

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2020

Dominik Cvetler



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 JEDNOTLIVÝCH BUBNŮ Z BICÍ SOUPRAVY RŮZNĚ
NALADĚNÝCH A HRANÝCH RŮZNĚ TVRDÝMI PALIČKAMI**

THE SPECTRUM ANALYSIS OF DIFFERENT SINGLE DRUMS FROM A DRUM SET
DIFFERENTLY TUNED AND PLAYED BY DIFFERENT DRUMSTICKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Dominik Cvetler

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

Bakalářská práce

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

Student: Dominik Cvetler

ID: 195798

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Analýza spektra jednotlivých bubnů z bicí soupravy různě naladěných a hraných různě tvrdými paličkami

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte spektrální analýzu bubnů z bicí soupravy. U každého z bubnů změřte nezátíženou blánu, tj. bez spodní rezonanční, jinak naladěnou. Dále sladte horní a spodní (rezonanční) blánu do různě harmonických poměrů. V obou případech bude bubeník nebo robot hrát paličkami odlišné tvrdosti na vytipovaná místa blány. Změřte i Chladniho obrazce, tj. módy na bláně. Dejte je dle vlnové délky do souvislosti se spektry a popište, za jakých okolností jsou intenzivní dortové/radiální/tónové módy a v jakých harmonických poměrech a za jakých okolností jsou intenzivní kruhové/hlukové módy. V souladu s psychoakustickými veličinami určete, za jakých okolností můžeme získat jaké témby.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

[2] Koenig, D.V.: Spectral analysis of musical sounds with emphasis on the piano. Oxford: Oxford University Press, 2015. ISBN 978-0-19-872290-8

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

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

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá analýzou spektra membranofonů, přesněji bubnů z bicí soupravy. Analýzou spektra jsou hodnoceny aspekty, které mají vliv na spektrum nástroje, především na jeho inharmonicitu a generování hlukových či tónových módů. Zkoumanými aspekty jsou vliv tvrdosti paliček, místa úderu na blánu bubnu, ladění rezonanční blány a přítomnost struníku. Práce zkoumá inharmonicitu ve spektru a harmonické poměry mezi jednotlivými složkami v pásmech harmonické řady. Práce dále popisuje jednotlivé bubny bicí soupravy z hlediska organologie, paličky a blány používající se pro bubny, teoretický základ tvorby zvuku membranofonů a způsob, jakým byly nahrány a zpracovány naměřené vzorky.

Klíčová slova

Spektrální analýza, buben, blána, palička, bicí souprava, inharmonicity, spektrum

Abstract

The bachelor thesis deals with the analysis of the spectrum of membranophones, more precisely drums from the drum kit. Spectrum analysis evaluates aspects that affect the instrument's spectrum, especially its inharmonicity and the generation of noise or tone modes. The aspects examined are the impact of the drumsticks hardness, the impact hit point on the drum membrane, the tuning of the resonance membrane and the presence of the tailpiece. The thesis examines inharmonicity in the spectrum with harmonic ratios between individual components in bands of harmonic series. The thesis also describes individual drums in terms of organology, drumsticks and membranes used for drums, the theoretical basis of creating membranophones sound and the way in which the measured samples were recorded and processed.

Keywords

Spectral analysis, drum, membrane, drumstick, drum kit, inharmonicity, spectrum

Bibliografická citace:

CVETLER, Dominik. *Analýza spektra jednotlivých bubnů z bicí soupravy různě naladěných a hraných různě tvrdými paličkami*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125882>. 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 jednotlivých bubnů z bicí soupravy různě naladěných a hraných různě tvrdými paličkami jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.“

V Brně dne: **8. června 2020**

.....
podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph. D. za vedení a cenné rady k řešení tématice. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph. D. za vypůjčení techniky potřebné k měření a také panu RNDr. Luboru Příkrylovi za poskytnutí bicí soupravy. V poslední řadě bych chtěl poděkovat rodinným příslušníkům za podporu.

V Brně dne: **8. června 2020**

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	13
1. Membranofony.....	14
1.1 Bicí souprava	14
1.1.1 Velký buben.....	15
1.1.2 Malý buben	15
1.1.3 Tympány.....	16
1.1.4 Tom-tom	16
1.2 Paličky pro membranofony.....	17
1.2.1 Anatomie paliček	17
1.2.1.1 Špička paličky.....	17
1.2.1.2 Krček, náběh a kužel zúžení	18
1.2.1.3 Tělo, rukojeť a zakončení.....	18
1.2.2 Materiál.....	18
1.3 Blány membranofonů	19
2. Zvukový signál.....	20
2.1 Tvorba zvuku membranofonů.....	21
2.2 Rezonance, rezonanční křivka	22
2.3 Časový průběh	23
2.4 Spektrální analýza	25
2.4.1 Spektrum signálu.....	25
2.4.2 FFT.....	26
2.4.3 Spektrogram.....	26
3. Popis měření	29
3.1 Postup měření.....	29
3.2 Zařízení použitá k měření	30
3.3 Požadavky na hráče	31
3.4 Značení nahraných vzorků.....	32
3.5 Chladního obrazce.....	33
4. Vyhodnocení měření	34
4.1 Spektrální analýza velkého bubnu	35

4.2	Spektrální analýza malého bubnu	38
4.3	Spektrální analýza 12" tom-tomu.....	42
4.4	Spektrální analýza floor tomu.....	46
4.4.1	Chladního obrazce.....	50
4.5	Vliv tvrdosti paliček na spektrum	54
4.6	Vliv místa úderu na spektrum.....	55
4.7	Vliv ladění rezonanční blány na spektrum	56
5.	závěr	58
5.1	Doporučení	59

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

např.	.....	například
nad	.....	nadladěná
pod	.....	podladěná
bez	.....	bez rezonanční blány
FFT	.....	Fast Fourier Transform
DFT	.....	diskrétní Fourierova transformace
IFFT	.....	inverzní Fourierova transformace
STFT	.....	krátkodobá Fourierova transformace

Symboly:

f	...	frekvence	[Hz]
ω	...	úhlový kmitočet	[s ⁻¹ / rad·s ⁻¹]
π	...	Ludolfovo číslo, konstanta pí	
φ	...	fáze signálu	
ξ	...	výchylka membrány	
ρ	...	hustota	[kg·m ⁻³]

Seznam obrázků

Obr. 1-1: Bicí souprava (1 velký buben, 2 malý buben, 3 tom-tomy, 4 floor tom, 5 hi-hat, 6 činel ride, 7 činel crash) [2].....	14
Obr. 1-2: Anatomie paličky	17
Obr. 2-1: Rezonanční módy kruhové membrány [8].....	21
Obr. 2-2: Řez rezonančními módy membrány [8].....	22
Obr. 2-3 Rezonanční křivka.....	23
Obr. 2-4: ADSR obálka	24
Obr. 2-5: časový průběh tom tomu.....	24
Obr. 2-6: základní dělení spektra [8]	25
Obr. 2-7: FFT spektrum velkého bubnu	26
Obr. 2-8: Spektrogram tom tomu	27
Obr. 3-1 nahrávání malého bubnu.....	30
Obr. 3-2: Poloha mikrofonu vzhledem k úderové bláně.....	32
Obr. 3-3 Chladniho obrazce - 373 Hz.....	33
Obr. 3-4 Chladniho obrazce - 628 Hz.....	33
Obr. 4-1: FFT spektrum velkého bubnu (bez).....	35
Obr. 4-2: FFT spektrum velkého bubnu (stejnáF).....	35
Obr. 4-3: Spektrogram velkého bubnu (a).....	35
Obr. 4-4: Spektrogram velkého bubnu (b).....	35
Obr. 4-5: Graf inharmonicity periodických složek velkého bubnu.....	38
Obr. 4-6: FFT spektrum malého bubnu (bez).....	38
Obr. 4-7: FFT spektrum malého bubnu (stejnáF+struník).....	38
Obr. 4-8: Spektrogram malého bubnu (bez-a).....	39
Obr. 4-9: Spektrogram malého bubnu (bez-b)	39

Obr. 4-10: Spektrogram malého bubnu.....	39
Obr. 4-11: Spektrogram malého bubnu	39
Obr. 4-12: Graf hlasitosti [son] malého bubnu v závislosti na čase	39
Obr. 4-13: Graf inharmonicity periodických složek malého bubnu.....	42
Obr. 4-14: FFT spektrum tom-tomu (bez).....	43
Obr. 4-15: FFT spektrum tom-tomu (nad).....	43
Obr. 4-16: Spektrogram tom-tomu (bez-a).....	43
Obr. 4-17: Spektrogram tom-tomu (bez-b).....	43
Obr. 4-18: Graf hlasitosti [Son] tom-tomu v závislosti na čase	43
Obr. 4-19: Graf inharmonicity periodických složek tom-tomu	44
Obr. 4-20: FFT spektrum floor tomu (bez).....	46
Obr. 4-21: FFT spektrum floor tomu (stejnáF)	46
Obr. 4-22: Spektrogram floor tomu (bez-a).....	47
Obr. 4-23: Spektrogram floor tomu (bez-b).....	47
Obr. 4-24 Graf inharmonicity periodických složek floor tomu	48
Obr. 4-25: pod – 83,3 Hz.....	50
Obr. 4-26: pod – 170 Hz	50
Obr. 4-27: pod – 229 Hz.....	50
Obr. 4-28: pod – 236 Hz	50
Obr. 4-29: pod – 261 Hz.....	50
Obr. 4-30: pod – 294 H.....	50
Obr. 4-31: pod – 343 Hz.....	51
Obr. 4-32: pod – 426 Hz	51
Obr. 4-33: pod – 569 Hz.....	51
Obr. 4-34: pod – 603 Hz	51
Obr. 4-35: pod – 655 Hz.....	51
Obr. 4-36: bez – 651 Hz.....	51
Obr. 4-37: Graf inharmonicit v závislosti na tvrdosti paličky (malý buben).....	54
Obr. 4-38: Graf modulů periodických složek v závislosti na tvrdosti paličky (malý buben).....	54
Obr. 4-39: Spektrogram Tom-tom (střed).....	55
Obr. 4-40: Spektrogram Tom-tom (kraj)	55

Obr. 4-41: Spektrogram Floortomu (střed).....	55
Obr. 4-42: Spektrogram Floortomu (kraj)	55
Obr. 4-43: Graf inharmonicit periodických složek (tom-tom).....	56
Obr. 4-44: Graf inharmonicit periodických složek (floortom).....	57

Seznam tabulek

Tab. 2.1. Základní dělení signálu	20
Tab. 4.1. Barevné rozdělení pásem.....	34
Tab. 4.2: Naměřené hodnoty alikvótních složek velkého bubnu (bez)	36
Tab. 4.3: Naměřené hodnoty alikvótních složek velkého bubnu (stejnáF).....	36
Tab. 4.4: Naměřené hodnoty alikvótních složek malého bubnu (bez)	40
Tab. 4.5: Naměřené hodnoty alikvótních složek velkého bubnu (stejnáF+struník).40	
Tab. 4.6: Naměřené hodnoty alikvótních složek tom-tomu (bez).....	44
Tab. 4.7: Naměřené hodnoty alikvótních složek tom-tomu (stejnáF)	45
Tab. 4.8: Naměřené hodnoty alikvótních složek floor tomu (bez).....	47
Tab. 4.9: Naměřené hodnoty alikvótních složek floor tomu (stejnáF).....	48
Tab. 4.10: Naměřené hodnoty chladního obrazců.....	52
Tab. 4.11: Porovnání chladního obrazců a alikvótních složek.....	53

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zaměřuje na spektrální analýzu jednotlivých bubnů obsažených v bicí soupravě. Spektrální analýza je zaměřená zejména na frekvenční spektrum zkoumané pomocí spektrogramů, FFT a časový průběh nahraných bubnů. Pomocí této analýzy jsou porovnávány rozdíly zvuku nástroje v závislosti na místě úderu, tvrdosti paličky a také na různém naladění rezonanční blány bubnů.

První kapitola práce se skládá ze tří základních částí. První část se zabývá popisem bubnů z hlediska organologie. Má za úkol přiblížit čtenáři stavbu nástrojů a jejich použití v hudbě. Druhá část je věnována bubenickým paličkám. V této části je popsána anatomie paliček a materiály využívající se pro jejich výrobu. Třetí část je zaměřena na blány membranofonů. Stručně popisuje historii blan, druhy blan a materiály, ze kterých se tyto membrány vyrábějí.

Druhá kapitola je věnována tvorbě zvuku membranofonů. Jsou zde popsány základní části nástroje podle Pavla Kurfürsta. Dále je v kapitole popsáno základní dělení signálů, definice signálu a výpis základních metod analýzy zvukového spektra.

Třetí kapitola se zabývá měřením samým a nahráváním hudebních vzorků určených pro analýzu. Jsou zde podrobně popsány postupy a zařízení, která byla použita při nahrávání zvukového materiálu. Tato kapitola též obsahuje požadavky, které byly kladeny na hráče pro dosažení co nejlepších výsledků měření. Poslední část třetí kapitoly je zaměřena na označení nahraných vzorků pro snadnou orientaci v další části práce.

Hlavním jádrem bakalářské práce je kapitola číslo čtyři. Zde jsou pomocí spektrogramů, FFT spekter a tabulek s naměřenými hodnotami popsána a porovnávána spektra jednotlivých bubnů. V této kapitole jsou vyhodnoceny výsledky měření, zejména jsou zde popsány vlivy tvrdosti paliček, místa úderu na membránu a vliv různého ladění rezonanční membrány. Stěžejní částí analýzy je porovnání vlivu těchto aspektů na alikvóty/vyšší periodické složky a jejich inharmonicitu.

V poslední kapitole číslo pět dochází ke shrnutí výsledků měření a zjištěných skutečností.

Tato práce může sloužit muzikantům a bubeníkům pro lepší pochopení jejich nástrojů, hudebním producentům a zvukařům pro zařazení membranofonů zejména do frekvenčního spektra skladeb. Práce může sloužit jako obohacení teoretického základu pro výuku hry na bicí nástroje.

1. MEMBRANOFONY

Membranofony neboli nástroje blanozvučné patří do skupiny bicích nástrojů, u kterých zvuk vzniká rozkmitáním blány nebo kůže napjaté na ozvučné skříní. Tyto ozvučnice mohou být vyrobeny z různých materiálů např. dřevo, kov, pálená hlína nebo umělá hmota. Blána vyrobená ze zvířecí kůže či umělé hmoty bývá napjatá na dřevěných kruhových rámech. Rozkmitání blány se provádí úderem ruky, paličky, případně třením štetce v závislosti na hudebním žánru a stylu hry.

Blanozvučné bicí nástroje dále dělíme na nástroje s jednou blánou – úderovou (tympány, ruční bubínek, koncertní tom-tomy) a nástroje se dvěma blanami – úderovou a rezonanční.

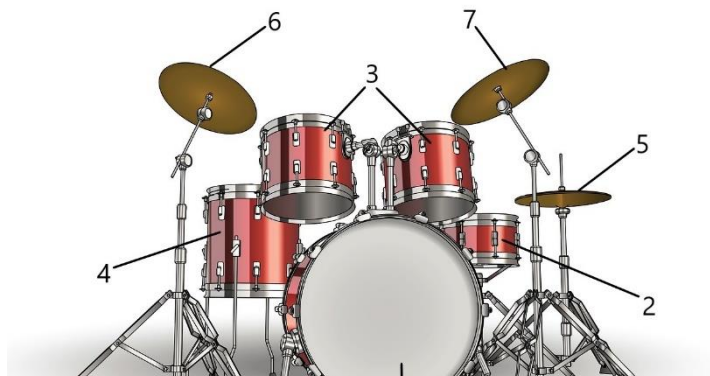
Korpusy nástrojů zhotovené z rozdílných materiálů mívají z pravidla i rozdílné rozměry. Obecně platí, že větší průměr a výška lubu produkuje hluboký a temný zvuk o nižší frekvenci, s větším rozměrem nástroje se také prodlužuje doba dozvuku [1].

1.1 Bicí souprava

Bicí souprava je souhrnný název pro sestavu bicích nástrojů složenou z jednotlivých bubnů, činelů a perkusivních nástrojů. Nelze přesně stanovit, které nástroje musí souprava obsahovat, jelikož každý hudební žánr má své specifické požadavky. Dokonce i v rámci jednoho žánru se objevuje různé složení bicích souprav.

Pro moderní hudbu druhé poloviny 20. a začátku 21. století se v bicí soupravě standartně nachází jeden velký buben (kopák), jeden vířivý buben (snare, šroťák), dva či více tom-tomů, jeden floor tom nebo tympán (kotel) a činely (hi-hat, ride, crash). Do bicí soupravy patří též stojany na činely, sedačka pro bubeníka a paličky.

Následující podkapitoly budou zaměřeny na jednotlivé bubny nacházející se v bicí soupravě. Vzhledem k zaměření této práce nebudou dále zmiňovány činely a jiné perkusivní nástroje.



Obr. 1-1: Bicí souprava (1 velký buben, 2 malý buben, 3 tom-tomy, 4 floor tom, 5 hi-hat, 6 činel ride, 7 činel crash) [2]

1.1.1 Velký buben

Velký buben býval nejrozšířenější nástroj starých národů po celém světě. Historie dokládá, že velké bubny, takzvané rámové bubny, byly užívány při obřadech ve starém Egyptě i v oblasti babylónské již ve 3. tisíciletí před naším letopočtem. Zvlhčená zvířecí (telecí) kůže se upnula na vydlabané kmeny stromů či uměle zhotovené rámy a vyschnutím se vypínala [1].

Dnešní velký buben, nazývaný těž kopák nebo basový buben mívá různé rozměry. Blána je většinou v průměru od 16–24 palců a je vyrobena převážně z plastu. Korpus bubnu má zpravidla šířku 40–70 cm a nachází se zde malý otvor, kterým uniká vzduch mezi blanami při jejich kmitání. Na korpusu je dále 8 až 16 stahovacích šroubů určených pro napínání blány.

Zvuk velkého bubnu má neurčitou výšku, ale velmi dobře se spojuje se zvukem hlubokých nástrojů (tuba, kontrabas, tympán). [1] str. 27

Základní tón neboli fundament se nachází v rozmezí od 40 do 100 Hz.

Buben pro symfonickou a dechovou hudbu má průměr okolo jednoho metru a šířku korpusu přibližně 40 cm. Při vystoupení se buben upevňuje na stojan, během pochodu se používá vozík nebo se buben pověsí na speciálním popruhu přímo na hráče. Dozvuk bubnu je cca 3–5 sekund [1].

Buben pro taneční a jazzovou hudbu disponuje menším průměrem blány (50–60 cm) a větší šířkou korpusu (50–65 cm). K rozeznění bubnu se používá speciální mechanická šlapka, kterou hráč ovládá nohou. Při hře se používají dusítka, která mohou být vestavěná přímo v bubnu pod blanami a lze je k nim pomocí páček nebo šroubů přitisknout [1].

Notový zápis pro velký buben se píše v basovém klíči. V notové osnově je to linka A nebo F, ale většinou se používá zápis na samostatné linii jako u většiny bicích nástrojů bez určité výšky tónu [1].

1.1.2 Malý buben

Malý buben neboli snare se vyvinul zmenšením vojenského bubínku pro potřeby salonních a tanečních orchestrů. Na korpus vyrobený ze dřeva či kovu se napínají blány pomocí kovové obruče, která je stahována šrouby. Tyto obruče převyšují okraj lubů. Charakteristickým znakem malého bubnu je struník, struny nebo drátěné spirálky přitisknuté na ozvučné bláně. Díky těmto spirálkám dostává buben svůj typický ostrý zvuk. U některých druhů malého bubnu se struny nacházejí i pod blanou úderovou.

Zvuk bubnu s vypnutými strunami je vysoký a má krátký dozvuk. Struny lze pomocí mechanismu ovládaného páčkou oddálit od blan. Většina malých bubnů má vestavěná dusítka ovládaná páčkami nebo šrouby, která umožňují odstínění zvuku bubínku.

Pro hru na malý buben se krom paliček používají také metličky (zejména v jazzu), které vytvářejí zvuk s vysokým obsahem šumu. Buben bývá postaven do stojanu, při hře za pochodu se zavěsí na hráče pomocí řemenu přes rameno (bandalír).

V závislosti na druhu bubínku se mění jeho rozměry. Průměr blány se pohybuje od 25 do 40 cm a výška lubů od 8 do 35 cm. Platí, že čím je vzdálenost blan menší, tím se produkuje vyšší, ostřejší a jasnější zvuk

Notový zápis bubínků se provádí v notové osnově notou c^2 (v kombinaci s velkým bubnem se píše do basového klíče notou e) [1].

1.1.3 Tympány

Tympány jsou blanzvučné nástroje původem z orientu, jako většina bicích nástrojů.

Do Evropy se dostali zhruba v 11.–13. století během křížáckých tažení. Postupně se během 15. století začaly vytvářet ve velikosti, jakou známe dnes a začaly se používat napínací šrouby a obruče.

