



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 RŮZNÝCH TYPŮ SAXOFONŮ

THE SPECTRUM ANALYSIS OF DIFFERENT TYPES OF SAXOPHONES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Barbora Greiplová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

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

Studentka: Barbora Greiplová

ID: 219965

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Analýza spektra různých typů saxofonů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Změřte a vyhodnoťte vybrané tóny hrané na různé saxofony stejným hráčem. Vyhodnoťte i barvu generovanou v různé dynamice. Porovnejte spektra – zastoupení harmonických složek a jejich intenzitu i složek neharmonických. Identifikujte a porovnejte formantové oblasti. Rovněž porovnejte směrové vyzařování nástrojů. Zvláštní pozornost věnujte neharmonickým složkám, jejich poloze a charakteru.

Výstupem budou komparační tabulky spekter, zvláště porovnání těžiště, šikmosti, špičatosti či plochosti, rozložení energie ve spektru a kumulativního průběhu v čase. Navrhněte i způsob srovnávání směrovosti. Získaná data dejte do souvislosti s polohou a typem saxofonu i do souvislosti s psychoakustickými veličinami při vnímání barvy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

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

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

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 zvukem tří typů saxofonů Yamaha, konkrétně soprán, alt a tenor saxofonu. Uvádí základní parametry nástroje, jak tvoří tón a čím je typický. Zaměřuje se na charakteristiky v jeho tónu pomocí spektrální analýzy, LPC analýzy a směrových charakteristik. Práce se zaměřuje na společné vlastnosti saxofonů jako nástroje, hledá také odlišnosti mezi zvolenými typy saxofonů i mezi jednotlivými tóny. Výsledky jsou porovnány v grafech, tabulkách i slovním hodnocením.

KLÍČOVÁ SLOVA

Saxofon, Analýza spektra, Směrové charakteristiky, Spektrum, LPC, Psychoakustika, Inharmonicita, Fourierova transformace, Formanty

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the sound of three types of Yamaha saxophones, specifically soprano, alto and tenor saxophone. Lists the basic parameters of the instrument, how it forms the tone and how it is typical. It focuses on characteristics in its tone using spectral analysis, LPC analysis and directional characteristics. The work focuses on the common properties of saxophones as instruments, it also looks for differences between selected types of saxophones and between individual tones. The results are compared in graphs, tables and verbal evaluation.

KEYWORDS

Saxophone, Spectrum analysis, Directivity pattern, Spectrum, LPC, Psychoacoustics, Inharmonicity, Fourier transform, Formants

GREIPLOVÁ, Barbora. *Analýza spektra různých typů saxofonů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 67 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Barbora Greiplová
VUT ID autora: 219965
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečné práce: Analýza spektra různých typů saxofonů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

podpis autorky*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce panu MgA. Mgr. Onřejí Jiráskovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	19
1 Charakteristika saxofonu	21
1.1 Historie nástroje	21
1.2 Konstrukce	21
1.2.1 Soprán saxofon	22
1.2.2 Alt saxofon	23
1.2.3 Tenor saxofon	24
1.3 Rozsah	25
1.4 Vznik tónu	26
1.5 LPC	26
1.6 Spektrum	27
1.7 Barva	27
2 Realizace a průběh měření	29
2.1 Metody měření	29
2.2 Volba tónů	31
3 Analýza získaných signálů	33
3.1 Zpracování v MATLABu	33
3.2 Porovnání frekvenčních spekter – stejný tón na různé saxofony	34
3.2.1 Znějící tón C4 – 261 Hz	35
3.2.2 Znějící tón A4 – 440 Hz	36
3.3 Porovnání frekvenčních spekter – dva různé tóny na stejný saxofon .	39
3.3.1 Spektra tónů soprán saxofonu	39
3.3.2 Spektra tónů alt saxofonu	40
3.3.3 Spektra tónů tenor saxofonu	40
3.4 Porovnání grafů LPC analýzy	45
3.5 Porovnání spektrogramů	49
3.6 Porovnání grafů směrového vyzařování	50
3.7 Porovnání inharmonicit a ostrosti	58
3.7.1 Inharmonicity	58
3.7.2 Ostrost	62
Závěr	63
Literatura	65

