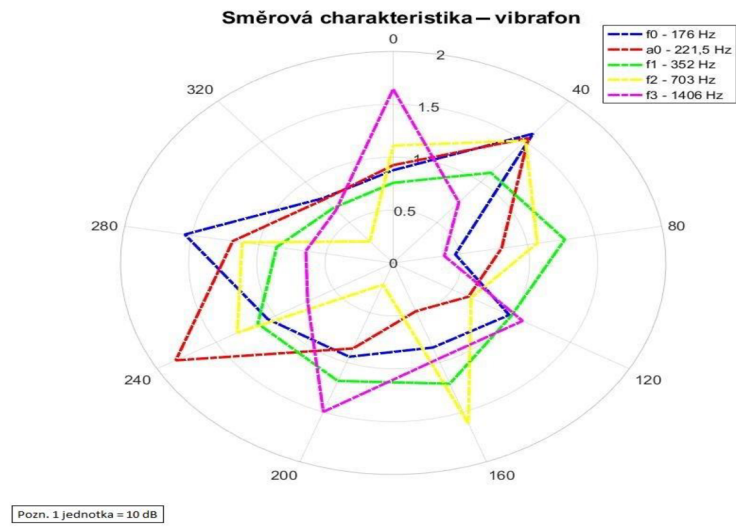
Obr. 6.5: Vliv dynamiky na směr. char. xylofonu při zohlednění

6.2 Směrová charakteristika vibrafonu

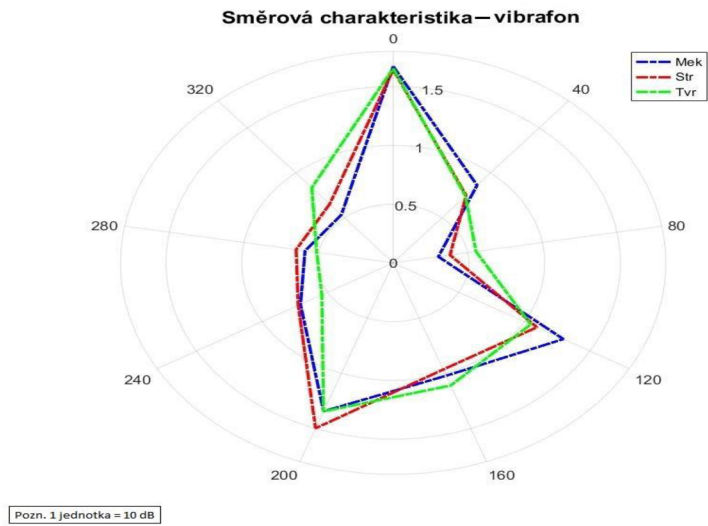
Pro vyobrazení směrové charakteristiky vibrafonu bylo změřeno vždy pět tónů (f , a , f^1 , f^2 a f^3) a jedná se o celý rozsah vibrafonu od f po f^3 . Z polárního grafu na obrázku 6.6, na němž je zobrazen tón zahrán středně tvrdou paličkou v dynamice forte, je patrné, že místo, na kterém se nachází na nástroji měřený tón, nemá pozorovatelný vliv. Na směrovou charakteristiku vibrafonu bude mít vliv spolu rezonance desky a rezonanční trubice s kamenem, na který bylo udeřeno. U všech měřených tónů lze pozorovat různé vyzařovací obrazy, které se sobě nepochybují. Nelze s jistotou určit, zda má výška tónu vliv na směrovou charakteristiku, avšak nejvyšší hraný tón f^3 je vysoce směrový, zatímco ostatní tóny spíše vyzařují do všech směrů s určitými propady intenzity.

Vliv tvrdosti paliček na směrovou charakteristiku u vibrafonu je možné pozorovat na obrázcích 6.7 a 6.8, kde byl použit tón f^3 hraný v dynamice forte. Tvrdost paličky má u vibrafonu vliv na intenzitu vyzařování vygenerovaného obrazce, který je intenzitně nejmenší při úderu měkkou paličkou a roste s tvrdostí paličky. Je nutné zmínit, že hráč mohl každou paličkou zahrát tón jinak silně. Tvrdost paličky mění obraz směrové charakteristiky velmi málo a dá se považovat za shodný.