Tympán se skládá z kotle vyrobeného z kovu (měď, mosaz) nebo laminátu ve tvaru polokoule. Odtud také plyne jeho český název kotel. Různé rozměry kotle ovlivňují hloubku zvuku nástroje a jeho dozvuk. Další částí je napínací mechanismus a blána nástroje vyrobena z kůže nebo umělé hmoty. Průměr blány se pohybuje od 55 do 85 centimetrů. Pro zamezení zpětných rázů při kmitání blány se na dně nástroje nachází malý otvor, kterým vzduch uniká.

Nejdokonalejším typem tympán jsou tympány pedálové, které vznikly na přelomu 19. a 20. století. Pedálový mechanismus, ovládaný nohou umožňuje hráči okamžitě přeladit tón. Na okraji nástroje se nachází orientační stupnice s malou ručičkou, jež značí přibližnou výšku tónu [1].

Tón vzniká úderem paličky na napjatou blánu asi 10 cm od okraje tympánu. Má jasnou a určitou barvu a přiměřený dozvuk. Dozvuk tympánů většího průměru (zvukově hlubších) je delší než u tympánů menších, zkrácení dozvuku provádí hráč rukou. Úder na střed blány je hluchý, má neurčitou výšku, kratší dozvuk a zvukově připomíná velký buben. Při hře blíže okraji blány se výrazně ozývá horní kvinta. [1] str. 23

1.1.4 Tom-tom

Tom-tomy, zkráceně též tomy, jsou bubny tvaru válce vyrobené ze dřeva se dvěma blanami. Blány vyrobené ze zvířecí kůže nebo umělé hmoty se vypínají pomocí obruče s napínacími šrouby. Tom-tomy se zhotovují v různých velikostech. Průměr blan se pohybuje od 25 do 45 centimetrů a výška korpusu bývá od 20 do 60 centimetrů

V taneční a jazzové hudbě se většinou využívá sada dvou až čtyř tomů, v symfonickém orchestru se používají jako náhrada za vířivé bubny. Menší bubny se upevňují na stojan malého bubnu, v bicí soupravě se umísťují přímo na velký buben. Na větší tom-tomy se připevňují nastavitelné nožky, které se pokládají na zem. Odtud také plyne název floor-tom.

Tomy mívají vestavěná dusítka na obě blány, která lze pomocí mechanismu oddálit nebo přitisknout k blanám. Tomuto systému se říká tone control. Technika úderů a hry je stejná jako při hře na malý buben.

Notový záznam se v partituře píše podle výšky zvuku od nejhlubšího po nejvyšší. Někdy se používají samostatné linky, které početně odpovídají množství použitých nástrojů.

Koncertní tom-tomy jsou nástroje, které mají pouze jednu blánu. Možnost téměř přesného ladění vedla k výrobě sady obsahující 5 až 13 bubnů s různým průměrem blan a výškou lubů okolo 25 až 35 centimetrů. Ke hře se používají stejné paličky jako při hře na klasické (jazzové) tomy.

Notují se o oktávu výše, než znějí a zapisují se v houslovém klíči.

Čínské tom-tomy mají vypouklý dřevěný lub ve tvaru nízkého soudku. Obě silné blány jsou přibity ozdobnými hřeby, takže jejich napětí nelze měnit. Používají se i nástroje pouze s jednou blanou. Korpusy těchto nástrojů jsou typicky lakované černou-červenou barvou s kreslenými motivy květin nebo čínských draků [1].

1.2 Paličky pro membranofony

Tato kapitola je zaměřena na paličky používané pro hru na membranofony. Paličky jsou pro bubeníka téměř stejně důležité jako buben samotný, jelikož právě palička je nástroj, kterým hráč rozechvěje blánu a vytváří tak zvuk. Materiál, tvrdost, rozměr, tvar hlavičky a styl hry jsou základní faktory, ovlivňující výsledné spektrum zvuku bubnů.

1.2.1 Anatomie paliček

Ke hře na bicí nástroje se používá nepřeberné množství paliček různých velikostí, tvrdostí a hlavně tvarů. Tvar paličky má vliv na dobrý pocit ze hry, dynamiku hry a další faktory, určující jedinečný zvuk.

Dnes známý tvar paličky je již ustálen řadu let a je tvořen špičkou, krčkem, náběhem ke špičce, tělem, místem držení a zakončením paličky. I přes snahy inovátorů a výrobních firem o nové trendy v oblasti paliček se drtivá většina bubeníků drží právě tohoto tvaru [3].



Obr. 1-2: Anatomie paličky

1.2.1.1 Špička paličky

Jednou z nejdůležitějších částí paličky je její charakteristická špička. Rozdílné tvary a velikosti špiček mají vliv na zvuk bubnu a činelu, jelikož právě špička je ta část paličky, která přichází do kontaktu s blánou a rozkmitá ji.

Hlavní rozdíl mezi jednotlivými špičkami je velikost kontaktního bodu s blánou či činelem a její tvrdost. Důležitý je také úhel, pod kterým špička paličky dopadá na buben. Nejčastěji se používají špičky těchto tvarů: koule, kapka, vejce, trojúhelník a žalud.

U špiček platí pravidlo, že menší a měkčí špička produkuje slabší zvuk, ale dává hráči lepší kontrolu nad výsledným zvukem. S rostoucím tvrdostí je zvuk jasnější a výraznější, větší rozměr excitátoru a delší čas dotyku více tlumí impuls [4].

1.2.1.2 Krček, náběh a kužel zúžení

Krček je umístěný hned za špičkou. Je to nejužší část paličky, která přes náběh a kužel zúžení postupně přechází až k samotnému tělu paličky.

Tyto části ovlivňují zejména odskok paličky, cit, ovladatelnost a celkovou reakci paličky. Dlouhý náběh dává paličce pružnost, větší ohyb při úderu, rychlejší odezvu a možnost velmi citlivě kontrolovat jemnější pasáže hry. Nehodí se ale na dynamické, razantní a silnější údery. Pro tento účel je vhodnější silnější krček a kratší náběh, který paličku vyztuží, zpevní a nabídne lepší dynamiku hry. Poloha kuželu má vliv na umístění těžiště paličky a na citlivost hry – pokud je posunuta ke špičce, dává paličce razanci při úderu na úkor horší ovladatelnosti paličky [3].

1.2.1.3 Tělo, rukojeť a zakončení

Hlavní úlohou těla je pohlcení a rozptyl nárazu při úderu. Na těle paličky se také nachází dva velmi důležité body. Jedním z těchto bodů je těžiště paličky.

Poloha těžiště ovlivňuje ovladatelnost, reakci paličky a její razanci. Palička s těžištěm blízko rukojeti se dobře ovládá, ale má menší razanci. Při posunu těžiště ke špičce paličky se zvyšuje její razance, ale je pro hráče hůře ovladatelná.

Dalším bodem je takzvaný otočný bod paličky. Kolem tohoto bodu se otáčí přední a zadní část paličky. Čím menší je vzdálenost mezi tímto bodem a těžištěm paličky, tím se zvyšuje její ovladatelnost.

V okolí těchto bodů se palička drží. Nachází se tak zde její rukojeť. Tato část má jediný úkol a tím je dobrý pocit ze hry. Často se na rukojeti nachází různé povrchové úpravy, aby se dosáhlo maximálního pohodlí při hře.

Zakončení bývá obvykle kulatého tvaru. Někteří hráči používají zakončení paličky pro velmi silný úder. [3].

1.2.2 Materiál

Materiálem využívající se pro výrobu paliček je z drtivé většiny dřevo. Objevují se varianty, kdy je celá palička vyrobená z plastu či jiných materiálů, ale všeobecně nejpoužívanějšími jsou paličky vyrobené právě ze dřeva. Často se využívá kombinace dvou materiálů, kdy je tělo paličky až po krk vyrobené ze dřeva a špička se vyrábí z umělé hmoty (nylon).

Na světě existuje zhruba 5000 druhů dřevin vhodných pro výrobu paliček. Nejoblíbenější a nejpoužívanější druh dřeva je hikor. Tento druh ideálně kombinuje pevnost, váhu a mechanické vlastnosti. Druhým nejpoužívanějším je bílý dub a také javor. V Evropě a zejména v České republice se k výrobě používá habr, který je oproti hikoru lehčí, ale má menší životnost.

Platí pravidlo, že paličky s vyšší hustotou a tvrdostí jsou využívány pro razantní a dynamický styl hraní (rock, metal), zatímco paličky, které jsou lehčí a méně husté, se používají pro technické hraní a náročné pasáže (jazz).

Jelikož jsou paličky pro bicí nástroje spotřebním zbožím, hraje velkou roli ve výběru vhodného materiálu ekonomika a dostupnost určitého druhu dřeva [5].

1.3 Blány membranofonů

Blána je oscilátorem bubny, jejím rozkmitáním vzniká zvuk. První blány membranofonů byly zhotovené ze zvířecí kůže, nejčastěji telecí nebo hovězí. Očištěná vlhká kůže se natahovala na rámy bubnů a vyschnutím se vypínala. Tyto blány byly náchylné zejména na vlhkost a změnu teploty.

V dnešní době se zvířecí kůže používá jen zřídka, a to u výrobců zaměřujících se na výrobu historických bubnů. Moderní bubny používají blány vyrobené z umělé hmoty. Umělá hmota lépe snáší vlhkost, teplotu a má větší odolnost.

Na bubnu se nachází blána úderová a rezonanční (viz. kapitola 1). Tyto blány lze vzájemně naladit na stejnou frekvenci, podladit, nadladit či ladit do různých harmonických intervalů. Úderová blána dává zvuku bubny attack a průraznost. Rezonanční blána ovlivňuje dozvuk bubny a jeho barvu.

Blány se také vyrábějí v různých tloušťkách, nejčastěji to jsou jednovrstvé blány a dvojevrstvé blány. Jednovrstvé blány jsou lehčí a pružnější, vytváří jasnější a čistší zvuk, zatímco dvojevrstvé mají zvuk temnější a zastřenější. Většinou se tlustější blána používá jako úderová a lehčí blána je blanou rezonanční.

Výběr blány vždy záleží na požadovaném zvuku a hudebním stylu. Na trhu existují tři základní typy blan: čiré (clear), pískované (coated) a černé (ebony). Dalším typem blan jsou takzvané blány předtlužené, které obsahují tlumítko umístěné na bláně nebo v její obruči, tlumící vibrace.

Čirá blána produkuje čistší a jasnější zvuk než blána černá. Černé blány jsou díky své úpravě pevnější s vyšší hustotou, tím pádem jsou jejich kmity tlumenější.

Pískované blány disponují povrchovou úpravou vyhledávanou zejména při hře metličkami. Nerovnost povrchu umožňuje metličkám produkovat zvuk obohacený o šumovou složku [6].

2. ZVUKOVÝ SIGNÁL

V této kapitole je obsažena základní teorie zvukového signálu, popis tvorby zvuku membranofonů a výčet nejpoužívanějších metod pro analýzu zvukového signálu.

Signál je chápán jako fyzikální veličina umožňující přenášet či uchovávat informace. Informace, kterou signál přenáší, může být například elektrické napětí, tlak nebo teplota. Signál je tedy nositelem informace.

Na základě vlastností signálu jej můžeme dělit do skupin. Podle náhodnosti průběhů se signály dělí na deterministické a náhodné (viz tab. 2.1) [7].

Tab. 2.1. Základní dělení signálu

Signál					
Deterministický			Náhodný		
Periodický		Neperiodický	Stacionární		Nestacionární
Harmonický	Neharmonický		Ergodický	Neergodický	

Dále lze signály dělit podle jejich časových průběhů. Rozlišujeme signál spojitý, tedy signál se spojitým časem $x(t)$, kde t je spojitá časová proměnná. Diskrétní signál je naopak signál s diskrétním časem $x[t]$, kde čas t je definován pouze v diskrétním časovém okamžiku [7].

Zvuk, tak jak ho slyšíme, je definován jako mechanické kmitání částic pružného prostředí, kmitající ve frekvenčním rozsahu 20 až 20 000 kmitů za sekundu, které se šíří určitým prostředím konečnou rychlostí.

Základní harmonickou funkci sinus lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$y = 1 \cdot \cos x \quad (2.1)$$

$$u(t) = U_M \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.2)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.3)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.4)$$

Kde platí, že U_M ... amplituda, ω ... úhlový kmitočet, φ ... počáteční fáze, t ... čas, T ... perioda signálu [7].

Volné kmity ideální kruhové membrány, která je napnutá, popisuje diferenciální vlnová rovnice:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \xi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial \varphi^2} = \frac{1}{c_o} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

kde ξ ... výchylka membrány v uvažovaném bodě, r a φ ... polární souřadnice (vzdálenost uvažovaného bodu od středu membrány) a c_o ... rychlost šíření ohybových vln [8].

Rychlost šíření ohybových vln získáme pomocí vztahu:

$$c_o = \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (2.6)$$

kde T ... napětí membrány a ρ ... hustota membrány [8].

Řešení rovnice (2.5) vede ke vztahu:

$$\xi_1 = \sum_n A_n J_n(kr) \cos n \varphi + \sum_n B_n J_n(kr) \sin n \varphi \quad (2.7)$$

kde $\xi_1 \dots$ amplituda kmitů ($\xi = \xi_1 e^{j\omega t}$) a $J_n \dots$ Besselova funkce n -tého řádu argumentu (kr) [8].

Upevnění membrány po jejím obvodu vede k okrajové podmínce: pro $r = R$ platí $\xi_1 = 0$, a z toho plyne:

$$J_n(kR) = 0 \quad (2.8)$$

kde $R \dots$ poloměr membrány [8].

2.1 Tvorba zvuku membranofonů

Zvuk bubnu vzniká úderem paličky do blány, která se rozkmitá určitou frekvencí. Frekvence je fyzikální veličina udávající počet kmitů za jednu sekundu. Jednotkou frekvence je 1 Hertz [Hz].

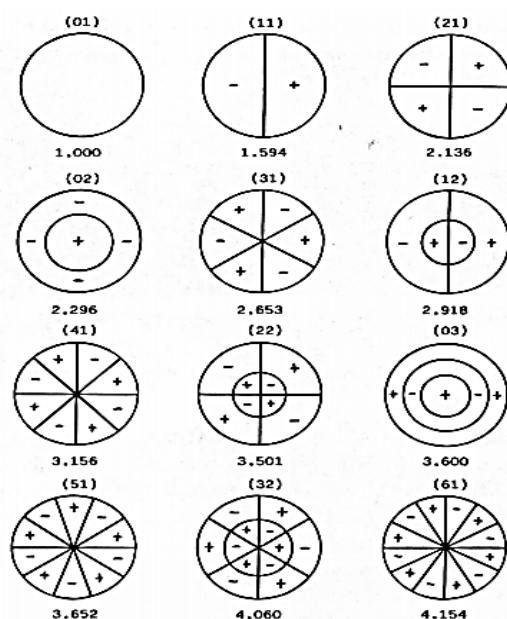
Podle Pavla Kurfürsta lze u všech akustických nástrojů určit jeho tři základní části, kterými jsou excitátor, oscilátor a rezonátor.

Excitátor je část nástroje, která dává prvotní impuls k rozechvění kmitající části. V případě membranofonů se jedná o různé druhy paliček, metličky nebo prsty bubeníka.

Paličky jsou podrobně probrány v kapitole 1.2. Kromě materiálů a druhů paliček ovlivňuje výsledné zvukové spektrum také místo na bláně, kam excitátor udeří.

Oscilátor je kmitající část nástroje. V případě membranofonů se jedná o blánu, která musí být napnutá, jelikož sama o sobě nekmitá.

Oproti struně na kytarě, která je pouze jednorozměrná a obsahuje nekmitající uzlové body, představuje membrána dvojrozměrný oscilátor s uzlovými čarami. Tato vícerozměrnost způsobuje vznik různých kmitů (radiálních, kruhových) a skutečnost, že frekvence jejich rezonančních módů jsou převážně v neharmonických poměrech.



Obr. 2-1: Rezonanční módy kruhové membrány [8]

Na obrázku 2-1 je zobrazeno prvních 12 módů s číselnou hodnotou značící frekvenční poměr k základnímu módu a vyznačením polarity okamžité výchylky blány. Označení (AB) znázorňuje pořadí radiálních (A) a kruhových (B) módů.

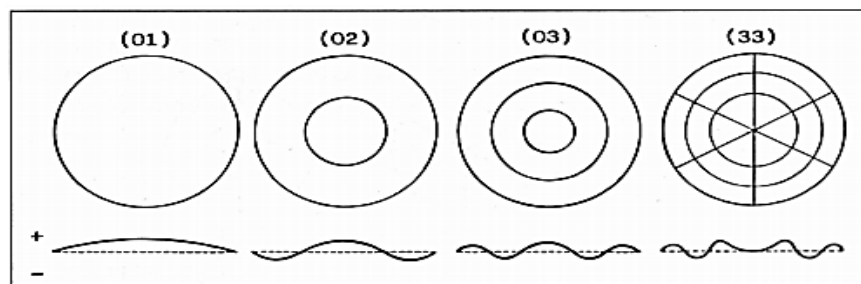
Radiální módy (dortové) (11), (21), (31), (41), (51), (61) vykazují převážně tónový charakter výsledného zvuku. Tlumení těchto módů je malé a frekvenční poměry mezi nimi (1,594 : 2,136 : 2,653) představují zhruba harmonickou řadu.

Kruhové módy (01), (02), (03) zapříčiňují převážně hlukový charakter zvuku. Tyto módy jsou naopak silně tlumeny a frekvenční poměry mezi nimi jsou neharmonické.

Módy (22) a (32) jsou kombinované a frekvenční poměr představuje zhruba poměr 7 : 8 harmonické řady.

Intenzita jednotlivých módů úzce souvisí s místem, ve kterém je membrána vybudena. Při úderu paličky ve středu blány dochází k vybudení zejména kruhových módů kmitání, zatím co při úderu na kraj membrány převažují módy radiální. Tímto způsobem lze určit, zda bude u výsledného zvuku převažovat hlukový nebo tónový charakter.

Frekvenční poměry uvedené na obrázku 2-1 platí pouze pro dokonale rovnoměrně napnutou blánu, která není zatížena vzdušným objemem. Reálná blána tyto podmínky nespĺňuje, a tak u ní dochází k posuvu jednotlivých frekvencí rezonančních módů.



Obr. 2-2: Řez rezonančními módy membrány [8]

Rezonátor u blanozvučných nástrojů je částečně nebo úplně ohraničená vzdušná dutina určitého objemu, který udává právě korpus bubnu, který je také rezonátorem.

Rezonátor působí jako zátěž ovlivňující vlastnosti kmitání membrány. U blány, která je rezonátorem zatížena stoupá frekvence jednotlivých módů v závislosti na jejím napětí. Stoupá také tlumení kruhových módů a v menší míře i radiálních. Kruhové módy střídavě rozpínají a stlačují vzduchové částice, zatímco dortové módy rozpínají a stlačují vzduch současně [8].

2.2 Rezonance, rezonanční křivka

Vlastní kmity oscilátoru (blány) předávají svojí energii soustavám, se kterými je spojen. V případě bubnu se jedná o rezonátor v podobě korpusu bubnu a sloupce vzduchu uvnitř bubnu. Rezonátor má obecně velký vliv na výslednou barvu a kvalitu zvuku.

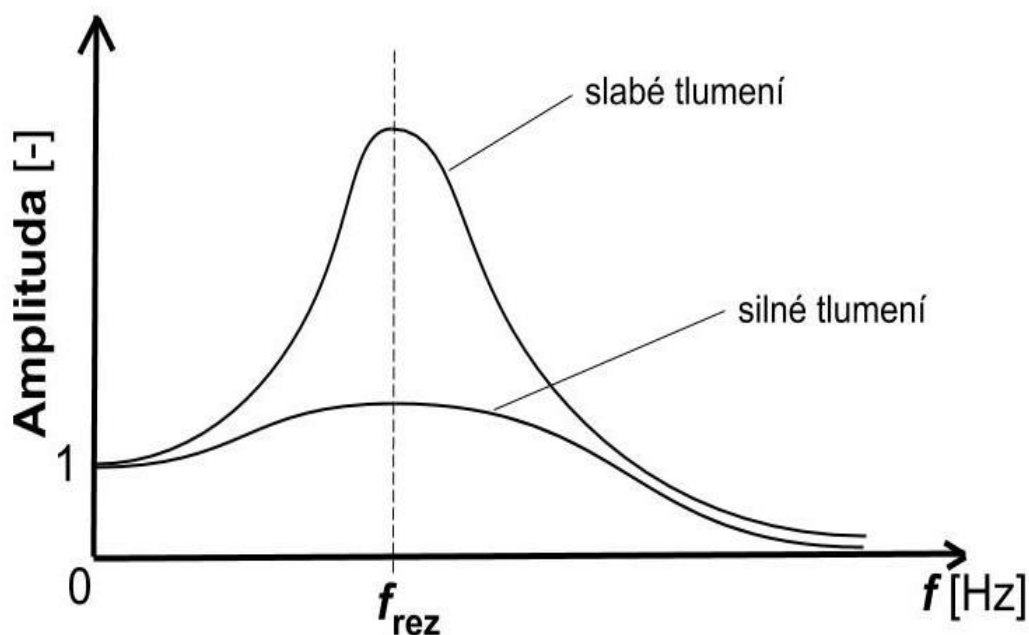
Závislost amplitudy předaných kmitů na frekvenci lze vyjádřit pomocí tzv. rezonanční křivky (viz [obr. 2-3](#)).