A Elektronické přílohy	67
A.1 MATLAB	67
A.2 Audio	67
A.3 Tabulky a grafy	67

Seznam obrázků

1.1	Tvar hubice saxofonu (převzato z [2])	22
1.2	Soprán saxofon	22
1.3	Alt saxofon	23
1.4	Tenor saxofon	24
1.5	Rozsah saxofonů (převzato z ([1])	25
1.6	Prstoklad (převzato z ([3])	25
1.7	Šíření vlny uvnitř saxofonu (převzato z [7])	26
2.1	Schéma rozestavení mikrofonů při nahrávání	30
3.1	Soprán – spektrum tónu C4	35
3.2	Alt – spektrum tónu C4	35
3.3	Tenor – spektrum tónu C4	36
3.4	Soprán – spektrum tónu A4	36
3.5	Alt – spektrum tónu A4	37
3.6	Tenor – spektrum tónu A4	37
3.7	Závislost polohy tónu v rozsahu na pořadí nejsilnější harm. složky	38
3.8	Soprán – spektrum tónů G5 a C6	39
3.9	Alt – spektrum tónů E3 a F5	40
3.10	Tenor – spektrum tónů H2 a F3	40
3.11	LPC analýza sopránu – tóny C4, A4, G5 a C6	45
3.12	LPC analýza altu – tóny E3, C4, A4 a F5	46
3.13	LPC analýza tenoru – tóny H2, F3, C4 a A4	47
3.14	Porovnání LPC – tón C4 a A4	48
3.15	Spektrogramy soprán, alt a tenor saxofonu	49
3.16	Soprán – směrovost tónu C4	51
3.17	Soprán – směrovost tónu A4	51
3.18	Soprán – směrovost tónu G5	52
3.19	Soprán – směrovost tónu C6	52
3.20	Alt – směrovost tónu E3	53
3.21	Alt – směrovost tónu C4	53
3.22	Alt – směrovost tónu A4	54
3.23	Alt – směrovost tónu F5	54
3.24	Tenor – směrovost tónu H2	55
3.25	Tenor – směrovost tónu F3	55
3.26	Tenor – směrovost tónu C4	56
3.27	Tenor – směrovost tónu A4	56

Seznam tabulek

3.1	Porovnání harmonických složek sopránu	41
3.2	Porovnání harmonických složek alt	42
3.3	Porovnání harmonických složek tenor	43
3.4	Inharmonicity soprán	58
3.5	Inharmonicity alt	59
3.6	Inharmonicity tenor	60
3.7	Ostrost	62

Úvod

Každý typ saxofonu, který známe je ve své konstrukci v něčem jiný. Dokonce není výjimkou, že i stejné typy jsou jinak konstrukčně řešeny. Saxofon je poměrně mladý nástroj a tudíž nemá rozsáhlejší historický vývoj jeho zkoumání v porovnání s klasickými nástroji.

V této práci byly prozkoumány 3 typy saxofonů, a to sopránový, altový a tenorový. Všechny 3 nástroje jsou stejné značky (Yamaha) a liší se typicky délkou, šířkou a zahnutím trubice. Tyto aspekty se promítají do frekvenčních spekter nástrojů, jejich směrové charakteristiky a v neposlední řadě taktéž do barvy.

V první části je uvedena historie vzniku nástroje a jeho konstrukční charakteristiky. Jsou zde také popsány jednotlivé části nástroje. Přiblížen je rozsah všech nástrojů společně s používanými hmaty. Také je nastíněn vznik tónu. Nechybí ani zmínka o používaném termínu akustické spektrum doplněný o popis typické barvy saxofonů. Část druhá se věnuje měření a sběru vzorků k porovnání. Je zde zmíněn způsob snímání všech třech měřených saxofonů pro účely spektrální analýzy. Dále také způsob měření směrového vyzařování každého z nástrojů v horizontální ose. Důležitá zde byla i volba tónů pro měření, aby byly rovnoměrně pokryty rozsahy jednotlivých nástrojů.

Třetí část je věnována zpracování analýz z naměřených vzorků. Na úvod je stručně vysvětlen postup implementace v MATLABu. Jako první je zpracována analýza spekter jednotlivých typů saxofonů. Tóny jsou porovnány jak v rámci jednoho nástroje, tak i nástroje mezi sebou. Spektrální analýza je doplněna o výstupy v tabulkách. Následně je ke spektrům dodána LPC analýza a její výsledky. Dále v práci nalezneme porovnání spektrogramů každého z nástrojů a analýza směrovosti jejich vyzařování. Výsledky jsou zobrazeny a porovnány v grafech s polárními souřadnicemi. Jako poslední jsou porovnány hodnoty inharmonicit nalezených v nahraných tónech společně s výsledky vypočítané ostrosti zvuku.

V závěru jsou poté shrnuty dosažené výsledky.