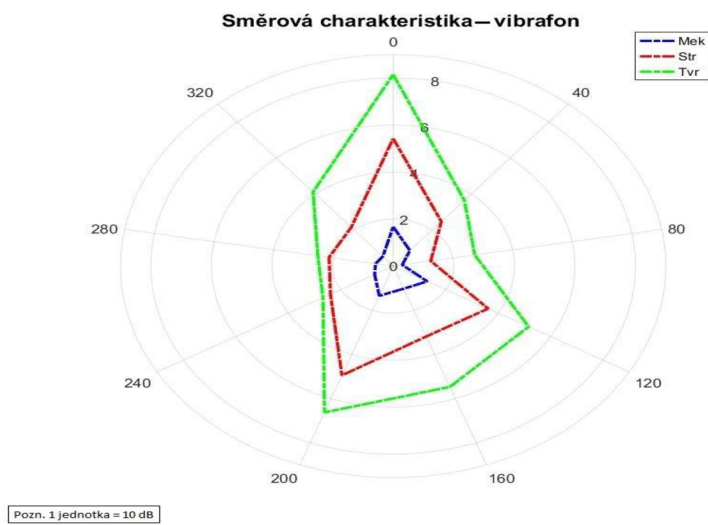
Vliv dynamiky na směrovou charakteristiku u vibrafonu popisují obrázky 6.9 a 6.10. Zde byl vybrán tón f hraný středně tvrdou paličkou. Vygenerovaný obrazec si je velmi podobný při hře odlišnými dynamikami a liší se minimálně. S rostoucí dynamikou roste pole vyzařování nástroje.



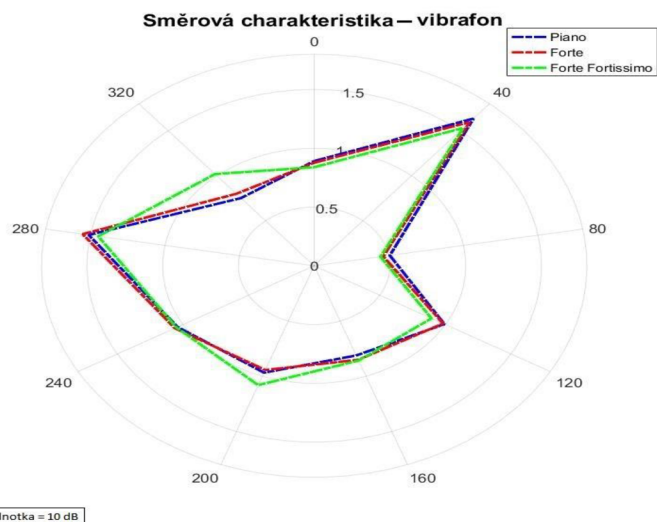
Obr. 6.6: Směrová charakteristika vibrafonu



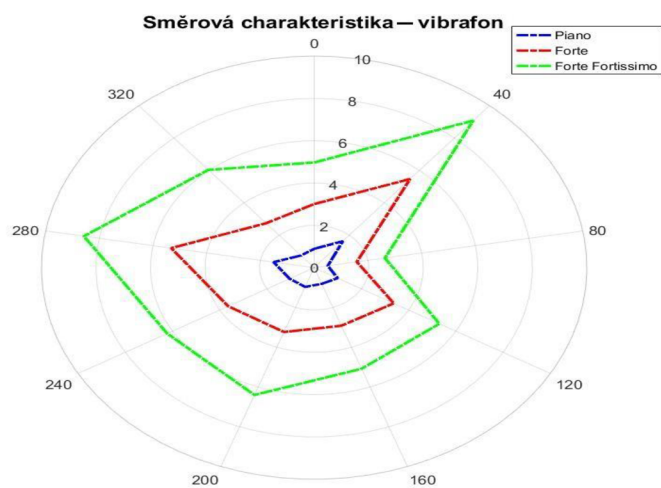
Obr. 6.7: Vliv tvrdosti paličky na směr. char. vibrafonu