Rezonance je jev, při kterém se frekvence síly budící kmity oscilátoru rovná jeho rezonanční frekvenci a zároveň je amplituda vynucených kmitů oscilátoru maximální. Zjednodušeně lze říct, že se jedná o stav, kdy oscilátor svými předanými kmity rozkmitá a rozezní část nástroje, která není oscilátorem. [9]

Málo tlumený rezonátor je v případě bubnu korpus, jenž je tenký a jeho dosedová hrana pro blánu je ostře řezaná. Naopak buben s tlustým korpusem a tupější dosedovou hranou je silně tlumený rezonátor.

Zvuk bubnu s tenkým korpusem je znělý, jasný a teplý, střední tloušťka korpusu podporuje zvuk bubnu v celém spektru a je průrazný. Buben s příliš tlustým korpusem (více jak 13 mm) má zvuk tupý a zadušený, jelikož je potlačena rezonance korpusu.

Na rezonanci bubnu má vliv mnohem více faktorů jako například materiál, lakování a lepení, tvar dosedové hrany pro blánu, umístění vrtání uvnitř bubnu a další. [9]



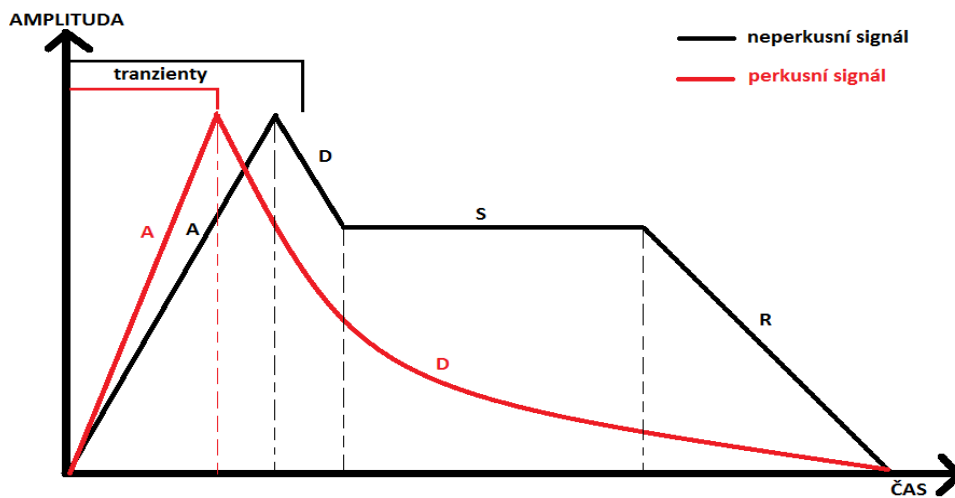
Obr. 2-3 Rezonanční křivka

2.3 Časový průběh

Časový průběh každého zvuku lze zobrazit pomocí takzvané amplitudové obálky neboli ADSR křivky. Tato křivka zobrazuje změnu amplitudy (maximální hodnoty intenzity) akustického tlaku v závislosti na čase. Základní části obálky jsou pojmenovány podle vžitě terminologie ze zvukové syntézy: A = attack, D = decay, S = sustain, R = release.

Část attack a delay označují nakmitávací pochody signálu, sustain označuje zakmitaný stav a fáze release značí dokmitávací pochody signálu. Díky těmto fázím dokážeme určit, jedná-li se o perkusní či neperkusní zvuk.

Perkusní zvuk, na rozdíl od zvuku neperkusního, postrádá ve své obálce fázi sustain a tím pádem fáze attack přechází ve fázi decay. Ze změny tvarů amplitudové obálky a z jejího charakteru lze usoudit, zdali bude zvuk spíše tónového či hlukového charakteru [8].

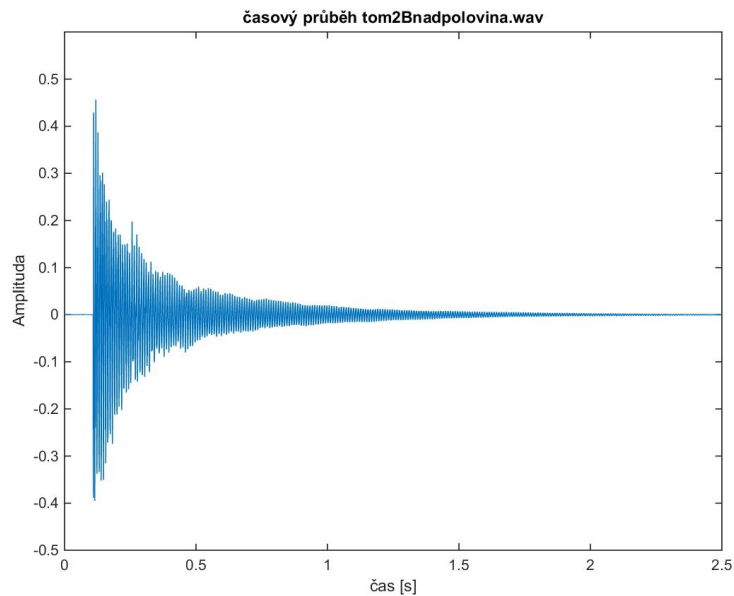


Obr. 2-4: ADSR obálka

Časovou obálku zvuku lze chápat jako modulační funkci $A(t)$, která mění maximální amplitudu signálu. Tato interpretace je vyjádřena pomocí vztahu:

$$f(t) = A(t) \cdot x(t) \quad (2.9)$$

kde $A(t)$... obálka reálného signálu, $x(t)$... nemodulovaný signál (např. $\cos(\omega t + \varphi)$ nebo obecný komplexní signál).



Obr. 2-5: časový průběh tom tomu

2.4 Spektrální analýza

2.4.1 Spektrum signálu

Každý zvukový signál, periodický či neperiodický, lze rozložit na jednotlivé dílčí složky, které jsou v daném signále obsaženy. Grafický nebo číselný zápis uspořádání jednotlivých frekvenčních složek signálu je označován jako frekvenční spektrum.

Tento rozklad jednotlivých frekvenčních složek, označovaný též jako harmonická analýza či Fourierovy řada, popsal začátkem 19. století francouzský fyzik a matematik Joseph Fourier. Komplexní signál lze rozvinout pomocí Fourierových řad do tvaru:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t] \quad (2.10)$$

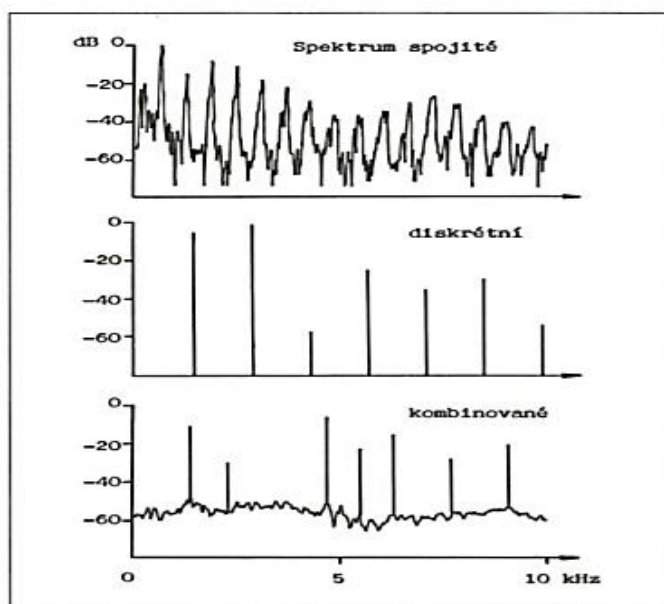
pro $k = 1, 2, 3 \dots$ (pořadí harmonické složky o frekvenci $k\omega$)

$$\text{kde } a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt, \quad a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega t dt, \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega t dt \quad (2.11)$$

Z uvedených vztahů je patrné, že frekvence vyšších harmonických složek jsou celočíselnými násobky základní frekvence (fundamentu) a nacházejí se vůči sobě v harmonických poměrech.

Poměry frekvencí těchto složek bývají u reálných nástrojů často neceločíselné násobky, v tom případě hovoříme o inharmonicitě. Pro membranofony je inharmonicitata ve spektru typickým rysem, který se odráží na výsledném zvuku bubnů. V následujícím textu budou tyto složky označovány jako vyšší periodické či alikvótní složky nebo přímo inharmonické složky.

Dále lze spektrum signálu dělit podle jeho grafického zobrazení. Periodický signál obsahuje oddělené diskrétní složky v harmonickém poměru, toto spektrum je označováno jako čárové nebo diskrétní. Šumové či hlukové signály jsou zobrazeny pomocí spojitého spektra. Posledním typem spektra je spektrum kombinované, spojující výše uvedené [8].



Obr. 2-6: základní dělení spektra [8]

2.4.2 FFT

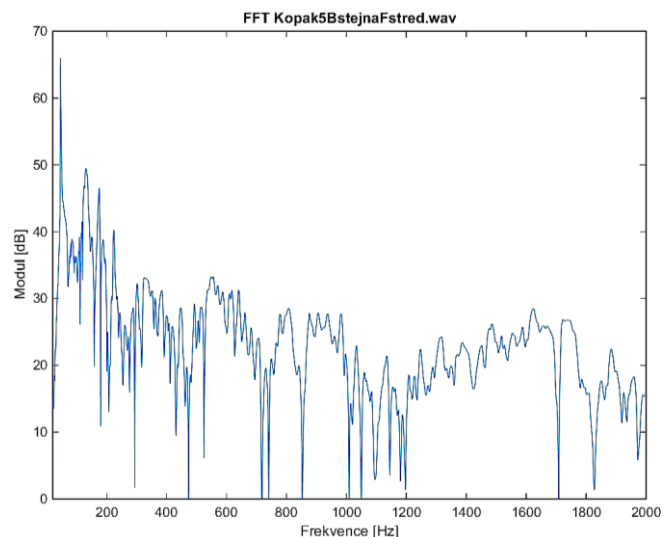
FFT je zkratkou slov Fast Fourier Transformation, česky přeloženo jako rychlá Fourierova transformace. Tato analytická metoda umožňuje rozložení komplexního signálu na jednotlivé dílčí harmonické signály (viz kapitola 2.3.1).

Výsledkem FFT bývá numerické nebo grafické zobrazení zvané FFT spektrum. Fourierova transformace umožňuje převedení signálu z časové roviny do roviny frekvenční. Dvourozměrné spektrum Fourierovy transformace vyobrazuje frekvenci jednotlivých složek na vodorovné ose, svislá osa reprezentuje modul (amplitudu, intenzitu) těchto složek. Rychlá Fourierova transformace je popsána vztahem:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.12)$$

kde $f(t)$... komplexní funkce, ω ... úhlový kmitočet, t ... čas [8].

Opakem FFT je inverzní Fourierova transformace (IFFT), která umožňuje převedení z frekvenční oblasti do oblasti časové. Pro zpracování signálů v digitální oblasti slouží DFT = diskretní Fourierova transformace, která zpracovává diskretní vzorky signálu.



Obr. 2-7: FFT spektrum velkého bubnu

2.4.3 Spektrogram

Vyobrazení spektrogramu umožňuje analyzovat spektrum signálu v oblasti časové i frekvenční. Spektrogram je jedním ze základních nástrojů pro analýzu signálu. Časová osa signálu je vyobrazena na vodorovné ose, svislá osa znázorňuje frekvenční oblast signálu, nejčastěji pomocí různých barev je pak znázorněna intenzita jednotlivých frekvenčních složek

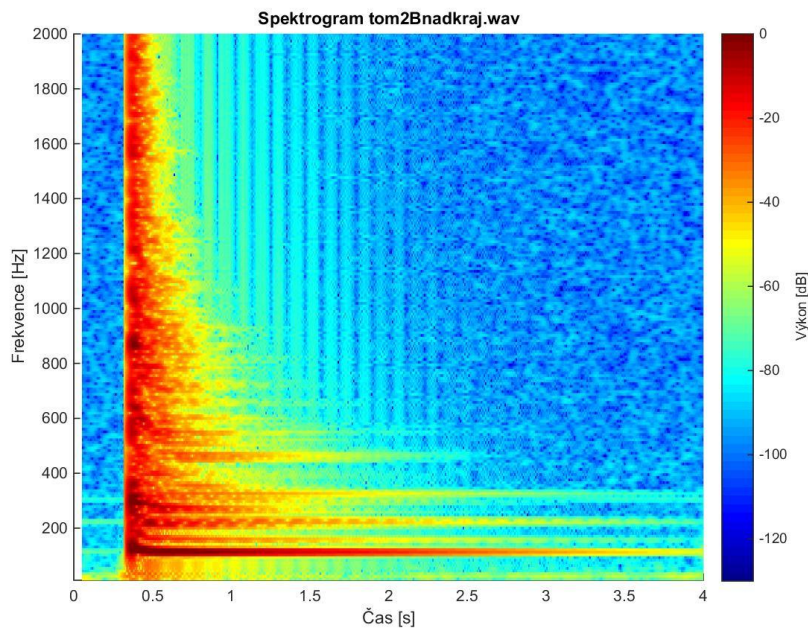
Spektrogram lze zobrazit i ve 3D, kdy je intenzita frekvenčních složek reprezentována osou z (podle kartézské soustavy souřadnic xyz).

Vyobrazení spektrogramu v programu MATLAB bylo provedeno pomocí funkce *spectrogram*, kterou tento program obsahuje. Výpočet je proveden pomocí STFT, což v překladu znamená krátkodobá Fourierova transformace, která rozdělí signál na jednotlivé časové segmenty podle zvoleného typu okna a následně v nich vypočítá FFT.

Syntaxe použitá v prostředí MATLAB vypadá následovně:

```
s = spectrogram(x,window,noverlap,nfft)
```

kde *x* ... vstupní signál, *window* ... typ okna, *noverlap* ... prolínání mezi segmenty, *nfft* ... počet vzorků pro výpočet DFT [11].



Obr. 2-8: Spektrogram tom tomu

2.5 Psychoakustické veličiny

Tato kapitola obsahuje výpis základních psychoakustických veličin používaných pro posouzení kvality, barvy a parametrů zvukového signálu.

Psychoakustika neboli psychologická akustika je vědní obor na pomezí akustiky a psychologie, který se zabývá zkoumáním fyziologických a psychologických reakcí na zvukové vjemy. Některé psychoakustické veličiny zkoumající právě zvukové vjemy nejsou standardizované, nemají tak pevně dané metody výpočtů.

Následující část této podkapitoly obsahuje základní definici nejčastěji měřených psychoakustických veličin, kterými jsou hlasitost, ostrost a jasnost.

2.5.1 Hlasitost (subjektivní)

Hlasitost je ve smyslu psychoakustiky veličina, která určuje subjektivní hlasitost zvuku a podle technické normy je chápána jako vlastnost sluchu podle které lze uspořádat zvuky v rozsahu od tichých po hlasité. Hlasitost zohledňuje akustický tlak, závislost vnímání lidského sluchu na frekvencích obsažených ve zvuku a také zahrnuje efekt maskování.

Pro měření hlasitosti je nutné znát hodnotu akustického tlaku signálu.

Základní jednotka subjektivní hlasitosti je 1 son. Son je lineární jednotka. Tato jednotka je definována pro frekvenci 1 kHz a hladinu akustického tlaku 40 dB, v takovém případě má výsledný hodnotu hlasitosti 1 son.

Zvýšením akustické hladiny tlaku o 10 dB, dochází k subjektivnímu vyhodnocení zvuku jako dvakrát hlasitější, tím pádem se zvýší dvakrát i hodnota subjektivní hlasitosti. Zvuk s frekvencí 1 kHz a hladinou akustického tlaku 50 dB bude mít hodnotu hlasitosti 2 son [14].

2.5.2 Ostrost

Ostrost je veličina, která je podle Zwickera a Fastla definována jako zvuk o šířce jednoho kritického pásma se střední frekvencí 1 kHz a hodnotou akustického tlaku 60 dB. Ostrost je značena písmenem S a její jednotkou je 1 acum. Pro měření ostrosti je nutné znát hodnotu akustického tlaku signálu.

Ostrost zohledňuje výskyt a hlasitost vyšších frekvencí v měřeném hluku. Pro dosažení velké hodnoty ostrosti je důležité zastoupení spektrálních složek na vyšších frekvencích.

Tato veličina nepatří mezi standardizované veličiny, existuje proto více metod, kterými lze vypočítat (Zwicker a Fastl, Aures) [14].

2.5.3 Jasnost

Velichina jasnosti je bezrozměrná a je značena písmeny BR. Jasnost je často dáována do souvislosti se spektrálním centroidem, který udává kmitočtovou polohu energetického těžiště spektra.

Podle Beauchampa je jasnost definována podílem harmonických složek ve spektru zvuku podle rovnice:

$$BR = \frac{\sum_{k=1}^n k c_k}{c_0 + \sum c_k} \quad (2.12)$$

kde n ... počet uvažovaných harmonických složek, c_k ... velikost k-té harmonické složky v lineárním měřítku a c_0 ... prahová velikost užitečné harmonické složky [15].

3. POPIS MĚŘENÍ

Tato kapitola se zabývá popisem nahrávacího řetězce, samotným nahráváním jednotlivých vzorků, přístroji, které byly použity, a také se věnuje požadavkům, které byly kladeny na hráče hrající na jednotlivé bubny.

K dosažení co nejlepších výsledků je důležité dodržet správné postupy nahrávání a eliminovat nežádoucí vlivy, jež by mohly přesnost měření negativně ovlivnit. Dalším důležitým bodem správného měření je také správná dokumentace v průběhu měření i při následném zpracování a vyhodnocení nahraných vzorků.

3.1 Postup měření

První měření se uskutečnilo 30.10.2019 v nahrávacím studiu (laboratoř SC 1.23) na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Pro měření byla dodána panem RNDr. Luborem Příkrylem bicí souprava značky Pacific Drums and Percussion (PDP) edice Mainstage. Jednotlivé bubny jsou vyrobeny z topolu. Hustota topolu je $\pm 450 \text{ kg/m}^3$, Youngův modul pružnosti dosahuje hodnot 10,9 GPa. Z této soupravy byl měřen velký buben o rozměrech 20" x 16", malý buben o rozměrech 14" x 5", větší tom-tom o rozměrech 12" x 9".

Vzorky byly nahrávány v nahrávací místnosti studia. Pro snížení energie odražených vln byly okolo bubnu postaveny absorbery do tvaru půlkruhu. Mikrofon byl umístěn 50 cm od středu blány a mířil kolmo na blánu (viz obr. 3.1). Vzdálenost mikrofonu od blány se měřila pomocí výsuvného metru. Signál mikrofonu byl veden z nahrávací místnosti do poslechové pomoci stageboxu, ze kterého následně vedl do mikrofonního předzesilovače. Z tohoto předzesilovače byl signál vedený do zvukové karty, kde došlo k A/D převodu a dále vedl do PC, kde byl pomocí softwaru zaznamenán.

Pro účely měření bylo potřeba každý z výše uvedených bubnů nahrát s nezatíženou úderovou blánou (bez rezonanční blány), s rezonanční blánou naladěnou na stejnou frekvenci jako blána úderová a s rezonanční blánou, která je nadladěná nebo podladěná vzhledem k bláně úderové. V případě malého bubnu přibyla kombinace rezonanční blány se struníkem.

Pro každou z těchto konfigurací bylo dále potřeba rozkmitat blánu na různých místech. Při měření byly nahrány úderý paličkou na střed blány, na polovinu poloměru blány a úderý na kraj blány. Všechny uvedené kombinace úderů byly provedeny paličkami třech různých tvrdostí (2B, 5B s nylonovou špičkou, 7A).

Prvním nahrávaným bubnem byl velký buben. Úderová blána bubnu byla naladěná pomocí ladičky na zhruba 40 Hz. Tato blána byla čirá. Po domluvě s vedoucím práce stačilo nahrát úderý paličkami vedené na střed blány, která není zatížená a s rezonanční blánou naladěnou na stejnou frekvenci. Rezonanční blána velkého bubnu byla černá bez otvoru

Druhý nahrávaný byl malý buben. Jeho úderová blána s pískovanou úpravou povrchu byla laděná zhruba na 245 Hz.

Po přidání čiré rezonanční blány vyladěné na stejnou frekvenci a struníku byla nahrána série úderů s napnutým a spuštěným struníkem. Následovala série úderů, kdy byla rezonanční blána nadladěná na 335 Hz a struník nebyl napnutý. Nakonec se nahrála série úderů s rezonanční blánou podladěnou na 180 Hz a napnutým struníkem.

Posledním z nahrávaných bubnů byl tom-tom s čirou úderovou blánou laděnou na 160 Hz. Po zaznamenání úderů s rezonanční blánou naladěnou na frekvenci blány úderové došlo k nadladění na 225 Hz. Poté byla nahrána poslední série úderů s rezonanční blánou naladěnou na 121 Hz. Rezonanční blána tom-tomu byla čirá.

Druhé měření proběhlo 6.5.2020 opět v nahrávacím studiu na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií. Z dodané bicí soupravy byl měřen floor tom o rozměru 16" x 14". Součástí měření bylo také vyobrazení chladního obrazců na úderové bláně umožňující vizualizaci jednotlivých rezonančních módů.