1 Charakteristika saxofonu

1.1 Historie nástroje

Saxofon byl vynalezen roku 1840 Adolfem Saxem. Patent na něj získal až o 6 let později roku 1846. Jeho záměr byl propojit ovladatelnost dřevěných dechových nástrojů s průrazností nástrojů žesťových. Už ze začátku bylo vytvořeno několik typů a velikostí v různých laděních. Nástroj se nejprve rozšířil ve vojenských kapelách, později se stal velmi populární v Jazzu. V klasické hudbě nijak výrazně neprorazil. Saxofon je velmi variabilní nástroj. Jeho dynamický rozsah je největší ze všech dřevěných dechových nástrojů. Je považován za velmi expresivní nástroj s podobnými tónovými možnostmi jako lidský hlas. Proto není divu, že je hojně využíván v jazzu jako sólový nástroj. Je to nástroj velmi variabilní, jak z hlediska obratnosti ve hraní složitých melodií, tak z hlediska zvukových možností řízených nátiskem. Velmi časté využití je také v big bandech, ve kterých bývá zařazena celá saxofonová sekce. [1] [2]

1.2 Konstrukce

Saxofony jsou dnes vyráběny z mosazi. Na povrchu jsou pak pokovovány nebo nalakovány. Trubice je kónického tvaru. Změna tónu je prováděna zavíráním a otevíráním klapek pomocí mechanik vedených po těle nástroje.

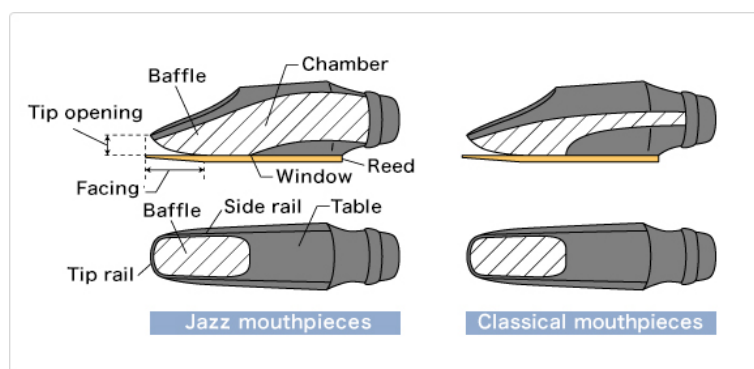
Saxofon se skládá z těchto částí:

1. *Plátek*: Vyráběn ze třtiny. Jeho tloušťka je velmi malá. Pro správné rozkmitání je potřeba jej před hrou navlhčit.
2. *Strojek*: Jeho pomocí je plátek uchycen k hubici. Může být kovový či kožený.
3. *Hubice*: Nejčastější materiály jsou ebonit, plast a kov. Existují různé tvary jak vnitřního vrtání, tak i vnější schránky. Mají různé využití v klasické hudbě (užší vrtání) nebo v jazzu (širší vrtání).
4. *Eso*: U sopránových saxofonů je většinou vynecháno. Je to část spojující hubici s tělem pomocí korkové vložky. U tenorů má typický tvar „labutího krku“, který lze vidět na obr. 1.4.
5. *Tělo*: Na těle jsou vyvrtány otvory různých průměrů, čím níž otvor na těle je, tím větší průměr má. Tělo je osazeno spletíým systémem mechanik, které propojují klapky, jejich počet se pohybuje v rozmezí 21 – 23. Ke každému otvoru je přiřazena klapka, některé jsou v základní konfiguraci otevřené a při hře se zavírají, jiné jsou zavřené a naopak se otevírají. [1]

1.2.1 Soprán saxofon

Typ: *Yamaha YSS 475 (Ladění B)*.

Sopranové saxofony jsou většinou laděné v B. To znamená, že když hraje hráč tón B na saxofonu, zní tón C, tedy zní o velkou sekundu níže než v notovém zápise. Tyto saxofony bývají většinou rovné, bez zahnutí těla na konci. Jelikož je jejich trubice nejkratší a nejužší, zní jeho tóny nejvýš. Na délku (bez hubice) nástroj měří 64,4 cm. V krku pod hubicí je jeho vnitřní průměr 0,9. Naopak jeho roztrub (zakončení) má vnitřní průměr 5,2 cm. Největší vrtaný otvor je o průměru 3,2 cm.



Obr. 1.1: Tvar hubice saxofonu (převzato z [2])



Obr. 1.2: Soprán saxofon

1.2.2 Alt saxofon

Typ: *Yamaha YAS 280 (Ladění Es)*.