Obr. 6.8: Vliv tvrdosti paličky na směr. char. vibrafonu při zohlednění



Obr. 6.9: Vliv dynamiky na směr. char. vibrafonu



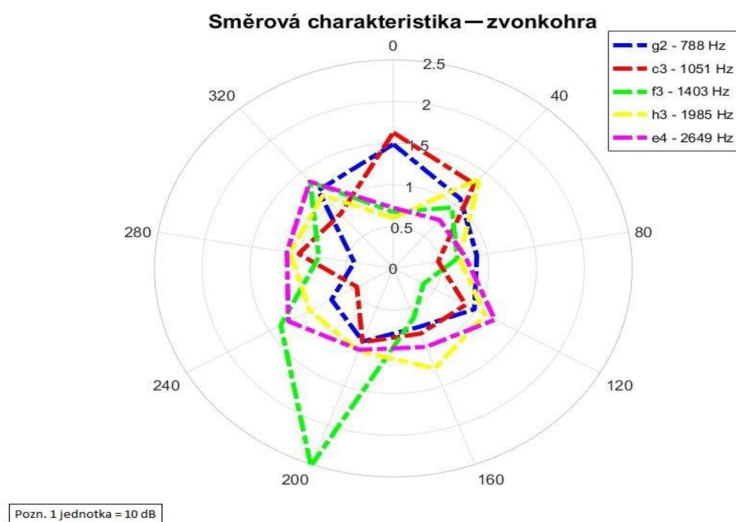
Obr. 6.10: Vliv dynamiky na směr. char. vibrafonu při zohlednění

6.3 Směrová charakteristika zvonkohry

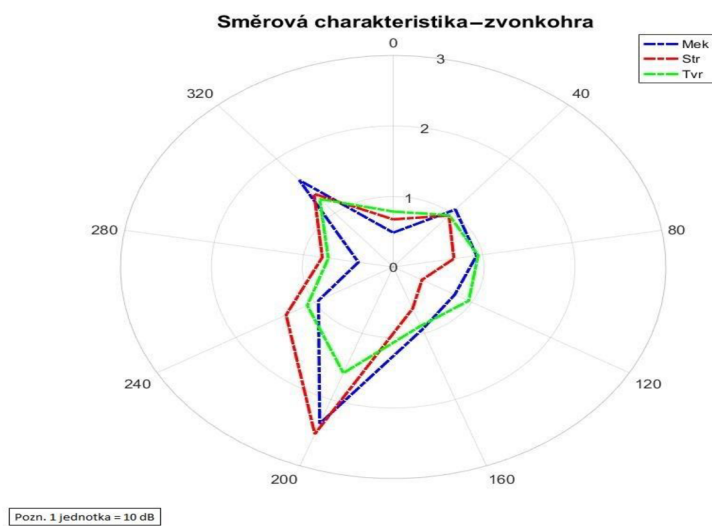
Pro vyobrazení směrové charakteristiky u zvonkohry bylo změřeno vždy pět tónů (g^2 , c^3 , f^3 , h^3 a e^4) ve třech dynamikách (piano, forte a forte fortissimo) za pomoci různě tvrdých paliček (měkkých, středně tvrdých a tvrdých). Byl změřen téměř celý rozsah zvonkohry, jímž je g^2 – c^5 . Na obrázku 6.11 je zobrazen polární graf zmíněných tónů, který byl zahrán stejně jako u směrových charakteristik xylofonu a vibrafonu středně tvrdou paličkou v dynamice forte. Z tohoto grafu je zřetelné, že místo, na kterém se na nástroji nachází měřený tón, nemá na směr vyzařování vliv. Tento směr se nijak viditelně nemění ani s výškou tónu. Nicméně od tónu $f^3 = 1403$ Hz přestává nástroj tóny vyzařovat před něj, nýbrž směrem za něj, a to v poměru přibližně 2:1. Každý z měřených tónů má vlastní obraz vyzařování.

Vliv tvrdosti paliček na vyzařování u zvonkohry je zobrazen na obrázcích 6.12 a 6.13. Pro porovnání byl vybrán tón f^3 , jenž byl zahrán v dynamice forte. Z pohledu na obrázky je vidět, že se vygenerovaný obrazec směrové charakteristiky liší při použití paliček různých tvrdostí. Hlavní rys však zůstává stejný. Intenzitně se pásmo obrazce vyzařování při použití tvrdé a měkké paličky rozšiřuje od použití středně tvrdé paličky. Tuto odlišnost mohl opět způsobit hráč lehce odlišnou silou úderu.