Pro získání relevantních výsledků měření byly dodrženy stejné podmínky jako při prvním měření. Nahrání vzorků proběhlo v nahrávací místnosti studia, vzorky byly nahrány mikrofonom AKG CK92 umístěným 50 cm od středu úderové blány a byly dodrženy všechny požadavky a postupy jako u prvního měření.

Jednotlivé úderů na vytipovaná místa byly provedeny paličkami třech různých tvrdostí na nezatíženou úderovou blánu naladěnou na 87 Hz.

Následně se k bubnu přidala rezonanční blána naladěná na tři různé frekvence. Po přidání rezonanční blány se obě blány sladily na 146 Hz, pro podladění a nadladění jsem zvolil interval tercie čili podladění rezonanční blány na 116 Hz a nadladění na 175 Hz. Obě použité blány byly čiré.

Vždy po provedení série úderů pro určité ladění byly na bubnu generovány chladního obrazce pomocí reproduktoru.



Obr. 3-1 nahrávání malého bubnu

3.2 Zařízení použitá k měření

Pro měření poskytl techniku pan docent Ing. Jiří Schimmel Ph.D.. Vzorky byly nahrány pomocí mikrofону AKG CK 92, který má kulovou směrovou charakteristiku a dostatečně lineární frekvenční charakteristiku v pásmu od 30 do cca 5000 Hz.

Při měření byl použit také mikrofon AKG CK 91 se směrovou charakteristikou typu kardioida. Stopa z tohoto mikrofonu se uchovala jako záložní, k následnému zpracování nahrávek a vyhodnocení měření byla použita stopa z mikrofonu AKG CK 92.

Signál z mikrofonů propojených pomocí XLR kabelu se stageboxem vedl do mikrofonního předzesilovače RME Octamic II. Zde docházelo k zesílení signálu a ke přivedení fantomového napájení do mikrofonů.

Analogový signál byl dále veden z předzesilovače do zvukového rozhraní MOTU, kde došlo k A/D převodu. Vzorkovací frekvence zvukové karty byla nastavena na 96 kHz a bitová hloubka na 24bit.

Ze zvukové karty vedl signál do PC, kde byl zaznamenán a zpracován v programu REAPER (x64). Tento program sloužil i při střihu a úpravách nahraného materiálu.

K výslednému zpracování vzorků a vyhodnocení výsledků měření byl použit software MATLAB 2014b a MATLAB 2020a.

Pro druhé měření byl vybrán mikrofon AKG CK 92 připojený pomocí XLR kabelu k digitálnímu mixpultu PreSonus StudioLive 24R, Digitální mixpult byl propojen pomocí USB s PC, kde byl signál nahráván pomocí programu Cubase 7.5.

Nahrané vzorky byly poté zpracovány v programu REAPER (x64) a následně analyzovány v programu MATLAB 2014b a MATLAB 2020a.

K vyobrazení chladního obrazců bylo zapotřebí dostatečně výkonný reproduktor, vhodný na tento pokus, který poskytl pan docent Ing. Jiří Schimmel Ph.D společně se zesilovačem MACKIE FRS-1700 a tónovým generátorem NTI Audio MR Pro Minirator.

3.3 Požadavky na hráče

Pro dokonalé měření a vyvarování se chyb způsobených lidským faktorem by bylo pro práci ideální použít nastavitelné robotické rameno, které by provádělo úderý na určená místa vždy pod stejným úhlem a ve stejné dynamice. Z důvodu, že rameno v době měření nebylo k dispozici, byla zvolena varianta kdy úderý prováděl živý hráč.

K omezení chyb negativně ovlivňujících průběh a výsledky měření byla s hráčem po konzultaci určena pravidla, která bylo potřeba dodržovat. Nahrání jednotlivých úderů se ujal kolega z oboru, jenž sám hraje na bicí nástroje, tím pádem má jisté zkušenosti zejména s dynamikou úhozu, držením paliček a zkušenosti se samotným měřením a nahráváním vzorků.

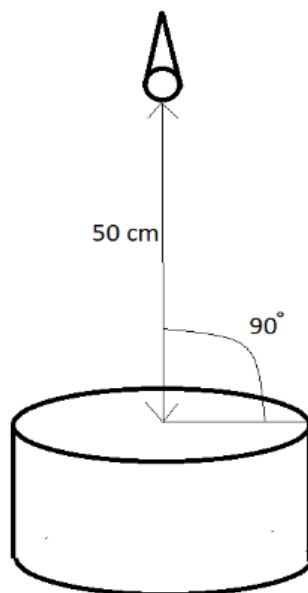
Prvním důležitým pravidlem pro správný průběh měření bylo dodržení stejné dynamiky všech úderů. Síla úderu byla zvolena středně silně, což v hudební praxi odpovídá dynamice *mezzoforte*. Splnění tohoto požadavku bylo náročnější zejména při úderech paličky k okraji blány. U většiny případů byly tyto úderu provedeny méně silně z důvodu velkého soustředění na provedení úderu do správného místa.

Dalším požadavkem bylo provádět úderý na tři určená místa na bláně, tedy do jejího středu, poloviny poloměru a na okraj blány. Dále bylo potřeba provést úderý třemi různými paličkami s tvrdostí 2B, 5B a 7A.

Z důvodu kvalitní dokumentace nahrávaných vzorků bylo vždy před každou sérií úderů oznámen druh paličky a místo na bláně, kam bude úder vedený. Tento systém byl užitečný zejména při následné úpravě a střihu jednotlivých vzorků. Při chybném úderu (například při udeření do ráfku bubnu) bylo nahráno v sérii více vzorků.

Pro eliminaci rušivých zvuků a ruchů bylo nezbytné omezit pohyb hráče pouze na pohyb paže při úderu, jelikož hráč stál velmi blízko snímacích mikrofonů.

Poslední z požadavků bylo dodržení dostatečně dlouhé doby mezi údery, aby zvuk produkovaný bubnem plně dozněl, a minimalizaci času kdy je špička paličky v kontaktu s blánou bubnu, aby nedocházelo ke tlumení kmitů.



Obr. 3-2: Poloha mikrofону vzhledem k úderové bláně

3.4 Značení nahraných vzorků

Vzhledem k velkému počtu nahraného materiálu bylo pro přehlednost potřeba sjednotit označení zpracovaných vzorků. Názvy jednotlivých vzorků se řídí pomocí níže uvedeného vzorce.

Název souboru = typ bubnu/ typ paličky/ stav rezonanční blány/místo úderu/ struník

Typ bubnu: kopák, snare, tom

Typ paličky: 2B, 5B, 7A

Stav rezonanční blány: bez, pod (podladěná), nad (nadladěná), stejnáF (laděná na stejnou frekvenci)

Místo úderu: střed, polovina, kraj

Struník (v případě malého bubnu): struník (napnutý struník), bezstruníku (struník nebyl napnutý)

Pro malý buben s napnutým struníkem, jenž měl rezonanční blánu podladěnou oproti bláně úderové a byl na něj zahrán úder paličkou tvrdosti 7A na kraj blány, vypadá název vzorku následovně: **snare7Apodkrajstruník**.

3.5 Chladniho obrazce

Tento jev objevil německý fyzik a hudebník Ernst Florens Friedrich Chladni působící na přelomu 18. a 19. století. Pomocí vibrační a rezonance je možné vyobrazit rezonanční módy desky (nástroje, blány), protože se sypký materiál, kterým je deska či blána pokryta, soustředí do míst, kde se nachází uzlové čáry.

Chladniho obrazce byly generovány na floor tomu. Celkově vznikly 4 sady obrázců pro různá ladění blan. Každá sada obsahuje 7-10 fotografií obrázců společně se záznamem rozměru obrázců pro následný výpočet vlnových délek.

Povrch úderové blány byl pokryt krupicí, pomocí tónového generátoru a zesilovače byla nastavena dostatečně velká úroveň napětí tak, aby byl signál dostatečně silný, ale nedocházelo ke zkreslení sinusového signálu. Reprodukční byl umístěn co nejbližší blány tak aby se jí nedotýkal.

Frekvence generovaného tónu byla nastavena dostatečně nízko oproti ladění blány (50 Hz) a postupně se frekvence navyšovala. Při prvních zákmitech blány byla frekvence pomocí jemného ladění generátoru doladěna tak, aby došlo k co nejpřesnějšímu vykreslení obrázců. Postup byl opakován pro každé ladění blan.



Obr. 3-3 Chladniho obrazce - 373 Hz



Obr. 3-4 Chladniho obrazce - 628 Hz

4. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

V této kapitole, jenž je hlavní částí bakalářské práce, dochází k vyhodnocení naměřených vzorků. Vyhodnoceny jsou vzorky nahrávané pro jednotlivé bubny bicí soupravy PDP Mainstage.

Vyobrazení spektrogramů a FFT spekter bylo uskutečněno pomocí funkcí *spektrogram* a *fft* vycházejících ze zdrojů [11, 12, 13], vytvořených v interaktivním programovém prostředí MATLAB verze R2014b obsahující signal processing toolbox. Pomocí programu MATLAB verze R2020a, který obsahuje audio toolbox s funkcemi pro měření psychoakustických veličin byly vypočítány hlasitosti a ostrosti zvuku nahraných vzorků.

Pro měření subjektivní hlasitosti byla vytvořena na základě zdroje [16] funkce *loudness*, která využívá funkci *acousticLoudness*. Pro výpočet ostrosti spektra byla použita funkce *sharpness* s funkcí *acousticSharpness* vycházející ze zdroje [17].

Tabulky a grafy naměřených hodnot byly zpracovány v programu MS Excel. Z vyobrazených spektrogramů a FFT spektra byla určena hodnota frekvence spektrálního centroidu a spektrální roll-off.

Na základě zadání práce jsou v této kapitole vyhodnoceny a porovnávány spektra malého bubnu v závislosti na místě úderu, tvrdosti paličky a stavu rezonanční blány případně struníku u malého bubnu.

Pro každý měřený vzorek jsou vyobrazeny právě dva spektrogramy. Ve spektrogramu s označením **(a)** jsou zobrazeny všechny frekvence slyšitelného pásma (20–20000 Hz). Spektrogramy s označením **(b)** zobrazují pouze frekvenční pásmo od (20–2000 Hz).

V tabulkách naměřených hodnot je vyobrazeno prvních 23 harmonických složek signálu, které se nejvíce podílejí na výsledném zvuku nástroje. Pro lepší přehlednost jsou tyto složky rozděleny barevně (viz tab. 4-1) do tří základních pásem.

První pásmo harmonických složek je složené z 1. až 8. složky. Toto pásmo vnímáme jako barvu zvuku složenou z intervalů. Sudé složky podporují mohutnost a jasnost tónu, ale netvoří barvu. Liché složky naopak tvoří barvu a zrnitost tónu [10].

1. harmonická = fundament: nemá žádnou barvu, určuje výšku tónu a má význam pro nosnost tónu.
2. harmonická = nemá barvu, zesiluje fundament a tvoří mohutnost tónu
3. harmonická = tvoří dutou a tupou barvu
4. harmonická = podporuje jasnost
5. harmonická = tvoří nazální barvu
6. harmonická = tvoří jas tónu
7. harmonická = vytváří brysknost
8. harmonická = tvoří jas tónu

Tab. 4.1. Barevné rozdělení pásem

rozdělení harmonických složek
1. pásmo = 1. až 8. harmonická
2. pásmo = 9. až 16. harmonická
3. pásmo = 17. až 23. harmonická

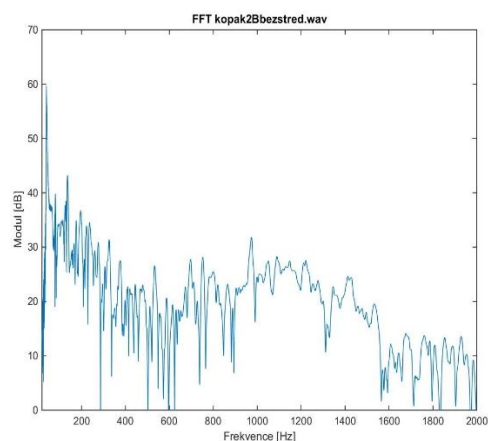
Druhé pásmo harmonických složek, tvořené 9. až 16. harmonickou složkou, vnímáme jako klastry neboli shluky složené z diatoniky. Pásmo je důležité pro ostrost zvuku. V případě, že v tomto pásmu určitá složka dynamicky vystupuje, může sehrát roli v barvě zvuku [10].

Třetí pásmo od 17. po 23. harmonické složky je vnímáno jako spojité spektrum, vytváří zvuk podobný řinčení skla a kovu, takzvaný kvaziharmonický. Další harmonické složky produkují zvuk vnímaný jako šum a je zcela neharmonický [10].

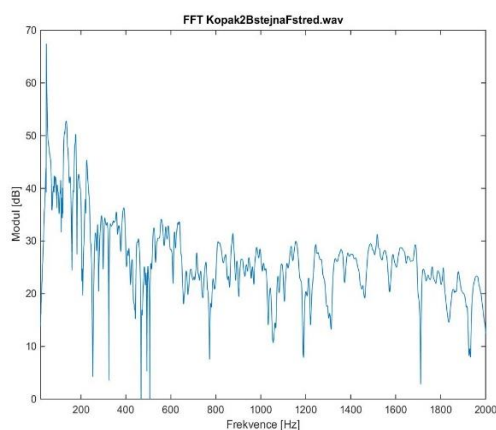
4.1 Spektrální analýza velkého bubnu

Tato podkapitola vyhodnocuje výsledky analýzy spektra velkého bubnu. Hráč prováděl úderý paličkami různých tvrdostí na střed úderové blány. Požadavkem na hráče bylo dodržení stejné dynamiky úderu a pokud možno i stejný úhel dopadu špičky paličky.

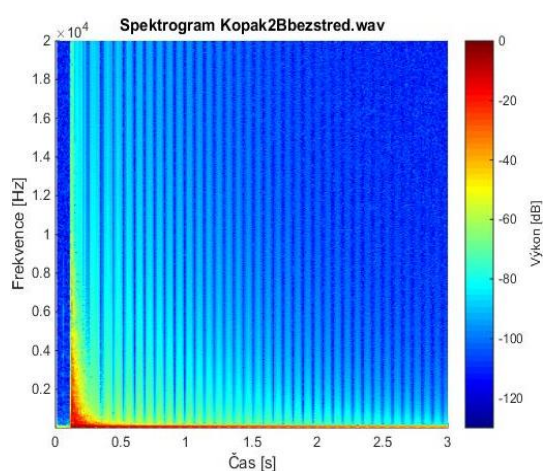
Závity pro šrouby, uchycující rezonanční blánu, byly přelepeny páskou kvůli eliminaci rušivých zvuků. Po přidělení rezonanční blány byla tato blána naladěna na stejnou frekvenci jako blána úderová



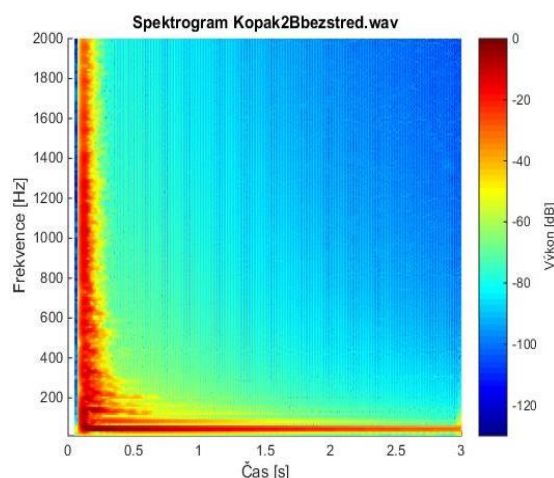
Obr. 4-1: FFT spektrum velkého bubnu (bez)



Obr. 4-2: FFT spektrum velkého bubnu (stejnáF)



Obr. 4-3: Spektrogram velkého bubnu (a)



Obr. 4-4: Spektrogram velkého bubnu (b)

Tab. 4.2: Naměřené hodnoty alikvótních složek velkého bubnu (bez)

kopak2Bbezstred					
Harmonická [n]	frekvence [Hz]	poměr mezi 1. a n harmonickou	poměr mezi n a n+1 harmonickou	inharmonicitá [%]	Modul [dB]
1	40,0002	1,0000	1,0000	0,0000	59,6786
2	81,0004	2,0250	0,4938	1,2500	39,8258
3	136,0007	3,4000	0,5956	13,3333	43,1995
4	165,5009	4,1375	0,8218	3,4375	30,6863
5	196,0010	4,9000	0,8444	2,0000	36,7384
6	237,0012	5,9250	0,8270	1,2500	34,5731
7	275,5014	6,8875	0,8603	1,6071	30,8874
8	325,5017	8,1375	0,8464	1,7188	31,4008
9	376,5020	9,4125	0,8645	4,5833	27,5706
10	410,0021	10,2500	0,9183	2,5000	22,7262
11	444,5023	11,1125	0,9224	1,0227	23,1759
12	478,0025	11,9500	0,9299	0,4167	23,0638
13	532,5028	13,3125	0,8977	2,4038	26,5844
14	587,0031	14,6750	0,9072	4,8214	20,7057
15	641,5033	16,0375	0,9150	6,9167	18,4971
16	696,5036	17,4125	0,9210	8,8281	27,7787
17	752,0039	18,8000	0,9262	10,5882	28,1360
18	799,5042	19,9875	0,9406	11,0417	25,5027
19	831,5043	20,7875	0,9615	9,4079	19,7214
20	865,0045	21,6250	0,9613	8,1250	23,2186
21	904,5047	22,6125	0,9563	7,6786	22,4714
22	938,5049	23,4625	0,9638	6,6477	22,9812
23	973,5051	24,3375	0,9640	5,8152	31,8184

Tab. 4.3: Naměřené hodnoty alikvótních složek velkého bubnu (stejnáF)

kopak2BstejnaFstred					
Harmonická [n]	frekvence [Hz]	poměr mezi 1. a n harmonickou	poměr mezi n a n+1 harmonickou	inharmonicitá [%]	Modul [dB]
1	46,0002	1,0000	1,0000	0,0000	66,9802
2	85,0004	1,8478	0,5412	7,6087	42,3118
3	135,0007	2,9348	0,6296	2,1739	52,7849
4	176,5009	3,8370	0,7649	4,0761	50,2437
5	226,0012	4,9130	0,7810	1,7391	45,3896
6	291,5015	6,3370	0,7753	5,6159	34,8510
7	357,5019	7,7717	0,8154	11,0248	35,5420
8	391,5020	8,5109	0,9132	6,3859	36,2996
9	455,0024	9,8913	0,8604	9,9034	30,4324
10	489,0025	10,6304	0,9305	6,3043	24,0210
11	524,5027	11,4022	0,9323	3,6561	32,5529
12	557,0029	12,1087	0,9417	0,9058	34,1937
13	588,5031	12,7935	0,9465	1,5886	32,9262
14	637,5033	13,8587	0,9231	1,0093	33,6932
15	668,5035	14,5326	0,9536	3,1159	24,3897
16	715,0037	15,5435	0,9350	2,8533	27,7751
17	755,5039	16,4239	0,9464	3,3887	26,0736
18	809,5042	17,5978	0,9333	2,2343	29,8942
19	843,0044	18,3261	0,9603	3,5469	27,4962
20	875,5046	19,0326	0,9629	4,8370	31,4624
21	913,0048	19,8478	0,9589	5,4865	26,6355
22	947,0049	20,5870	0,9641	6,4229	26,8913
23	981,5051	21,3370	0,9648	7,2306	28,8253

Frekvence základní složky neboli fundamentu je 40 Hz. Přidáním rezonanční blány, naladěné na stejnou frekvenci jako blána úderová, se zvýšila frekvence fundamentu na hodnotu 46 Hz. Z tabulek (4.2) (4.3) je patrné, že na celkovém zvuku velkého bubnu se podílí nejvíce první čtyři periodické složky. Průměr inharmonicity spektra, zejména v prvním pásmu složek, je v případě nezatížené blány menší než s blánou rezonanční.

Zvuk velkého bubnu s nezatíženou úderovou blánou tupý, mohutný a průrazný s velkou energií, tónová složka je neurčitá. To může být zapříčiněno poměrně malou inharmonicitou druhé periodické složky, která podporuje fundament. Na barvě nástroje se podílí zejména 2. a 3. alikvótní složky, které vytváří mohutný, tupý zvuk, který není bohatý na barvu. Sladění rezonanční blány podpořilo také 4. alikvótní složku.

Naměřená hlasitost malého bubnu byla 18,31 Sonů, po přidání rezonanční blány tato hlasitost vzrostla až na 27,3 Sonů. Ostrost zvuku nástroje s nezatíženou blánou byla 4,27 acum a v případě sladění rezonanční blány klesla hodnota ostrosti na 2,36 acum. Přidání a sladění rezonanční blány naopak vzrostla frekvence spektrálního centroidu a frekvence spektrálního Roll-offu.