Altové saxofony jsou nejběžnější nástroje pro učení začátečníků v uměleckých školách. Jsou většinou laděné v Es. To znamená, že pokud hráč hraje tón Es, zní tón C1, tedy zní o velkou sextu níže než je psáno v notovém zápise. Tělo nástroje je na konci zahnuté (obr. 1.3). Jeho trubice je delší než u sopránového, tudíž je zahnutí hlavně z důvodu pohodlí a mobility při hraní. Délka alt saxofonu, myšleno délka trubice, činí 107,8 cm. V místě přechodu hubice na eso je vnitřní průměr trubice 1,2 cm. Na roztrubu byl naměřen vnitřní průměr trubice 7,9 cm. Vrtaný otvor na roztrubu má průměr 4,1 cm.



Obr. 1.3: Alt saxofon

1.2.3 Tenor saxofon

Typ: *Yamaha YTS 280 (Ladění B)*.

Tenorové saxofony jsou také velmi běžné, hlavně mezi profesionálními hudebníky v Jazzu. Jsou většinou laděné v B, tedy stejně jako u soprán saxofonu, ale díky svým rozměrům zní o oktávu níž. Tvarem je velmi podobný alt saxofonu, a proto je mnoho lidí snadno zamění. Lehce se však dají rozlišit například tvarem esa, které je popsáno výše v této kapitole a vidíme jej na obrázku 1.4. Z porovnávaných saxofonů je nejdelší, délka jeho trubice je 138 cm. V nejužší části u hubice má průměr 1,2 cm. Nejširší část u roztrubu má 10 cm. Průměr největšího vrtaného otvoru byl změřen na 4,3 cm. Všechny uvedené rozměry jsou měřeny ručně, tudíž je možná odchylka $\pm 0,1$ cm.



Obr. 1.4: Tenor saxofon

1.3 Rozsah

Díky rozdílným laděním nástrojů lze notový zápis psát pro všechny stejně, ale na každý z nástrojů bude notový part znít jinak. Prstoklady jsou na všechny typy stejné, takže pro hráče není problém přecházet z jednoho na druhý. Na obr. 1.5 můžeme vidět rozsah od *Bb* po *F3*, respektive *Fis3*. Tyto dva horní tóny jsou uvedeny z toho důvodu, že některé starší saxofony nedisponují přídatnou klapkou pro *Fis3*, novější už však ano. Tento rozsah pokryjí základní hmaty při použití klapek. Pokročilejšími technikami hry, například nátiskem, se však dá dosáhnout rozsahu širšího směrem do vyšších poloh.



Obr. 1.5: Rozsah saxofonů (převzato z ([1]))

E♭ ALTO SAXOPHONE FINGERING CHART

○ = open
● = pressed down

When more than one fingering is shown, the first is the most commonly used. Additional fingerings, known as "alternate" fingerings, are used in certain situations to allow for better technique.

A detailed fingering chart for the E♭ alto saxophone. It consists of five rows of notes, each with a musical staff showing the note and a diagram of the saxophone keys with dots indicating fingerings. The notes are: Row 1: A#, Bb, B, Cb, B#, C, C#, Db, D, D#, Eb, E, Fb, F; Row 2: F#, Gb, G, G#, Ab, A, A#, Bb; Row 3: B, Cb, B#, C, C#, Db, D, D#, Eb, E, Fb, F; Row 4: F#, Gb, G, G#, Ab, A, A#, Bb, B, Cb; Row 5: B#, C, C#, Db, D, D#, Eb, E, Fb, F. The diagrams show various fingerings for each note, including alternate fingerings for some notes like Bb, B, Cb, C, C#, Db, D, D#, Eb, E, Fb, F, Gb, G, G#, Ab, A, A#, Bb, B, Cb.

Obr. 1.6: Prstoklad (převzato z ([3]))

1.4 Vznik tónu

Saxofon se řadí mezi jednoplátkové dřevěné dechové nástroje. Tón vzniká velmi podobně jako na klarinetu. Hubice a plátek jsou připevněny k sobě a tvoří mezi sebou úzkou štěrbinu. Plátek je lehce přitisknut rty hráče a do štěrbiny je vháněn proud vzduchu. Ten rozvibruje plátek (pasivní oscilátor). Vzniká rezonující vzdušný sloupec. Tímto kmitáním se vytvářejí zvukové vlny. Mezi zajímavé jevy u hudebních nástrojů patří tzv. „přefouknutí“. Zvýšením tlaku vháněného vzduchu se vír vzduchu rozpadne např. na dva, tím zazní vyšší harmonická. U nástrojů s kuželovým vrtáním, kterým je právě saxofon, je to 2. harmonická.