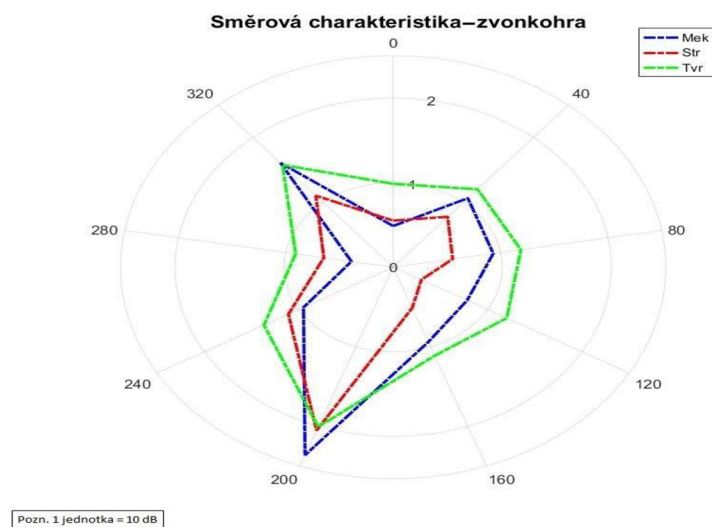
Vliv dynamiky na směrovou charakteristiku u zvonkohry je vyobrazen na obrázcích 6.14 a 6.15. Pro srovnání byl vybrán tón c^3 , který byl zahrán středně tvrdou paličkou. Dynamika mění vygenerovaný obrazec vyzařování tónu. Zatímco přední rys mají společný, liší se při zahrání v dynamice forte, jež je středem mezi dynamikou piano a forte fortissimo. Tuto odlišnost mohl zapříčinit hráč svým úderem například do jiného místa destičky. S rostoucí dynamikou narůstá i šířka vyzařování tónu.



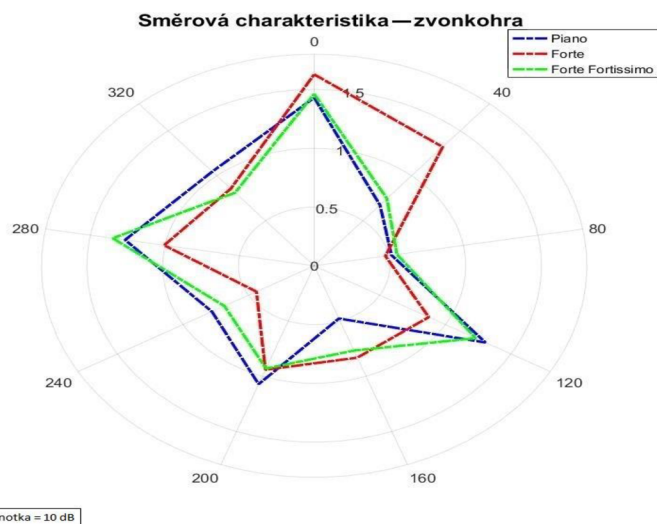
Obr. 6.11: Směrová charakteristika zvonkohry



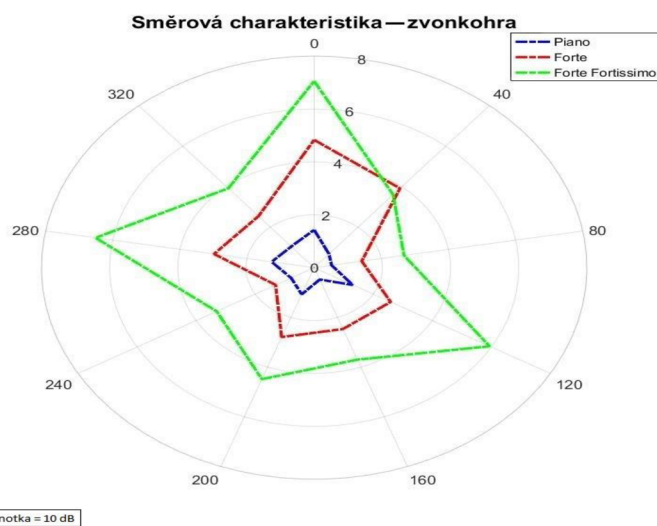
Obr. 6.12: Vliv tvrdosti paličky na směr. char. zvonkohry



Obr. 6.13: Vliv tvrdosti paličky na směr. char. zvonkohry při zohlednění



Obr. 6.14: Vliv dynamiky na směr. char. zvonkohry



Obr. 6.15: Vliv dynamiky na směr. char. zvonkohry při zohlednění

6.4 Porovnání směrové charakteristiky mezi nástroji

Při porovnání směrové charakteristiky xylofonu, vibrafonu a zvonkohry je nutné brát v potaz odlišnou konstrukční stavbu těchto nástrojů. S přihlédnutím k tomu, že vibrafon disponuje nejdelšími rezonančními trubicemi, lze očekávat odrazy od zvuku země a silnější zvuku oproti zvonkohře, která rezonanční trubice posilující sílu tónu nemá a zesílení tónu u ní obstarává pouze její rezonanční deska, na níž jsou zavěšeny destičky.