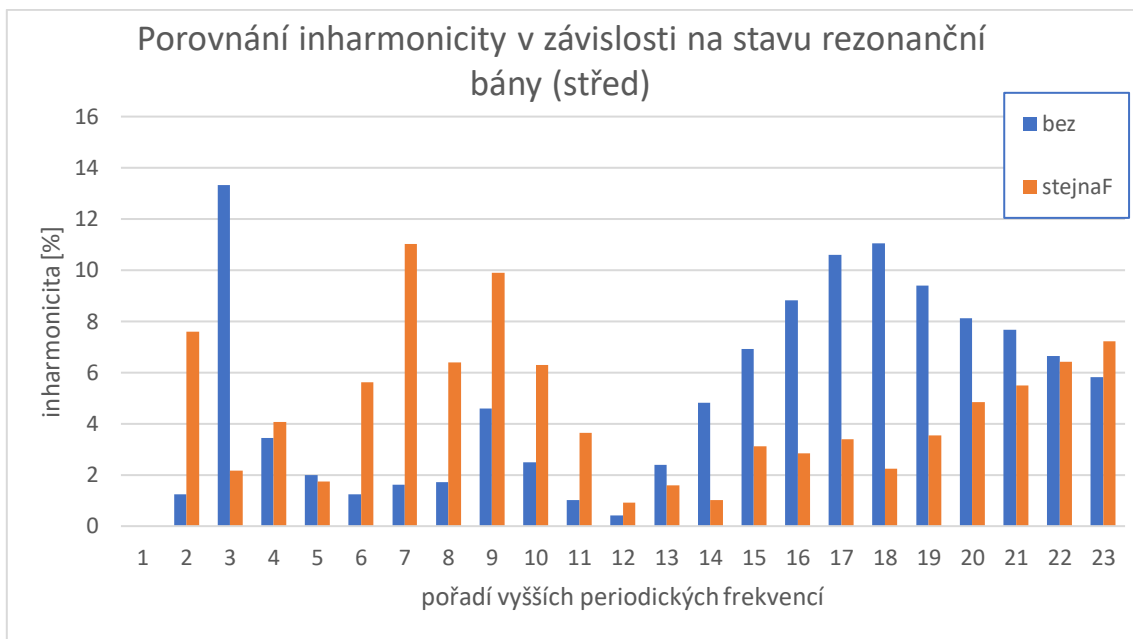
Zvuk se sladěnou rezonanční blánou má více tónových prvků, lze říci, že je sofistikovanější, uhlazenější a jasnější. V tomto případě je inharmonicity třetí periodické složky, která se podílí na barvě mnohem nižší než s nezatíženou blánou.

Ze spektrogramu (a) lze vyčíst, že při úderu jsou generovány vyšší periodické složky v rozsahu 40 - 4000 Hz, energie těchto složek klesá velmi rychle, po 250 ms dominují v barvě pouze složky prvního frekvenčního pásma. Po dalších 250 ms klesá energie i těchto složek a na dozvuku velkého bubnu už se podílí pouze fundament a druhá periodická složka. Celkový dozvuk velkého bubnu je 4,2 sekund, přidáním rezonanční blány se délka dozvuku mírně zkracuje.

Porovnáním FFT spekter je patrné, že přidáním rezonanční blány jsou posíleny frekvenční složky v pásmu od 100 do 250 Hz a v pásmu od 1600 Hz.

Z výsledků měření vyplývá, že palička tvrdosti 7A má za příčinu nárůst inharmonicity u složek nacházejících se mezi druhým a třetím pásmem periodických složek, hodnoty modulů vyšších periodických složek jsou téměř stejné pro všechny tři tvrdosti použitých paliček.

Pro účely měření bylo, po domluvě s vedoucím práce, zvoleno pouze jedno místo a tím byl střed úderové blány. Toto místo bylo zvoleno z důvodu, že při hře na velký buben se využívá pedálová palička, která je pevně přichycena ke korpusu bubnu, tím pádem se při hře nemění místo úderu.



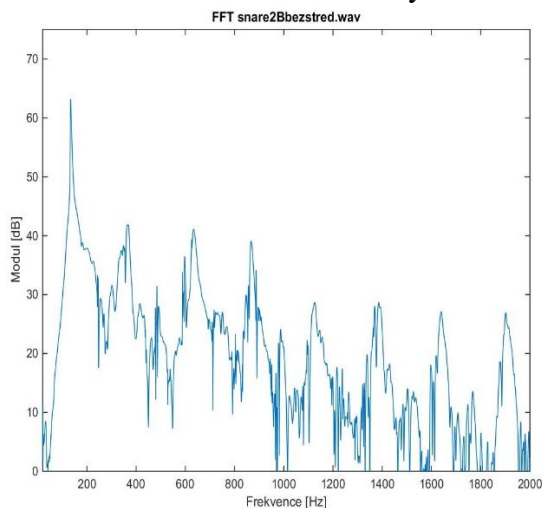
Obr. 4-5: Graf inharmonicity periodických složek velkého bubnu

4.2 Spektrální analýza malého bubnu

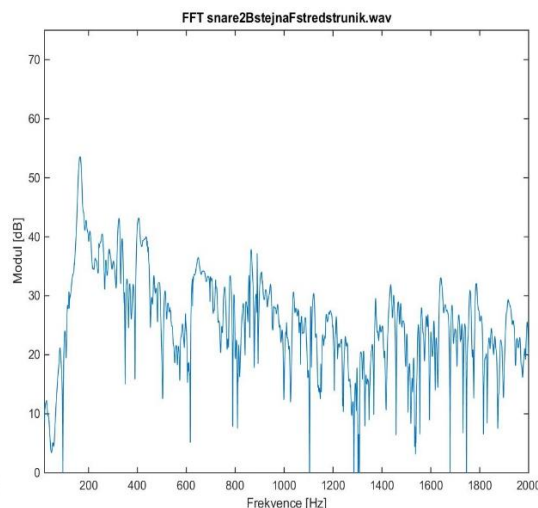
Druhá podkapitola vyhodnocuje výsledky analýzy spektra malého bubnu. Hráč prováděl úder y paličkami různých tvrdostí na tři vytipovaná místa úderové blány. Požadavkem na hráče bylo dodržení stejné dynamiky úderu a pokud možno i stejný úhel dopadu špičky paličky.

Závity pro šrouby, uchycující rezonanční blánu, byly přelepeny páskou kvůli eliminaci rušivých zvuků. Po přidělení rezonanční blány byla tato blána naladěna na stejnou frekvenci jako blána úderová, poté podladěna a následně nadladěna.

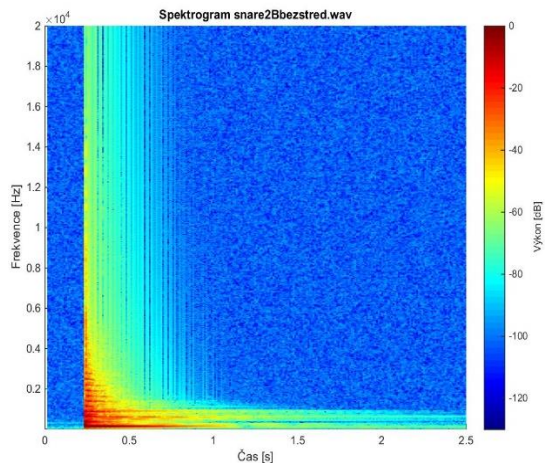
V případě malého bubnu byl k rezonanční bláně dále přidáván struník, který je pro zvuk malého bubnu charakteristický.



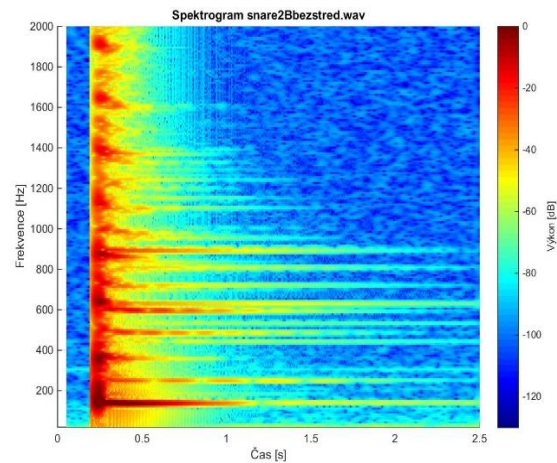
Obr. 4-6: FFT spektrum malého bubnu (bez)



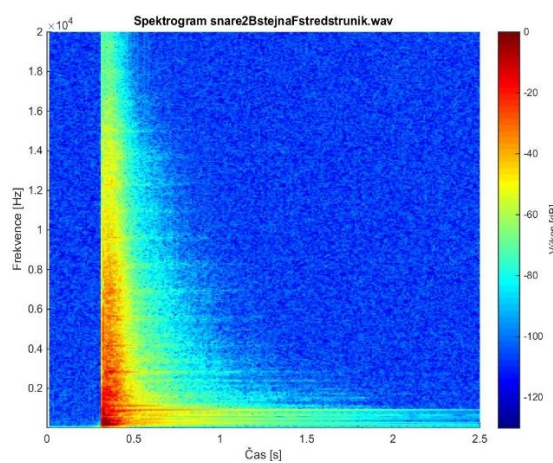
Obr. 4-7: FFT spektrum malého bubnu (stejnáF+struník)



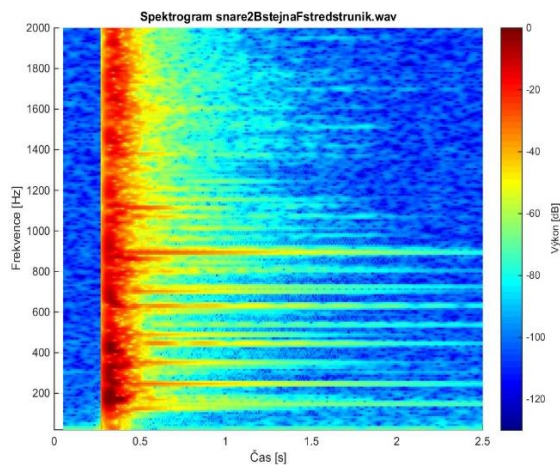
Obr. 4-8: Spektrogram malého bubnu (bez-a)



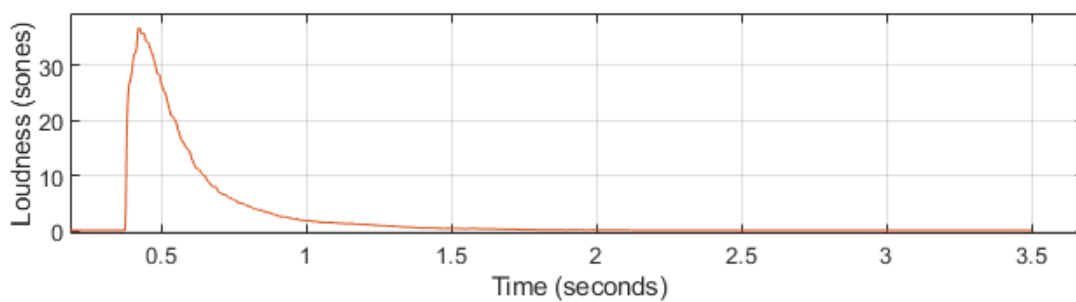
Obr. 4-9: Spektrogram malého bubnu (bez-b)



Obr. 4-10: Spektrogram malého bubnu
(stejnaF+struník-a)



Obr. 4-11: Spektrogram malého bubnu
(stejnaF+struník-b)



Obr. 4-12: Graf hlasitosti [son] malého bubnu v závislosti na čase

Tab. 4.4: Naměřené hodnoty alikvótních složek malého bubnu (bez)

snare2Bbezstred					
Harmonická [n]	frekvence [Hz]	poměr mezi 1. a n harmonickou	poměr mezi n a n+1 harmonickou	inharmonicitá [%]	Modul [dB]
1	133,6006	1,0000	1,0000	0,0000	62,9782
2	243,2010	1,8204	0,5493	8,9820	33,5085
3	364,4015	2,7275	0,6674	9,0818	41,8740
4	484,4020	3,6257	0,7523	9,3563	31,4145
5	633,2026	4,7395	0,7650	5,2096	41,1048
6	750,4031	5,6168	0,8438	6,3872	27,0683
7	867,2036	6,4910	0,8653	7,2712	39,0826
8	986,8041	7,3862	0,8788	7,6722	24,1350
9	1126,4047	8,4311	0,8761	6,3207	28,6669
10	1238,0052	9,2665	0,9099	7,3353	17,4354
11	1386,0058	10,3743	0,8932	5,6886	28,7644
12	1502,4063	11,2455	0,9225	6,2874	14,0286
13	1639,6068	12,2725	0,9163	5,5965	27,1157
14	1768,0074	13,2335	0,9274	5,4748	13,6102
15	1902,0079	14,2365	0,9295	5,0898	26,9619
16	2020,0084	15,1198	0,9416	5,5015	10,9538
17	2181,2091	16,3263	0,9261	3,9627	22,0531
18	2308,4096	17,2784	0,9449	4,0086	14,1171
19	2467,2103	18,4671	0,9356	2,8049	21,2894
20	2638,4110	19,7485	0,9351	1,2575	9,3207
21	2754,0115	20,6138	0,9580	1,8392	16,5491
22	2861,2119	21,4162	0,9625	2,6538	2,0808
23	2957,6123	22,1377	0,9674	3,7490	8,2344

Tab. 4.5: Naměřené hodnoty alikvótních složek velkého bubnu (stejnáF+struník)

snare2BstejnaFstredstruník					
Harmonická [n]	frekvence [Hz]	poměr mezi 1. a n harmonickou	poměr mezi n a n+1 harmonickou	inharmonicitá [%]	Modul [dB]
1	166,0007	1,0000	1,0000	0,0000	53,5674
2	284,4012	1,7133	0,5837	14,3373	37,9333
3	405,2017	2,4410	0,7019	18,6345	43,1988
4	512,8021	3,0892	0,7902	22,7711	30,8693
5	648,4027	3,9060	0,7909	21,8795	36,5099
6	756,8032	4,5590	0,8568	24,0161	31,5042
7	864,8036	5,2096	0,8751	25,5766	37,8308
8	1038,4043	6,2554	0,8328	21,8072	30,6311
9	1189,2050	7,1639	0,8732	20,4016	27,5059
10	1325,2055	7,9831	0,8974	20,1687	20,6311
11	1435,6060	8,6482	0,9231	21,3801	31,8946
12	1535,2064	9,2482	0,9351	22,9317	7,8590
13	1640,0068	9,8795	0,9361	24,0037	33,0483
14	1786,0074	10,7590	0,9183	23,1497	32,1457
15	1916,0080	11,5422	0,9322	23,0522	29,3713
16	2054,4086	12,3759	0,9326	22,6506	26,1292
17	2157,2090	12,9952	0,9523	23,5578	21,3877
18	2278,0095	13,7229	0,9470	23,7617	21,8200
19	2374,4099	14,3036	0,9594	24,7178	19,0362
20	2478,4103	14,9301	0,9580	25,3494	24,6824
21	2622,8109	15,8000	0,9449	24,7619	22,1961
22	2810,4117	16,9301	0,9332	23,0449	33,1860
23	2983,2124	17,9711	0,9421	21,8649	24,7565

Základní frekvence malého bubnu je 133,6 Hz. Při pohledu na spektrogramy je patrné, že úder na blánu vygeneruje periodické složky až do 12 kHz. Periodické složky na vyšších frekvencích už mají větší odstup od fundamentu a nepodílejí se přímo na barvě nástroje. Tyto frekvence jsou téměř neslyšitelné, jelikož jsou maskovány. Přítomnost tak velkého množství inharmonických složek je příčinou zvuku, který je typický pro úder do bubnu.

Zhruba po 300 ms ztrácejí vyšší periodické složky svoji energii a na barvě zvuku už se podílejí pouze složky nacházející se zejména v 1. pásmu.

Při pohledu na spektrogramy (viz příloha) lze vypožorovat, že čím více se úder blíží od středu k okraji, nabírá na intenzitě 3. a hlavně 2. harmonická složka, s touto intenzitou se zvyšuje také doba, po kterou tyto harmonické složky znějí. Tento jev má za příčinu, že při úderu na okraj je dozvuk bubnu delší, zřetelnější je i barva nástroje.

Změřená hlasitost malého bubnu se pohybovala okolo 21,5 sonů. Ostrost zvuku se pohybovala v případě nezatížené blány okolo 2,8 acum, největší ostrost vykazovalo spektrum pro úder na kraj blány s podladěnou rezonanční blánou a napnutým struníkem hodnotou 4,1 acum.

Inharmonicitu jednotlivých složek, je při úderu na okraj vyšší, než při úderu na střed. Poměry některých složek jsou ale více podobné harmonickým poměrům klasických tónových nástrojů. Intenzita vyšších periodických složek v prvním pásmu roste, čím více je úder vedený k okraji blány.

Tyto výsledky potvrzují skutečnost, že úder na střed generuje více kruhové módy, které jsou rychleji tlumeny a poměry mezi jednotlivými složkami jsou méně harmonické. Naopak úder k okraji blány generuje více dortové módy, jejichž tlumení není tak silné a poměry některých periodických složek připomínají harmonickou řadu.

Frekvence fundamentu není totožná jako hodnota, kterou při ladění bubnu ukazovala ladička (kapitola 3.1). Při porovnání těchto hodnot je patrné, že ladička na bicí zaznamenávala až druhou harmonickou složku, nikoliv fundament.

Čím blíže k okraji byl úder veden, tím níže klesala intenzita fundamentu a tím také klesá celková hlasitost zvuku. To je zapříčiněno chybou hráče, který se soustředil spíše na místo úderu, než na sílu úderu.

Porovnáním spektrogramů, tabulek a grafů je zjištěno, že paličky různých tvrdosti, které byly pro účely měření použity, nemají tak zásadní vliv na spektrum, jako místo úderu. Hodnota inharmonicity jednotlivých složek je téměř totožná pro všechny použité paličky. Stejně je tomu i v případě intenzity a změny energie v čase vyšších periodických složek.

Menší rozdíl v inharmonicitě je patrný při úderu paličkou tvrdostí 5B, kdy je průměrná inharmonicitu 4,62 %. Pro paličky 2B a 7A je průměrná inharmonicitu 6,2 %. To je s největší pravděpodobností zapříčiněno materiálem, jelikož je špička paličky vyrobena z nylonu.

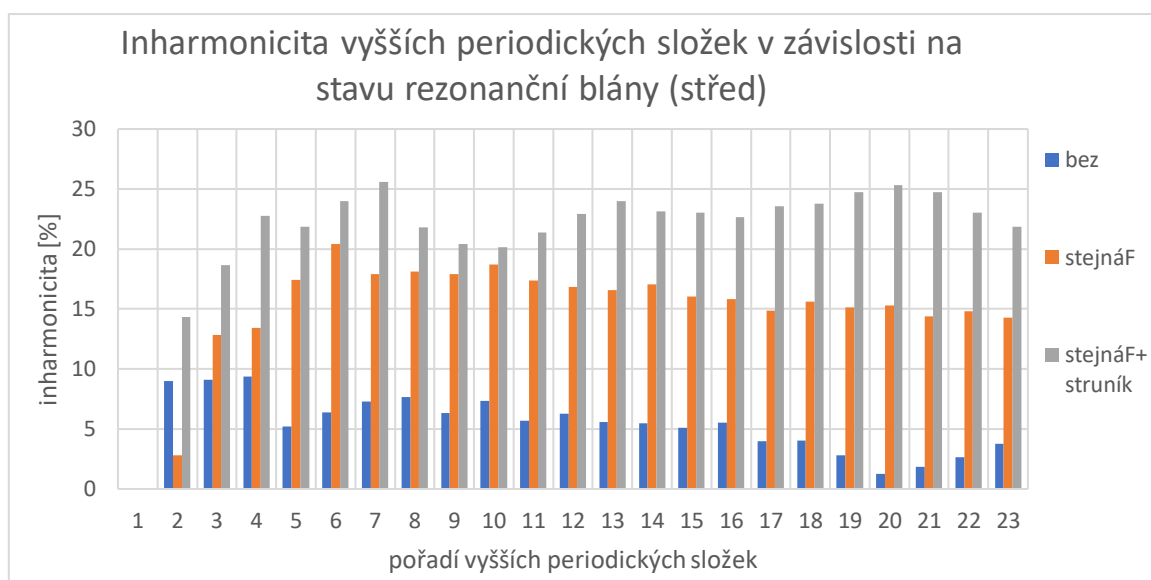
Fundament společně se třetí a pátou složkou jsou zásadními složkami podílející se na barvě zvuku malého bubnu.

Porovnáním naměřených hodnot v tabulkách lze vidět, že přidáním rezonanční blány bubnu dochází k navýšení frekvence fundamentu zhruba o 10 Hz. S nadladěnou rezonanční blánou dosahuje základní frekvence hodnoty 170 Hz. Při úderu na střed blány se stejně sladěnou rezonanční blánou roste míra inharmonicity mezi složkami. Doba dozvuku je menší než při úderu na kraj. Ztráta energie jednotlivých harmonických složek je zřetelnější.

Úder vedený na okraj blány naopak vykazuje menší inharmonicitu těchto složek, v prvním a druhém pásmu je dokonce inharmonicitu menší než s absencí rezonanční blány. Do popředí se v prvním pásmu dostávají sudé periodické složky (2., 4., 6.), které si déle drží svoji energii v čase.

Nejrazantnější změny ve spektru přicházejí s napnutím struníku. Díky struníku se ve spektru při úderu generuje mnohem větší množství vyšších periodických složek a zvyšuje se ostrost zvuku. Tento jev lze nejlépe vyzorovat na spektrogramech s označením (a). Kovové spirálky zapříčiňují ostrý, drnčivý, velice pronikavý zvuk. V tabulkách naměřených hodnot lze vidět, že ve vyšších pásmech (druhé, třetí i čtvrté) přibývá složek, které se přímo podílejí na tvorbě barvy.

Struník způsobuje ve spektru značné množství inharmonicity. Ve spektru se objevuje vyšší podíl šumových a ruchových složek. Vzhledem k této vlastnosti je malý buben s napnutým struníkem velice průrazný.

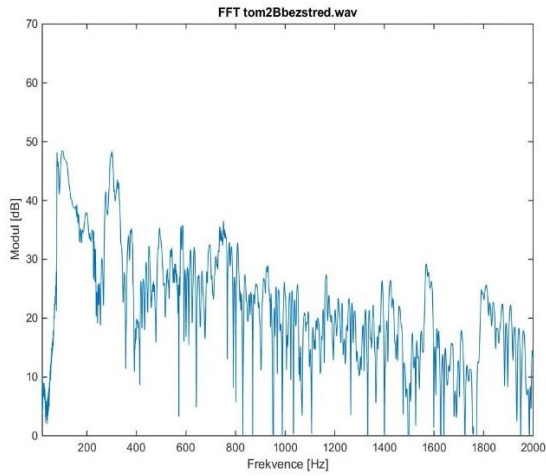


Obr. 4-13: Graf inharmonicity periodických složek malého bubnu

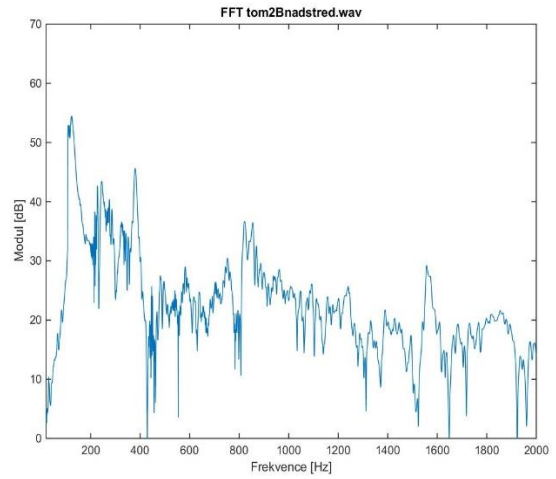
4.3 Spektrální analýza 12" tom-tomu

Tato podkapitola vyhodnocuje výsledky analýzy spektra 12" tom-tomu. Hráč prováděl údery paličkami různých tvrdostí na tři vytipovaná místa úderové blány a současně se snažil co nejvíce dodržet sjednané požadavky.

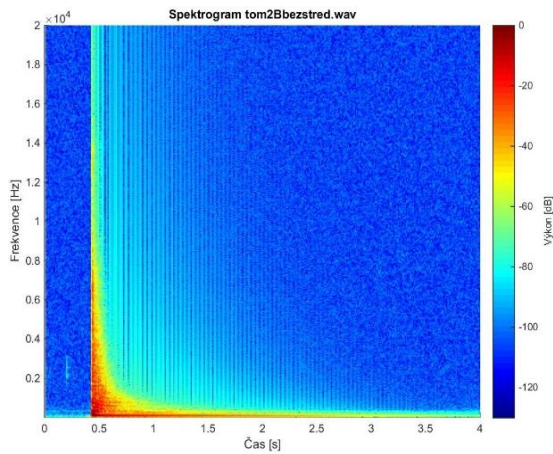
Závity pro šrouby, uchycující rezonanční blánu, byly přelepeny páskou kvůli eliminaci rušivých zvuků. Po přidělení rezonanční blány byla tato blána naladěna na stejnou frekvenci jako blána úderová, poté podladěna a následně nadladěna.



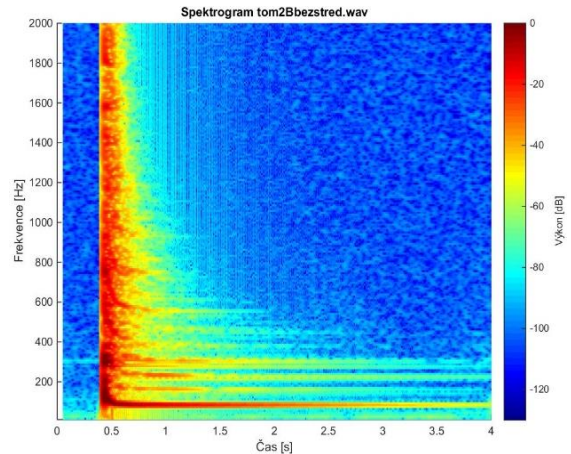
Obr. 4-14: FFT spektrum tom-tomu (bez)



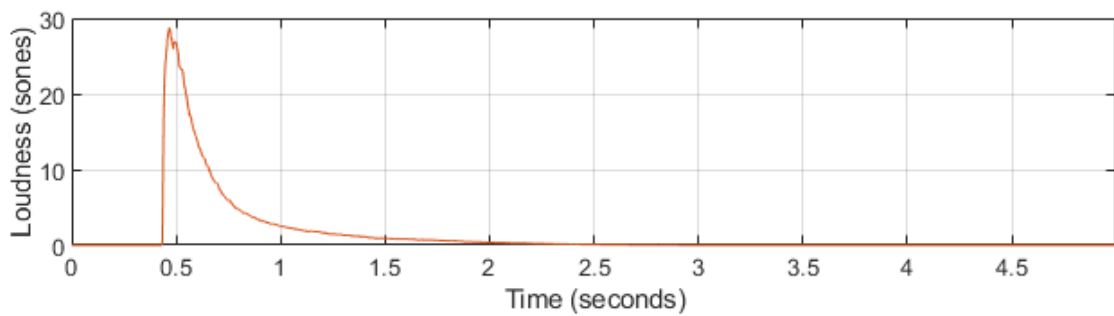
Obr. 4-15: FFT spektrum tom-tomu (nad)



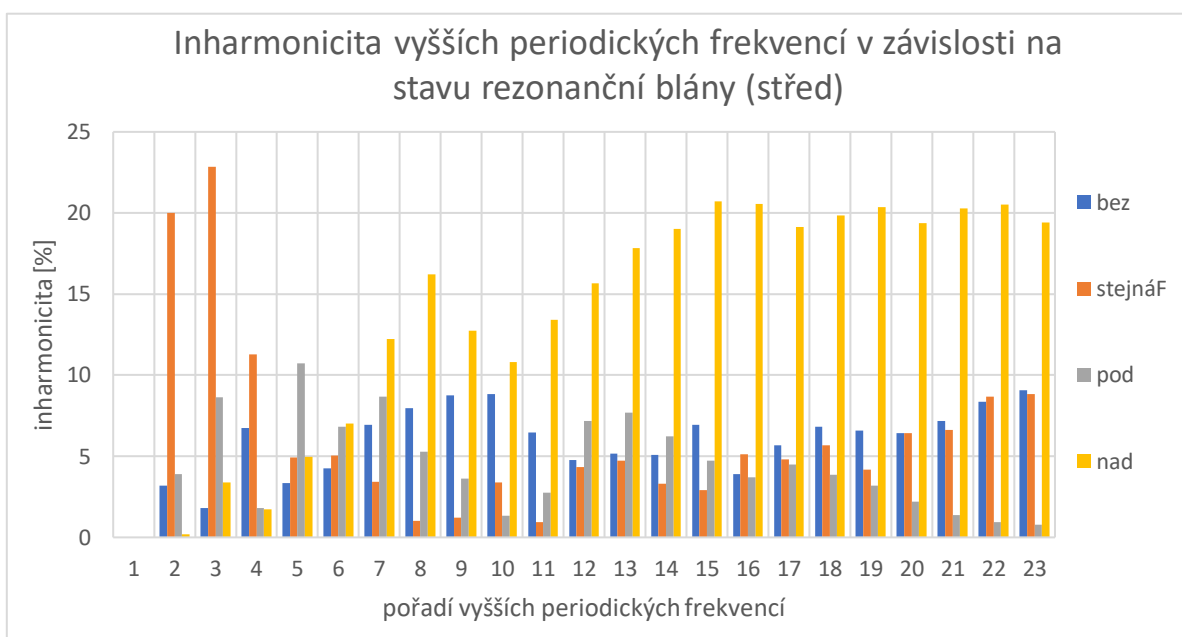
Obr. 4-16: Spektrogram tom-tomu (bez-a)



Obr. 4-17: Spektrogram tom-tomu (bez-b)



Obr. 4-18: Graf hlasitosti [Son] tom-tomu v závislosti na čase



Obr. 4-19: Graf inharmonicity periodických složek tom-tomu

Tab. 4.6: Naměřené hodnoty alikvótních složek tom-tomu (bez)

Harmonická [n]	tom2Bbezstred				
	frekvence [Hz]	poměr mezi 1. a n harmonickou	poměr mezi n a n+1 harmonickou	inharmonicitu [%]	Modul [dB]
1	102,0005	1,0000	1,0000	0,0000	48,4419
2	197,5010	1,9363	0,5165	3,1863	37,9154
3	300,5016	2,9461	0,6572	1,7974	48,3696
4	380,5020	3,7304	0,7898	6,7402	35,2109
5	493,0026	4,8333	0,7718	3,3333	35,3135
6	586,0031	5,7451	0,8413	4,2484	35,8377
7	664,5035	6,5147	0,8819	6,9328	28,0671
8	751,0039	7,3627	0,8848	7,9657	36,5065
9	837,5044	8,2108	0,8967	8,7691	27,4227
10	930,0048	9,1176	0,9005	8,8235	28,9775
11	1049,5055	10,2892	0,8861	6,4617	25,7207
12	1165,5061	11,4265	0,9005	4,7794	27,4260
13	1257,5065	12,3284	0,9268	5,1659	23,3473
14	1355,5071	13,2892	0,9277	5,0770	22,2205
15	1424,0074	13,9608	0,9519	6,9281	26,4502
16	1568,5082	15,3775	0,9079	3,8909	29,2350
17	1635,5085	16,0343	0,9590	5,6805	13,8306
18	1710,5089	16,7696	0,9562	6,8355	17,9309
19	1810,5094	17,7500	0,9448	6,5789	25,6766
20	1908,5099	18,7108	0,9487	6,4461	22,2521
21	1988,5104	19,4951	0,9598	7,1662	8,4371
22	2056,0107	20,1569	0,9672	8,3779	22,0952
23	2133,5111	20,9167	0,9637	9,0580	8,7342

Tab. 4.7: Naměřené hodnoty alikvótních složek tom-tomu (stejnaF)

tom2BstejnaFstred					
Harmonická [n]	frekvence [Hz]	poměr mezi 1. a n harmonickou	poměr mezi n a n+1 harmonickou	inharmonicitá [%]	Modul [dB]
1	87,5005	1,0000	1,0000	0,0000	52,7324
2	210,0011	2,4000	0,4167	20,0000	49,0477
3	322,5017	3,6857	0,6512	22,8571	41,2993
4	389,5020	4,4514	0,8280	11,2857	24,4281
5	459,0024	5,2457	0,8486	4,9143	34,3590
6	551,5029	6,3029	0,8323	5,0476	27,6402
7	633,5033	7,2400	0,8706	3,4286	29,4067
8	707,0037	8,0800	0,8960	1,0000	25,0205
9	778,0041	8,8914	0,9087	1,2063	17,3078
10	845,5044	9,6629	0,9202	3,3714	34,9154
11	971,5051	11,1029	0,8703	0,9351	31,9279
12	1095,5057	12,5200	0,8868	4,3333	25,1168
13	1191,5062	13,6171	0,9194	4,7473	20,0582
14	1265,5066	14,4629	0,9415	3,3061	23,1591
15	1350,5070	15,4343	0,9371	2,8952	23,3526
16	1471,5077	16,8171	0,9178	5,1071	20,9494
17	1559,0081	17,8171	0,9439	4,8067	33,3738
18	1664,5087	19,0229	0,9366	5,6825	25,1135
19	1732,0090	19,7943	0,9610	4,1805	22,0136
20	1862,5097	21,2857	0,9299	6,4286	23,5803
21	1959,0102	22,3886	0,9507	6,6122	24,4113
22	2092,0109	23,9086	0,9364	8,6753	19,3825
23	2190,5114	25,0343	0,9550	8,8447	23,7481

Základní frekvence tom-tomu je 102 Hz. Při attacku se ve spektru vyskytují frekvenční složky v rozmezí 100 až 7000 Hz. Složky vysokých frekvencí ztrácejí energii po 200 ms a dále se na barvě zvuku tom-tomu podílejí složky výhradně prvního pásma.

Dozvuk tom-tomu, s nezátíženou úderovou blánou a při úderu na střed, se pohybuje okolo 4,5 sekund a podílí se na něm zejména fundament, vyšší frekvenční složky ztrácejí svojí energii 2 sekundy po úderu.

Hlasitost naměřených vzorků se pohybovala v rozmezí 25 – 28 Sonů, pro vzorek úderu na kraj blány s nadladěnou rezonanční membránou dosahovala hodnota hlasitosti maximální hodnoty 32,6 Sonů.

Čím více je úder vedený k okraji blány, tím více nabírají vyšší periodické složky v prvním pásmu na intenzitě a zvyšuje se ostrost zvuku. Prodlužuje se také doba za kterou tyto složky ztrácí energii. Ostrost zvuku se směrem k okraji zvyšuje. Tónový charakter zvuku je při úderu na kraj blány výraznější než při úderu na střed blány.

Porovnáním tabulek a grafů je zjištěno, že palička tvrdosti 7A vytvářela ve spektru větší míru inharmonicity než palička 2B a 5B. Inharmonicitá periodických složek byla až o 10 % vyšší než u výše zmíněných paliček. Moduly vyšších periodických složek byly však u všech tří tvrdostí paliček srovnatelné.

Přidáním rezonanční blány a sladěním na stejnou frekvenci se změnila frekvence fundamentu na 87,5 Hz. Inharmonicitá periodických složek v prvním pásmu dosahovala při úderu na střed vyšších hodnot než u nezátížené blány. Druhá a třetí periodická složka dosahovala inharmonicity až 20 %, prodloužila se také energie této složky v čase. Blíže k okraji blány byla míra inharmonicity nižší.

Zvuk tom-tomu je se stejně laděnou rezonanční blánou více barevný než v případě nezatížené úderov. Vyniká rezonance korpusu a celého nástroje, druhá a třetí periodická složka podporuje tónový charakter nástroje. Úder ke kraji podporuje tón bubnu, zejména při dozvuku.

Podladění rezonanční blány snížilo frekvenci fundamentu na 83 Hz. Inharmonicitu periodických složek rostla při vedení úderů směrem k okraji blány. Frekvenční složky spektra v rozsahu 80–600 Hz ztrácejí svoji energii až po 1,2 sekundách, tom-tomu má tím pádem plnější barvu.

Nadladění rezonanční blány posunulo frekvenci fundamentu na hodnotu 122,5 Hz. Druhá periodická složka byla v tomto případě téměř harmonická. Při úderu na střed dosahovala inharmonicitu periodických složek ve druhém a třetím pásmu o 5 až 10 % vyšších hodnot než u ostatních ladění. Vedením úderu ke kraji blány se míra inharmonicity v těchto pásmech snižovala. Ostrost zvuku dosahovala nejvyšších hodnot při úderu na okraj blány a to 3,76 acum.

Zvuk při úderu na střed je méně průrazný, měkký a tupý, směrem k okraji blány je zvuk více průrazný, tónový charakter je zde zřetelnější. Na jeho barvě se nejvíce podílí prvních pět alikvótních složek.

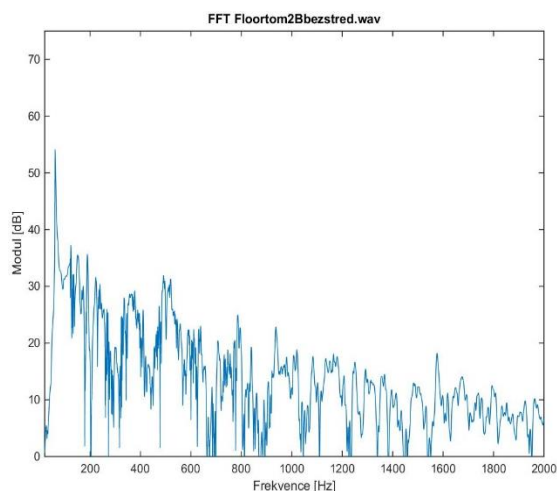
Během nahrávání také docházelo k rozladění úderové a rezonanční blány. Toto rozladění bylo zapříčiněno skutečností, že blány používané při měření byly nové. Neměli tak dostatečně dlouhou dobu na rozehrání. Ladička v tomto případě také ukazovala frekvenci až druhé periodické složky.

4.4 Spektrální analýza floor tomu

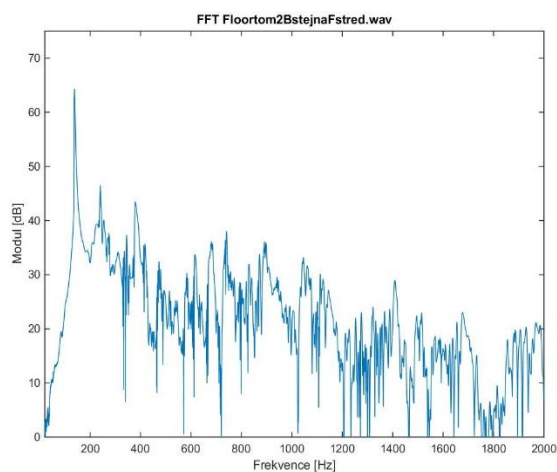
Čtvrtá podkapitola obsahuje výsledky spektrální analýzy floor tomu. Hráč se snažil opět dodržet výše uvedené požadavky na provedení úderů.

Závity pro šrouby, uchycující rezonanční blánu, byly přelepeny páskou kvůli eliminaci rušivých zvuků. Po přidělení rezonanční blány byla tato blána naladěna na stejnou frekvenci jako blána úderová, poté podladěna a následně nadladěna.

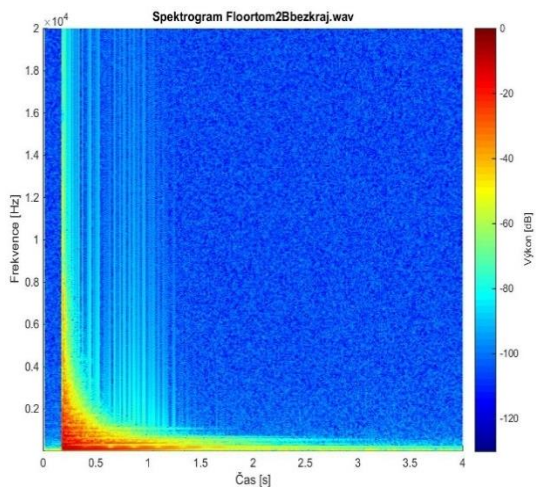
Součástí analýzy bylo generování a zpracování chladního obrazců.