Xylofon, vibrafon a zvonkohra nejeví společné rysy směrové charakteristiky. Jedná se zkrátka o odlišné nástroje. U xylofonu se tato charakteristika odvíjí především od místa umístění tónu na nástroji. Vibrafon má směrovou charakteristiku závislou pro každý tón jinak a s rostoucí výškou tónu se jeví jako více směrový. Tato charakteristika závisí na tom, jakou paličkou se hraje – z porovnání spektrální analýzy má největší vliv právě tvrdost paličky, která generuje jinou intenzitu vyšších harmonických složek. Při hře měkkou paličkou v dynamice piano se generuje pouze fundament. Nejlepší směrovou charakteristiku má xylofon, jež by při správném stereofonním snímání vytvořila krásný a široký obraz.

7 Závěr

Zhodnocení kapitol napsaných v této bakalářské práci.

7.1 Shrnutí

Na začátku bakalářské práce byly popsány měřené nástroje tedy xylofon, vibrafon a zvonkohra. V další části se zabývá popisem paliček, které se běžně používají pro hru na dané nástroje. Pro lepší pochopení vyhodnocení měření, byla v bakalářské práci napsána 3. kapitola "Hudební signál a jeho spektrum".

V postupu měření bylo popsáno, jakými způsoby se měření spektrální analýzy a směrové charakteristiky měření provádělo a probíhalo. Byly zde uvedeny nástroje, paličky, dynamika a také, jaké tóny se v dané oblasti měřily. Zařízení, kterým se měření provádělo je popsáno v podkapitole 4.3. Dále byly též popsány požadavky kladené na hráče. Nelze s jistotou zaručit, že se hráč těchto požadavků skutečně držel – přece jenom jde o lidskou bytost, občas chybující. Proto jednou ze zásadních chyb v měření, mohla být chyba lidského faktoru. Hráč se nemusel strefovat do určeného bodu na kameni a nemusel dodržovat přesnost dynamiky při měření všech vzorků.

V posledních kapitolách bylo provedeno vyhodnocení měření. Z vyhodnocení bylo zjištěno, že tvrdost paličky má vliv na intenzitu generování vyšších harmonických složek a na jejich inharmonicitu ve spektru. V semestrální práci při porovnání vlivu tvrdosti paliček, byl u vibrafonu nalezen vzorec této inharmonicity, který vykazovaly všechny tvrdosti paliček a také v hraných dynamikách. Tento vzorec však nebyl v bakalářské práci znovu objeven. Inharmonicitu se zde lišila, nejednalo se o velké změny, ale nešly s jistotou potvrdit. V další části byly porovnány xylofon, vibrafon a zvonkohra mezi sebou. Zde byl pomocí tabulek znázorněn vzorec generování vyšších harmonických složek, který generuje každý nástroj pro všechny tóny, které byly naměřeny. Všechny tři nástroje mají inharmonicitu větší než 30 % přičemž největší inharmonicitu vykazuje vibrafon. Porovnání však bylo jen orientační vzhledem k materiálu, ze kterého jsou nástroje, přesněji pak kameny (bloky, destičky) vyrobeny. Úplně posledním vyhodnocením byla směrová charakteristika xylofonu, vibrafonu a zvonkohry. Pomocí polárních diagramů zde byla směrová charakteristika vyobrazena. Byl zde ukázán přibližně celý rozsah každého nástroje. Polární diagramy zde ukazují s jakou intenzitou a do jakých úhlů daný tón či nástroj vyzařuje, což může být vodítkem, jak dané nástroje snímat na koncertech nebo při nahrávání.

Základním cílem bakalářské práce bylo změřit a analyzovat idiofonické nástroje a to (zvonkohru, xylofon a vibrafon).