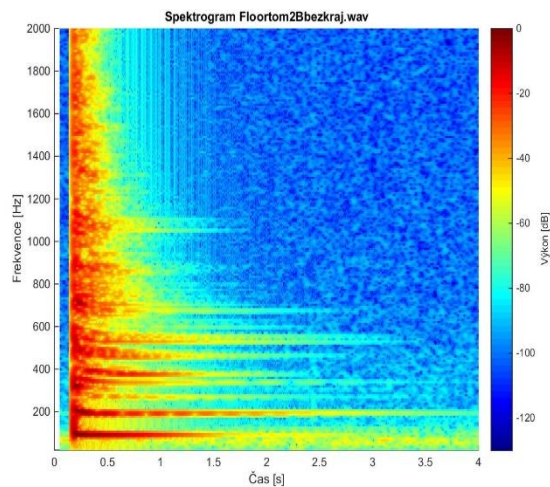
Obr. 4-20: FFT spektrum floor tomu (bez)



Obr. 4-21: FFT spektrum floor tomu (stejnaF)



Obr. 4-22: Spektrogram floor tomu (bez-a)



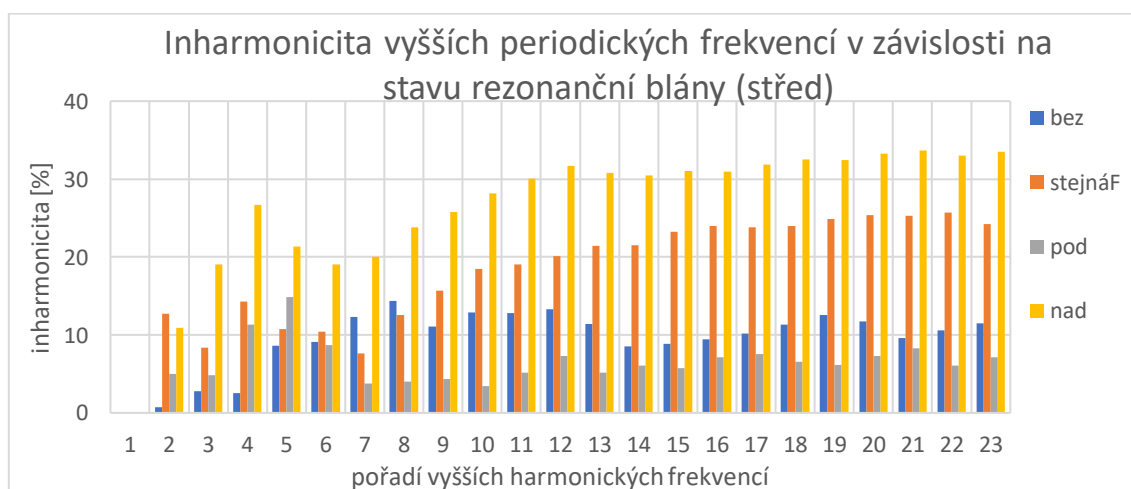
Obr. 4-23: Spektrogram floor tomu (bez-b)

Tab. 4.8: Naměřené hodnoty alikvótních složek floor tomu (bez)

	floortom2Bbezstred				
Harmonická [n]	frekvence [Hz]	poměr mezi 1. a n harmonickou	poměr mezi n a n+1 harmonickou	inharmonicitá [%]	Modul [dB]
1	87,6673	1,0000	1,0000	0,0000	54,1089
2	176,6680	2,0152	0,4962	0,7605	37,2641
3	270,3354	3,0837	0,6535	2,7883	35,6800
4	341,6692	3,8973	0,7912	2,5665	30,3951
5	400,6697	4,5703	0,8527	8,5932	18,6203
6	478,0036	5,4525	0,8382	9,1255	28,0196
7	538,3374	6,1407	0,8879	12,2759	29,2119
8	600,6712	6,8517	0,8962	14,3536	17,7234
9	701,3386	8,0000	0,8565	11,1111	31,9815
10	763,6724	8,7110	0,9184	12,8897	25,6826
11	841,0064	9,5932	0,9080	12,7895	22,3755
12	912,0069	10,4030	0,9221	13,3080	23,0238
13	1009,3410	11,5133	0,9036	11,4361	20,4185
14	1122,3418	12,8023	0,8993	8,5551	24,9584
15	1199,0091	13,6768	0,9361	8,8213	19,2787
16	1270,6763	14,4943	0,9436	9,4106	10,0051
17	1338,6768	15,2700	0,9492	10,1767	22,8695
18	1399,0106	15,9582	0,9569	11,3435	17,5389
19	1457,0110	16,6198	0,9602	12,5275	18,8474
20	1547,6784	17,6540	0,9414	11,7300	17,6566
21	1664,6792	18,9886	0,9297	9,5781	18,0985
22	1724,3464	19,6692	0,9654	10,5945	14,2611
23	1785,3468	20,3650	0,9658	11,4564	16,6601

Tab. 4.9: Naměřené hodnoty alikvótních složek floor tomu (stejnáF)

Harmonická [n]	floortom2BstejnáFstřed				
	frekvence [Hz]	poměr mezi 1. a n harmonickou	oměr mezi n a n+1 harmonicko	inharmonicitá [%]	Modul [dB]
1	108,6670	1,0000	1,0000	0,0000	64,2449
2	189,6673	1,7454	0,5729	12,7301	46,4755
3	298,6677	2,7485	0,6350	8,3845	43,4989
4	372,6680	3,4294	0,8014	14,2638	32,4684
5	485,0017	4,4632	0,7684	10,7362	33,7788
6	584,0020	5,3742	0,8305	10,4294	38,0104
7	702,6691	6,4663	0,8311	7,6249	36,1348
8	760,3360	6,9969	0,9242	12,5383	22,8590
9	824,3362	7,5859	0,9224	15,7123	33,1740
10	886,0031	8,1534	0,9304	18,4663	29,2057
11	967,3367	8,9018	0,9159	19,0742	19,9747
12	1042,0036	9,5890	0,9283	20,0920	24,0073
13	1110,3372	10,2178	0,9385	21,4016	28,9927
14	1194,0041	10,9877	0,9299	21,5162	22,9706
15	1251,3377	11,5153	0,9542	23,2311	18,2744
16	1322,3379	12,1687	0,9463	23,9456	23,0430
17	1407,6716	12,9540	0,9394	23,8001	6,5867
18	1486,6718	13,6810	0,9469	23,9945	19,8345
19	1551,6721	14,2791	0,9581	24,8466	21,2019
20	1621,3390	14,9202	0,9570	25,3988	14,9396
21	1704,6726	15,6871	0,9511	25,2994	11,1133
22	1776,3395	16,3466	0,9597	25,6972	19,9859
23	1893,0066	17,4202	0,9384	24,2598	10,2454



Obr. 4-24 Graf inharmonicity periodických složek floor tomu

Frekvence fundamentu floor tomu je 87,6 Hz v případě nezatížené úderové blány. Při attacku se ve spektru vyskytují frekvenci složky v rozmezí 80 až 5000 Hz. Složky vysokých frekvencí velmi rychle ztrácejí svoji intenzitu a na barvě zvuku se poté podílí složky prvního pásma vyšších periodických složek, zejména fundament a druhá periodická složka.

Dozvuk floor tomu, s nezatíženou úderovou blánou a při úderu na střed, se pohybuje okolo 3 sekund, vyšší frekvenční složky ztrácejí svojí energii sekundu po úderu. Naměřená hodnota hlasitosti byla 25,6 Sonů a hodnota ostrosti 3,16 acum.

Čím více je úder vedený k okraji blány, tím více nabírají vyšší periodické složky v prvním pásmu na intenzitě. Prodlužuje se také doba za kterou tyto složky ztrácejí energii a dochází ke snížení hlasitosti na 21,4 Sonů. Tónový charakter zvuku je zřetelnější a delší při úderu kraj blány než při úderu na střed blány, kdy zvuk floor tomu zní tupě.

Porovnáním tabulek a grafů je zjištěno, že palička tvrdosti 5B vytvářela ve spektru větší míru inharmonicity než palička 2B a 7A. Průměrná inharmonicity periodických složek byla v případě paličky 5B 12,7 %, palička 2B vykazovala průměrnou inharmonicitu 9,4 %, nejmenší míra průměrné inharmonicity byla dosažena paličkou 7A a její hodnota byla 6,9%. Moduly vyšších periodických složek byly však u všech tří tvrdostí paliček srovnatelné.

Přidáním rezonanční blány a sladěním na stejnou frekvenci se změnila frekvence fundamentu na 108,7 Hz. Inharmonicity periodických složek v prvním pásmu dosahovala při úderu na střed vyšších hodnot než u nezatížené blány, zejména pak ve druhém a třetím pásmu periodických složek. Jasnost zvuku se přidáním rezonanční blány zvyšuje. Blíže k okraji blány byla míra inharmonicity vyšší, a to i v prvním pásmu.

Zvuk floor tomu je se stejně laděnou rezonanční blánou jasnější než v případě nezatížené úderové blány. Tónový charakter zvuku je více intenzivní, prodlužuje se také dozvuk nástroje. Úder vedený blíže k okraji ztrácí při attacku mohutnost, naopak se více projevuje tónová složka při dozuku i přes větší míru inharmonicity periodických složek ve spektru. Ostrost zvuku klesla na 2,79 acum v případě úderu na střed a 2,53 acum v případě úderu na kraj blány.

Podladění rezonanční blány snížilo frekvenci fundamentu na 83,3 Hz. Inharmonicity periodických složek rostla při vedení úderů směrem k okraji blány. Průměrná inharmonicity však byla nejmenší ze všech vybraných ladění rezonanční blány a menší než v případě nezatížené úderové blány. Druhá periodická složka nabírá na intenzitě, směrem k okraji blány tato intenzita ještě více roste, zvyšuje se také počet alikvót podílejících se na barvě zvuku zejména v 1. pásmu.

Nadladění rezonanční blány posunulo frekvenci fundamentu na hodnotu 116 Hz. Inharmonicity periodických složek dosahovala při nadladění nad 30% a to zejména ve druhém a třetím pásmu. Druhá periodická složka se blíží svojí frekvencí směrem k fundamentu. Ostrost zvuku je při úderech směrem ke kraji vyšší než v případě úderů na střed. Nadladění rezonanční blány zvyšuje frekvenci spektrálního centroidu, zvyšuje se také frekvence spektrálního Roll-offu oproti nezatížené rezonanční bláně.

Zvuk při úderu na střed blány je měkký, více tupý a dozvuk kratší než při úderu k okraji. Na poslech je znatelná vyšší inharmonicity ve spektru, tónová složka bubnu zní více rozladěna.

4.4.1 Chladního obrazce

Součástí spektrální analýzy floor tomu bylo generování chladního obrazců, postup generování těchto obrazců je popsán v kapitole [3.5](#).

Tabulka 4.10 obsahuje změřené hodnoty vlnových délek jednotlivých útvarů vygenerovaných obrazců. Dále se v tabulce nachází poměry frekvencí n-tého obrazce ku prvnímu (základnímu) obrazci a poměry vlnových délek vůči prvnímu obrazci.

Tyto poměry pak byly porovnávány s frekvenčním spektrem měřeného floor .



Obr. 4-25: pod – 83,3 Hz



Obr. 4-26: pod – 170 Hz



Obr. 4-27: pod – 229 Hz



Obr. 4-28: pod – 236 Hz



Obr. 4-29: pod – 261 Hz



Obr. 4-30: pod – 294 H



Obr. 4-31: pod – 343 Hz



Obr. 4-32: pod – 426 Hz



Obr. 4-33: pod – 569 Hz



Obr. 4-34: pod – 603 Hz



Obr. 4-35: pod – 655 Hz



Obr. 4-36: bez – 651 Hz

Tab. 4.10: Naměřené hodnoty chladního obrazců

stav rezonanční blány:	POD					
Pořadí obrazce [n]	frekvence vybuzení [Hz]	vlnová délka λ osa x [cm]	vlnová délka λ osa y [cm]	Poměr vlnových délek (osa x)	Poměr vlnových délek (osa y)	Poměr frekvence vybuzení 1. a n-tého obrazce
1.	83,3	34	34	-	-	-
2.	170	31,5	16	1,0794	2,1250	2,041
-	170	30	15	1,1333	2,2222	-
3.	229	12	21	2,8333	1,6190	2,749
-	229	8	33	4,2500	1,0303	-
-	229	11	14	3,0909	2,4286	-
4.	236	13	14	2,6154	2,4286	2,833
-	236	15	14	2,2667	2,4286	-
-	236	13	13	2,6154	2,6154	-
-	236	14	15	2,4286	2,2667	-
5.	261	8	9	4,2500	3,7778	3,133
-	261	17	13	2,0000	2,6154	-
6.	294	11	14	3,0909	2,4286	3,529
-	294	10	12	3,4000	2,8333	-
-	294	10	12	3,4000	2,8333	-
-	294	11	9,5	3,0909	3,5789	-
-	294	10	10	3,4000	3,4000	-
-	294	9	15	3,7778	2,2667	-
7.	343	30	7,5	1,1333	4,5333	4,118
-	343	16	9	2,1250	3,7778	-
-	343	18	8,5	1,8889	4,0000	-
-	343	26	6,5	1,3077	5,2308	-
8.	426	6	6	5,6667	5,6667	5,114
-	426	18	6,5	1,8889	5,2308	-
-	426	13	7	2,6154	4,8571	-
-	426	14	6	2,4286	5,6667	-
9.	569	3	26	11,3333	1,3077	6,831
-	569	3	9	11,3333	3,7778	-
-	569	6	4	5,6667	8,5000	-
-	569	6	7	5,6667	4,8571	-
-	569	17	10	2,0000	3,4000	-
-	569	3	10	11,3333	3,4000	-
-	569	5	5	6,8000	6,8000	-
-	569	7	4	4,8571	8,5000	-
-	569	7	3	4,8571	11,3333	-
-	569	3,5	16	9,7143	2,1250	-
-	569	3	9	11,3333	3,7778	-
10.	603	5	4	6,8000	8,5000	7,239
-	603	18	4	1,8889	8,5000	-
-	603	14	4	2,4286	8,5000	-
-	603	10	4,5	3,4000	7,5556	-
-	603	11	4	3,0909	8,5000	-
-	603	16	4	2,1250	8,5000	-
11.	655	3	17	11,3333	2,0000	7,863
-	655	4	4	8,5000	8,5000	-
-	655	5	5,5	6,8000	6,1818	-
-	655	5	4	6,8000	8,5000	-
-	655	19	5	1,7895	6,8000	-
-	655	18	3	1,8889	11,3333	-
-	655	5	5	6,8000	6,8000	-
-	655	4,5	4,5	7,5556	7,5556	-
-	655	5,5	12	6,1818	2,8333	-

Vyobrazením chladního obrazců bylo experimentálně ověřeno a dokázána přítomnost jednotlivých kruhových a radiálních módů kmitající membrány. Vygenerované obrazce utvářely útvary odpovídající teoretickým předpokladům z kapitoly 2.1. Jednotlivé módy odpovídají tvarem, frekvenční poměry rezonančních módů však vykazují odchylky.

Kmitání membrány je na rozdíl od kmitů ideální kruhové membrány ovlivněno velkou řadou faktorů. Jedním z nich je například napětí blány, které není vždy rovnoměrné po celém jejím obvodu, což ovlivňuje rychlost šíření zvuku v bláně a šíření energie.

První (základní) obrazec odpovídá fundamentu spektra. Při porovnání tabulek s naměřenými hodnotami jednotlivých alikvótních složek bubnů a tabulkou 4.11 zjišťujeme, že vygenerované obrazce odpovídají svojí frekvencí vybuzení a frekvenčním poměrem (s odchylkou ± 10 Hz) právě vyšším periodickým složkám spektra.

Dále byly pomocí metru změřeny velikosti jednotlivých útvarů obrazce. Velikost těchto útvarů byla měřena mezi jednotlivými uzlovými čarami.

Útvary druhého obrazce rozdělují úderovou blánu v jejím středu. Tyto útvary, pro buben s nezatiženou blánou, mají velikost 16 a 15 cm, poměr velikostí útvarů je 2,125 a 2,222 vůči prvnímu obrazci, průměr těchto poměrů pak vychází 2,174. Z tabulky 4.11 je patrné, že tento poměr vlnových délek se velice blíží poměru frekvencí mezi prvním a druhým obrazcem

Tab. 4.11: Porovnání chladního obrazců a alikvótních složek

Chladního obrazce (pod)	frekvence [Hz]	poměr	FFT spektrum (pod) alikvóty	frekvence [Hz]	poměr
1.	83,3	-	1.	83,3	-
2.	170	2,041	2.	175,0	2,100
3.	229	2,749	3.	238,0	2,856
4.	236	2,833	4.	295,7	3,548
5.	261	3,133	5.	354,7	4,256
6.	294	3,529	6.	456,3	5,476
7.	343	4,118	7.	561,3	6,736
8.	426	5,114	8.	640,0	7,680
9.	569	6,831	9.	717,3	8,608
10.	603	7,239	10.	804,3	9,652
11.	655	7,863	11.	869,0	10,428

V tabulce 4.11 jsou porovnávány poměry obrazců s poměry alikvótních složek měřeného floor tomu. Zde jsou pomocí barevného rozlišení přiřazeny obrazce k alikvótním složkám.

. Z vygenerovaných obrazců a hodnot v tabulce 4.10 je patrné, že první rezonanční mód silně podporuje fundament, zatímco například devátý vygenerovaný obrazec podporuje jedenáct alikvótních složek ve spektru. Nelze tedy říct, že by tento mód podporoval pouze devátou alikvótní složku.

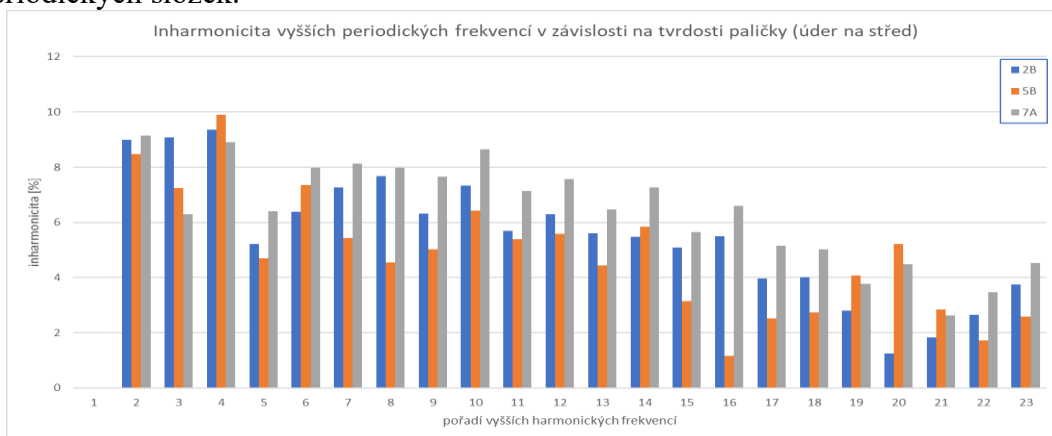
Následně byl pomocí sluchu zkoumán tónový charakter radiálních módů a hlukový charakter módů kruhových. Tento test byl proveden na vzorku *floortom2Bpodstred.wav*. Pomocí filtru typu pásmová propust byly ze vstupního signálu filtrovány frekvence odpovídající frekvenci vybuzení jednotlivých obrazců.

Pro frekvenci 170 Hz byl slyšet jasně zřetelný barevný tón s dozvukem trvajícím tři sekundy. Na frekvencích 236 a 294 Hz, které odpovídají frekvenci dalších radiálních módů byl také slyšet zvuk tónového charakteru. Tón už však nebyl tak čistý a výrazný. Na frekvencích 261 a 426 Hz byl naopak zvuk tupý a dutý, tónová složka zvuku byla nevýrazná. Na frekvenci 655 Hz, která odpovídá budící frekvenci obrazce s velmi rozmanitými útvary, byl zvuk hlukového charakteru. Tento zvuk byl podobný zvuku tupého úderu či rány, bez jakéhokoliv náznaku tónu.

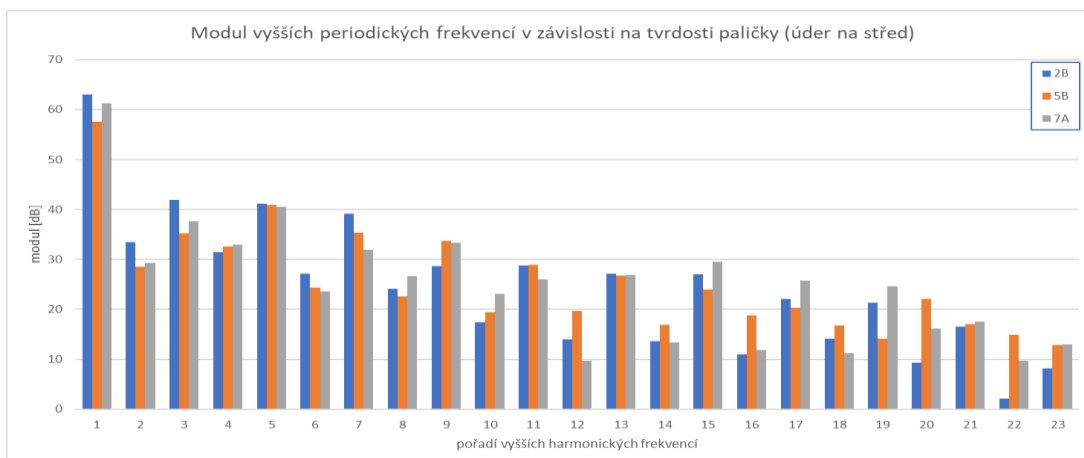
4.5 Vliv tvrdosti paliček na spektrum

Tato podkapitola obsahuje vyhodnocení vlivu tvrdosti paliček na spektrum bubně. Porovnáním naměřených hodnot z tabulek lze vyčíst, že tvrdost paličky má vliv na spektrum a inharmonicitu bubnu, tento vliv však není tak významný jako v případě místa úderu či ladění rezonanční blány.

Moduly jednotlivých periodických složek jsou srovnatelné u měřených bubně pro všechny tři tvrdosti použitých paliček. Rozdíly jsou znatelné právě v inharmonicitě periodických složek.



Obr. 4-37: Graf inharmonicit v závislosti na tvrdosti paličky (malý buben)



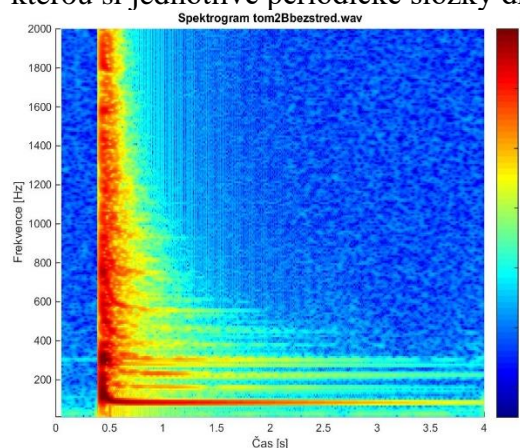
Obr. 4-38: Graf modulů periodických složek v závislosti na tvrdosti paličky (malý buben)

Největší rozdíl v inharmonicitě spektra vykazovala palička 7A při měření tom-tomu, kdy inharmonicitu vyšších periodických složek byla ve srovnání s ostatními paličkami až o 10–20 % vyšší. Takto velký rozdíl však mohl být zapříčiněn i chybným provedením úderu (místo úderu, úhel dopadu paličky). U měřených vzorků velkého bubnu způsobovala palička 7A vyšší inharmonicitu (5–10 %) zejména ve druhém pásmu periodických složek. U vzorků floor tomu byla naopak inharmonicitu periodických složek s použitím paličky 7A nejmenší. V tomto případě byla inharmonicitu ve druhém pásmu periodických složek vyšší o 5–10 % při použití paličky 5B. Tento rozdíl může být zapříčiněn nylonovou špičkou paličky. Pro vzorky malého bubnu jsou inharmonicity ve spektru, s malými odchylkami, stejné pro všechny tři tvrdosti použitých paliček.

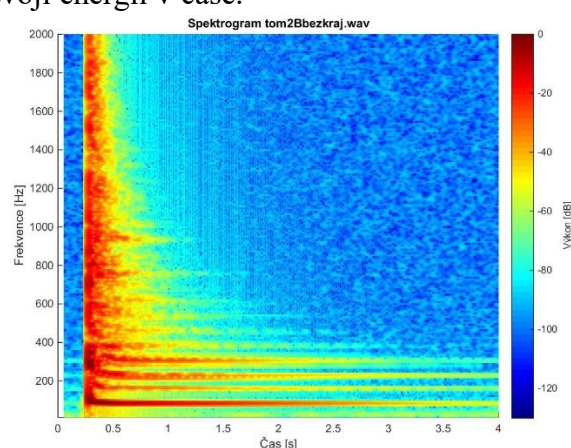
Po zvukové stránce nelze samotným poslechem určit, která z paliček byla pro úder použita.

4.6 Vliv místa úderu na spektrum

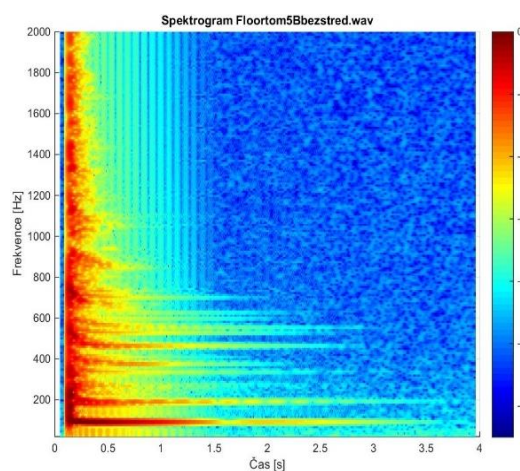
Tato podkapitola obsahuje vyhodnocení vlivu místa úderu na spektrum měřených bubnů. Z naměřených výsledků lze říct, že místo úderu má zásadní vliv na spektrum, jelikož místo úderu ovlivňuje inharmonicitu, rezonanční módy blány a také dobu, po kterou si jednotlivé periodické složky drží svoji energii v čase.



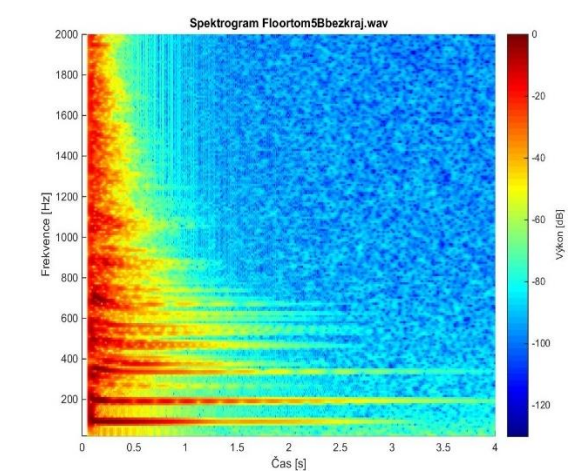
Obr. 4-39: Spektrogram Tom-tom (střed)



Obr. 4-40: Spektrogram Tom-tom (kraj)



Obr. 4-41: Spektrogram Floortomu (střed)



Obr. 4-42: Spektrogram Floortomu (kraj)

Z výše vyobrazených spektrogramů Tom-tomu a Floortomu jsou jasně patrné rozdíly ve spektru při vedení úderu paličkou na různá místa rezonanční blány.

Úder vedený na střed blány produkuje zvuk tupý, tlumený, spíše hlukového charakteru a dozvuk samotného nástroje je kratší. Lze potvrdit, že úder do středu blány generuje více kruhových módů, jelikož právě tyto módy na bláně jsou více tlumeny oproti módům radiálním. Toto tvrzení lze potvrdit vyobrazenými spektrogramy, kde vidíme, že energie periodických složek druhého a zejména prvního pásma klesá rychleji při úderu na střed blány.

Úder vedený na okraj blány produkuje zvuk více barevný s jasnější tónovou složkou a delším dozvukem. Periodické složky prvního pásma, které se přímo podílí na barvě zvuku drží děle svoji energii v čase. Právě díky těmto složkám dokážeme více vnímat tónovou složku nástroje. Lze proto potvrdit, že úder vedený k okraji úderové blány podporují více radiální rezonanční módy. Úder vedený na okraj

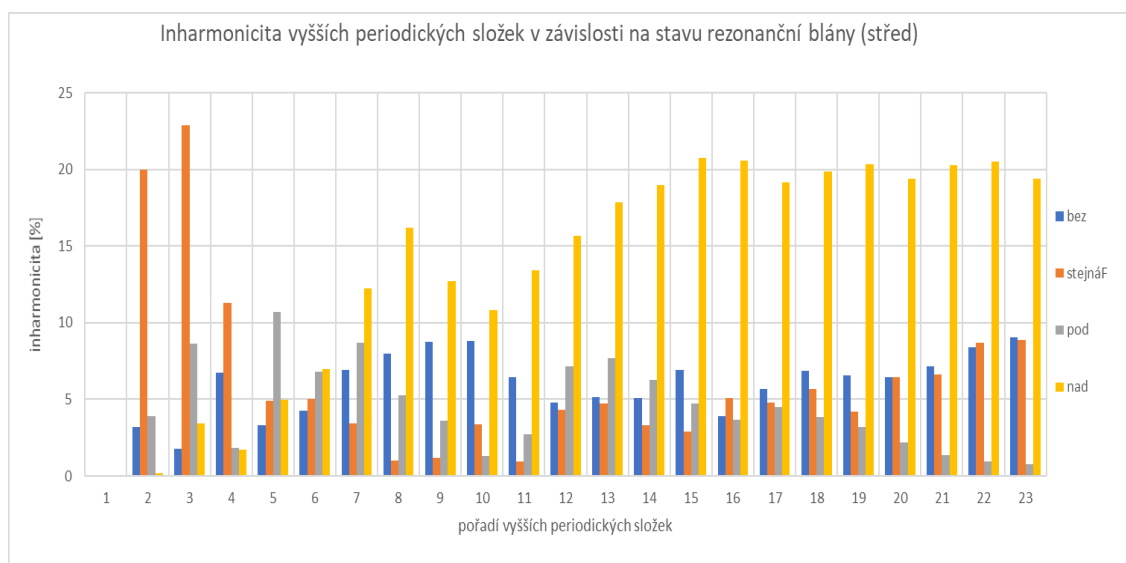
Posledním zkoumaným místem úderu byla polovina poloměru membrány. Tónová složka zvuku je zde patrnější než při úderu na střed, ne však tolik jako při úderu na okraj. Stejně tak je tomu i v případě dozvuku nástroje a energie vyšších periodických složek.

Průměrná inharmonicitu periodických složek dosahovala vyšších nebo stejných hodnot, v případě floortomu, při úderu na kraj než při úderu na střed. Frekvenční poměry těchto složek, při úderu na kraj, se však v některých případech více blížily poměrům harmonické řady.

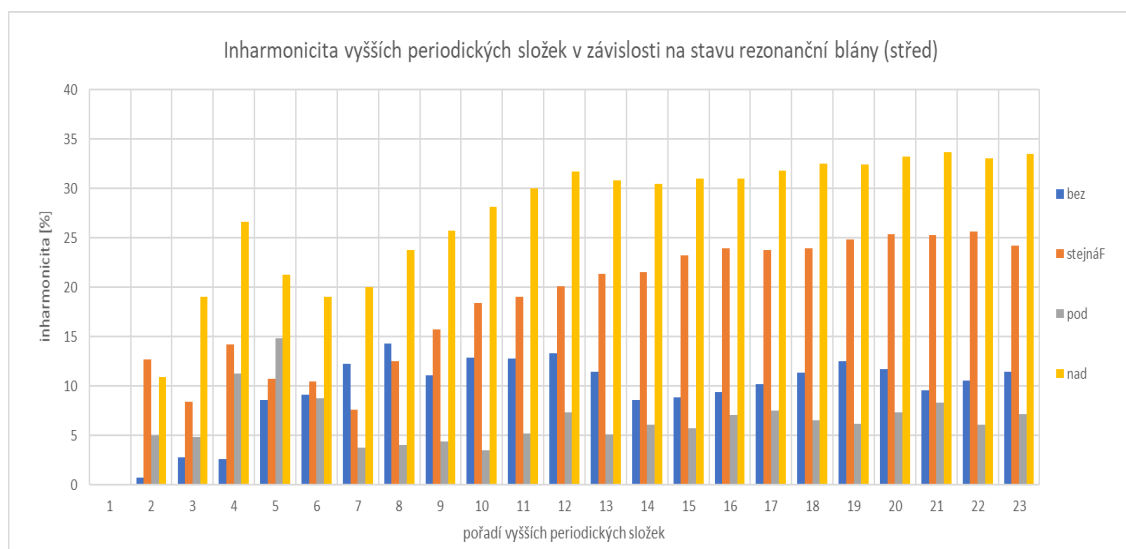
Uvedené změny spektra v závislosti na místě úderu byly prokázány i u vzorků malého bubnu.

4.7 Vliv ladění rezonanční blány na spektrum

Tato podkapitola obsahuje vyhodnocení vlivu různého ladění rezonanční blány na spektrum měřených bubnů. Z výsledků měření je patrné, že rezonanční blána má vliv na inharmonicitu periodických složek, barvu zvuku a dozvuk nástroje. Rezananční blánou lze ovlivnit také frekvenci fundamentu.



Obr. 4-43: Graf inharmonicit periodických složek (tom-tom)



Obr. 4-44: Graf inharmonicit periodických složek (floortom)

Na obrázku 4-41 a 4-42 jsou vyobrazeny naměřené inharmonicity vyšších periodických složek. Z těchto hodnot lze vyčíst, jaký vliv má ladění blány na inharmonicitu spektra.

Porovnáním spektrogramů je zjištěno, že přidáním rezonanční blány jsou posíleny frekvenční složky prvního a druhého pásma, zejména druhá periodická složka, a prodlužuje se doba po kterou si tyto složky drží energii o 250-350 milisekund než v případě nezátížené blány. Proto zní zvuk s přidanou rezonanční blánou více barevně. U všech měřených bubnů docházelo ke zvýšení frekvence fundamentu a také ke zvýšení jasnosti.

V případě sladění rezonanční blány na stejnou frekvenci jako blána úderová docházelo ve spektru k navýšení inharmonicit o 5-10 % pro vzorky floortomu a malého bubnu, o 6-8 % se navýšila inharmonicit velkého bubnu ve druhém pásmu složek a tento nárůst inharmonicity vykazovala i druhá periodická složka. Inharmonicit spektra tom-tomu narůstala pouze u druhé a třetí periodické složky, ostatní složky měli hodnotu menší nebo srovnatelnou se vzorky s nezátíženou blánou. Tónová složka je výraznější.

Podladění rezonanční blány naopak snížilo inharmonicitu periodických složek. Naměřené hodnoty ukazují, že hodnoty inharmonicity ve spektru byly dokonce menší než v případě vzorků s nezátíženou blánou. Podladění rezonanční blány mělo za příčinu snížení frekvence fundamentu.

Nadladění rezonanční blány způsobovalo navýšení inharmonicity a to až o 20 % více než s nezátíženou rezonanční blánou. Toto navýšení se projevilo u malého bubnu a floortomu v celém spektru, u vzorků tom-tomu docházelo k navýšení až od druhého pásma složek. U vzorků tom-tomu a malého bubnu byla hodnota inharmonicity druhé periodické složky minimální v porovnání s ostatním laděním rezonanční blány. Nadladění blány zvyšovalo frekvenci fundamentu, tónová složka zvuku je výraznější a jasnější.

5. ZÁVĚR

V úvodu bakalářské práce byly popsány jednotlivé bubny bicí soupravy z pohledu organologie. Další část úvodní kapitoly popisovala anatomii paliček pro hru na bicí nástroje a blány, které se používají na bicí nástroje.

Kapitola dvě obsahuje základní definici zvukového signálu, popis vzniku zvuku u membranofonů a popis metod používaných pro analýzu zvukového spektra.

Třetí kapitola podrobně popisuje postup při nahrávání jednotlivých vzorků společně s technikou, která byla pro nahrávání použita. Pro lepší orientaci ve vyhodnocování vzorků nechybí ani část věnována jejich označení. Dále je zde popsán postup při generování chladního obrazců. Nedílnou součástí této kapitoly je výpis požadavků kladených na hráče během nahrávání.

Z naměřených a vyhodnocených vzorků lze usoudit, že měření proběhlo v pořádku a výsledky s menšími odchylkami odpovídají teoretickým předpokladům. Během měření však došlo k několika chybám, zapříčiněním lidského faktoru. Nejčastější chybou bylo nedodržení stejné dynamiky úderu pro všechny vzorky. Úder na střed blány byl občas trochu silnější než údery k okraji blány. Tato chyba byla způsobena tím, že se hráč více soustředil na místo úderu než na dynamiku. S největší pravděpodobností nebylo vždy přesně dodrženo ani místo úderu. Další chybou, která mohla ovlivnit měření bylo nedokonalé, nerovnoměrné naladění blan.

Ve čtvrté kapitole dochází k vyhodnocení naměřených vzorků a porovnání výsledků měření. Z výsledků je patrné, že membranofony vzhledem k povaze oscilátoru generují zvuk bohatý na inharmonicitu. Inharmonicitu vyšších periodických složek je typickým znakem spektra bicích a perkusivních nástrojů.

První část obsahuje výsledky analyzuje spektrum jednotlivých měřených bubnů z bicí soupravy. Zde jsou popsány základní charakteristiky spektra, jeho časového průběhu, frekvenčního rozložení a psychoakustické veličiny. Pro měřený floortom jsou v této části vyobrazeny a prozkoumány i chladního obrazce, kterými byl potvrzen vznik kruhových a radiálních rezonančních módů na bláně bubnu. Pomocí poslechu byl zkoumán tónový charakter radiálních módů a hlukový charakter módů kruhových. Tyto obrazce pak byly dány do souvislosti s frekvenčním spektrem bubnu.

Další částí je vyhodnocení výsledků pro zkoumání vlivu tvrdosti paliček na spektrum bubnů. V této části bylo zjištěno, že tvrdost použitých paliček nemá až tak zásadní vliv na výsledný zvuk. Větší odchylky inharmonicit paliček byly s největší pravděpodobností zapříčiněny chybou měření.

Třetí část obsahuje vyhodnocení vlivu místa úderu na spektrum bubnu. Místo úderu ve velké míře ovlivňuje, zda bude mít zvuk bubnu spíše hlukový charakter či tónový charakter. V této části je potvrzený teoretický předpoklad, že údery na střed blány generují kruhové módy, zatímco údery k okraji blány generují více módů radiální neboli dortové.

Poslední částí této kapitoly je zkoumání vlivu různého ladění rezonanční blány na spektrum. Rezonanční blána ovlivňuje barvu a výsledný zvuk. Pomocí rezonanční blány můžeme také ovlivnit základní frekvenci nástroje a dobu dozvuku.

Z naměřených hodnot je patrné, že vypsané hodnoty frekvencí ladění v kapitole [3.1](#) neodpovídají výsledkům analýzy. Ladička byla použita pro orientační účely, zejména pro sladění frekvencí úderové a rezonanční blány.

Cílem této bakalářské práce bylo změřit, analyzovat a popsat spektra bubnů z bicí soupravy.

5.1 Doporučení

Pro navázání pokračující práce na zadané téma bych doporučoval hlubší rozbor materiálů využívajících se pro výrobu bubnů, jejich vlastností a vliv na výsledné spektrum zvuku. Prohloubení teorie šíření energie na bláně.

K eliminaci chyb způsobených hráčem by bylo vhodné použít robotické rameno, které by provádělo údery vždy na stejné místo, ve stejné dynamice a pod stejným úhlem.

Paličky použité k měření bych zvolil tak, aby byla jejich tvrdost více odlišná, například použít filcové paličky určené pro hru na tympány. Pro zajímavost by bylo vhodné použít i metličky.

K analýze spektra bych doporučoval pomocí LPC analýzy zobrazení a vypočítání formantových oblastí bubnu.

Posledním doporučením je provedení simulace kmitání pevně uchycené kruhové membrány a porovnání naměřených výsledků s teoretickými předpoklady a s průběhem simulace.

Literatura

- [1] KOTEK, Miroslav. Bicí nástroje. Praha: Panton, 1983.
- [2] Drums. In: *Bicí Drum Set Pozadí - Fotografie zdarma na Pixabay* [online]. USA, 2018 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://pixabay.com/cs/photos/bic%C3%AD-drum-set-pozad%C3%AD-hudba-n%C3%A1stroj-3109364/>
- [3] REKTOŘÍK, Bořivoj. Anatomie paličky. R - *stick bubenické paličky* [online]. Velký Beranov, 2014 [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: <http://www.rstick.com/cs/content/95-cz-anatomie-palicky>
- [4] REKTOŘÍK, Bořivoj. Špičky paliček. R - *stick bubenické paličky* [online]. Velký Beranov, 2014 [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: <http://www.rstick.com/cs/content/96-cz-hlavicky-palicek-spicky>
- [5] REKTOŘÍK, Bořivoj. Materiály. R - *stick bubenické paličky* [online]. Velký Beranov, 2014 [cit. 2019-10-21]. Dostupné z: <http://www.rstick.com/cs/content/31-cz-materialy-pouzivane-k-vyrobe-palicek>
- [6] AZZARTO, Fran. What You Need to Know About...Drumheads. MODERN DRUMMER [online]. Fairfield, 2010 [cit. 2019-10-24]. Dostupné z: <https://www.moderndrummer.com/2011/10/what-you-need-to-know-about-drumheads/>
- [7] SMÉKAL, Z. Analýza signálů a soustav-BASS. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [8] SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. Praha: Akademie múzických umění, 2003. Akustická knihovna (Akademie múzických umění v Praze. Hudební fakulta. Zvukové studio). ISBN 80-733-1901-2.
- [9] ŠEBESTÍK, Bohdan. Postupy při výrobě bicích nástrojů firmy Hanuš&Heřt [Methods for the production of percussion company Hanus&Hert]. Brno: Janáčkova akademie múzických umění v Brně, Hudební fakulta, Katedra bicích nástrojů, rok 2011. [80 s.] Vedoucí diplomové práce odb. as. Kamil Slezák
- [10] Zvukové vlny (cs) [online]. CZ: neznámé, neznámé [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studis/student.phtml?gm=gm_detail_predmetu&apid=184541
- [11] Spectrogram using short-time Fourier transform - MATLAB spectrogram. *Spectrogram using short-time Fourier transform - MATLAB spectrogram* [online]. USA: neznámé, c1994-2019 [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/spectrogram.html>
- [12] Fast Fourier transform - MATLAB fft. *Fast Fourier transform - MATLAB fft* [online]. USA: neznámé, c1994-2019 [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>
- [13] HOFFMAN, Pavel. Analýza spektra a směrovosti xylofonu, vibrafonu a zvonkohry [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/118127>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.
- [14] Posuzování elektromagnetického hluku pohonu psychoakustickými veličinami: Usage of psychoacoustic quantities for assesment of electromagnetic noise of drive [online]. Plzeň, CZ, 2017 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/28813>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.

- [15] SUCHÁNEK, Tomáš. Analýza spektra klarinetů od různých výrobců. Brno, Rok, 76 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.
- [16] Perceived loudness of acoustic signal. Perceived loudness of acoustic signal - MATLAB acousticLoudness [online]. USA, c1994-2020 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/audio/ref/acousticloudness.html?s_tid=blogs_rc_4
- [17] Perceived sharpness of acoustic signal. *Perceived sharpness of acoustic signal* - MATLAB acousticSharpness [online]. USA, c1994-2020 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/audio/ref/acousticsharpness.html>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Obsah CD

Příloha 1 - Obsah CD

Příložené CD s přílohami obsahuje:

- Nahrané vzorky ve formátu .wav ve složce ./ VZORKY
- Spektrogramy ve složce ./ SPEKTROGRAMY
- FFT spektra ve složce ./ FFT
- Časové průběhy vzorků ve složce ./ ČASOVÉ PRŮBĚHY
- Tabulky naměřených hodnot a grafy ve složce ./ TABULKY
- Programy vytvořené v aplikaci MATLAB ve složce ./ MATLAB