8 Doporučení

Této bakalářské práci chybí kapitoly, které by se zabývaly hlubší teorií a mohly tak lépe přiblížit fyzikální vlastnosti materiálů a doporučoval bych je dopsat. Zásadní pro kvalitu měření a vyhodnocení jsou prostory, určitě bych doporučil měřit v bez odrazové místnosti. Také změnit mikrofony a použít kvalitnější. Mikrofony hrály velkou roli při měření v nižších dynamikách, kde se projevoval vlastní šum mikrofonů, díky tomuto šumu se nedaly nižší dynamiky měřit. U směrové charakteristiky by bylo lepší využít většího počtu mikrofonů pro lepší, přehlednější a více vypovídající zobrazení. Směrovou charakteristiku také naměřit ve vícero polohách například ve výšce nástroje, 50 cm nad a 50 cm pod nástrojem, nástroje tohoto typu totiž vyzařují především nad nástroj. Vibrafon vykazoval v semestrální práci určité vzorce pravidelnosti inharmonicity, v bakalářské práci se tento vzorec nepodařilo potvrdit, bylo by vhodné zkusit tento vzorec znovu prozkoumat, k tomu by napomohlo změření více vzorků (tónů). Mezi xylofonem a vibrafonem se také nacházela určitá podobnost ve spektru, zajímavé by bylo pomocí programu, který generuje harmonické průběhy a přiblížit se k takovému spektru a pomocí poměrů intenzit vyšších harm. takový to tón reprodukovat. Reprodukovaný tón by mohl napomoci u dalšího vyhodnocování a také pro tvorbu vst-i pluginů. Pokusit se o nahlédnutí do problematiky materiálů, ze kterých se vyrábí tyto nástroje a napomoci tím k vyhodnocení, které by napomohlo k vývoji a tvorbě těchto nástrojů.

Literatura

- [1] KOTEK, Miroslav. Bicí nástroje. Neznámé. Praha 1: PANTON, 1983. ISBN Neznámé.
- [2] SMÉKAL, Z. Analýza signálů a soustav-BASS. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [3] HOLČÍK, Jiří. Signály, časové řady a lineární systémy. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2012. ISBN isbn978-80-7204-792-5.
- [4] SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN isbn978-80-7331-297-8.
- [5] SOMMER, Tomáš. Analýza srovnání spekter flétnových varhanních píšťal. Brno, 2018, 66 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.
- [6] GEIST, Bohumil. Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi. Praha: Muzikus, c2005. ISBN isbn80-86253-31-7.
- [7] Zvukové vlny a kmity: Přednáška č.1 [online]. neznámé: neznámé [cit. 2019-05-18]. Dostupné z:
http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/page95/files/I_zvukove_vlny.pdf
- [8] PELOUŠEK, Tomáš. Analýza a srovnání spekter u různých modelů klavírů. neznámé: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018.
- [9] AUDIX MICROPHONES. AUDIXUSA [online]. Spojené Státy Americké: neznámé, neznámý [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: https://audixusa.com/docs_12/units/TM1_-_TM1_PLUS_.shtml
- [10] RME AUDIO: RME [online]. neznámé: neznámé, neznámý [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: http://www.rme-audio.de/en/products/fireface_800.php
- [11] Mathworks. Mathworks [online]. neznámé: neznámé, neznámý [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com>
- [12] HANZÁLEK, Pavel. Analýza spektra houslí. neznámé, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.
- [13] ZENKL, Luděk. ABC hudební nauky. 8. vyd., v Editio Bärenreiter Praha vyd. 2. Praha: Editio Bärenreiter Praha, 2003. ISBN 80-86385-21-3.
- [14] ČERMÁK, Josef. Nové universum A-Ž: všeobecná encyklopedie. V Praze: Knižní klub, 2003. Universum (Knižní klub). ISBN 80-2421069-x.
- [15] BART HOPKLIN: OVERTONES HARMONIC AND INHARMONIC [online]. neznámé: neznámé, neznámý [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://barthopkin.com/overtones-harmonic-and-inharmonic/>

Seznam příloh

A Obsah CD

A Obsah CD

CD obsahuje:

- Složku Matlab ve složce ./Matlab
 - Programy vytvořené v prostředí Matlab ve složce ./Programy
 - Nastříhané vzorky pro jednotlivé zobrazení ve složce ./Vzorky

- Tabulky, grafy a obrázky ve složce ./Tabulky, grafy a obrázky
 - Tabulky, grafy a obrázky pro xylofon ve složce ./Xylofon
 - Tabulky, grafy a obrázky pro vibrafon ve složce ./Vibrafon
 - Tabulky, grafy a obrázky pro zvonkohru ve složce ./Zvonkohra