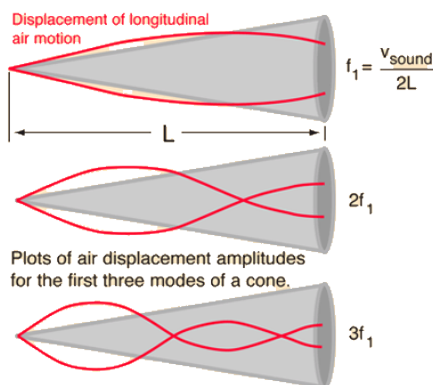
Trubice saxofonu je kónického tvaru, tudíž vlna, která se v něm šíří se rozpíná a její amplituda klesá. Z fyzikálního hlediska se jedná o polouzavřenou trubici. Z těchto dvou informací vyplývá následující vztah pro délku vlny:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad (1.1)$$

kde L je délka trubice a n je celé číslo. Frekvence se poté rovná:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1.2)$$

kde v je rychlost vlny a λ je délka vlny. Nejdelsí vlnovou délku má tedy nejhlubší možný tón. [4] [5] [6]



Obr. 1.7: Šíření vlny uvnitř saxofonu (převzato z [7])

1.5 LPC

Zkratka pojmu *Linear predictive coding*. Jedná se o „kódovací algoritmus ztrátové komprese pro zajištění reprezentace spektrální obálky“. Nejčastěji se používá k zobrazení obálky ve spektru signálu řeči. V našem případě lze díky LPC identifikovat formatové oblasti v tónu saxofonu. [8]

1.6 Spektrum

Slovo spektrum může mít mnoho významů. V tomto případě hovoříme o akustickém spektru. Jde o zobrazení frekvencí (osa x), které obsahuje audio signál v závislosti na jejich amplitudě (osa y). Vynáší se zde tedy kmitočty v Hz nebo kHz a hladinu zvuku v dB. Akustické spektrum získáme převedením časového signálu pomocí Fourierovy transformace. Tu vymyslel matematik J.B. Fourier na základě zjištění, že zvuk se skládá z několika frekvenčních složek a lze jej rozdělit na řadu těchto harmonických frekvencí. Jsou to zpravidla násobky první harmonické složky. Máme několik druhů akustických spekter, nejčastější jsou čárové (diskrétní) a spojitě. Diskrétní má podobu spektrálních čar, které leží na určité frekvenci a dosahují různých amplitud. Spojité spektrum je křivka, spojující amplitudy jednotlivých frekvencí. [9]

Spojitého spektra dosáhneme Fourierovou transformací signálu $s(t)$ [10], jejíž vztah je následující:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1.3)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (1.4)$$

Pro Fourierovu transformaci diskrétního signálu, tedy signálu digitálně zaznamenaného se vztah nepatrně liší a to následovně:

$$\tilde{S}(e^{-j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s[n]e^{-j\omega n} \quad (1.5)$$

1.7 Barva

Sinusový signál je signál jen jedné frekvenci, ten se ale v přírodě nevyskytuje, dá se vytvořit synteticky. Hudební nástroje jsou složeny z několika frekvencí, jejichž výšky a poměry mají vliv na barvu nástroje. Můžeme je dělit na sudé a liché. Lze tvrdit, že výrazná 2. a 4. harmonická dělá tón nástroje jasnější a pronikavější. Oproti tomu 3. harmonická má největší vliv na barvu – dodává mu dutost a hrdelnost. 5. a 7. se dále podílí na jasnosti a bohatosti tónu. Další vyšší harmonické přidávají drsnost a barevný ráz. Barva tónu saxofonu je díky plnému spektru dosti průrazná. Frekvenční spektrum, právě díky kuželovému vrtání trubice, obsahuje výrazné jak liché tak sudé harmonické. To všechno se projevuje v typické barvě zvuku saxofonu. Nedílnou součástí barvy zvuku dechových nástrojů obecně jsou šumové složky, způsobené právě dechem. U nahrávání lze též identifikovat zvuky mechaniky klapek, to ale není pravidlem. Též dynamika má vliv na výslednou barvu nástroje. Často můžeme při vyšší dynamice zaznamenat pokles úrovně 1. harmonické a nárůst vyšších harmonických. [4] [5]

2 Realizace a průběh měření

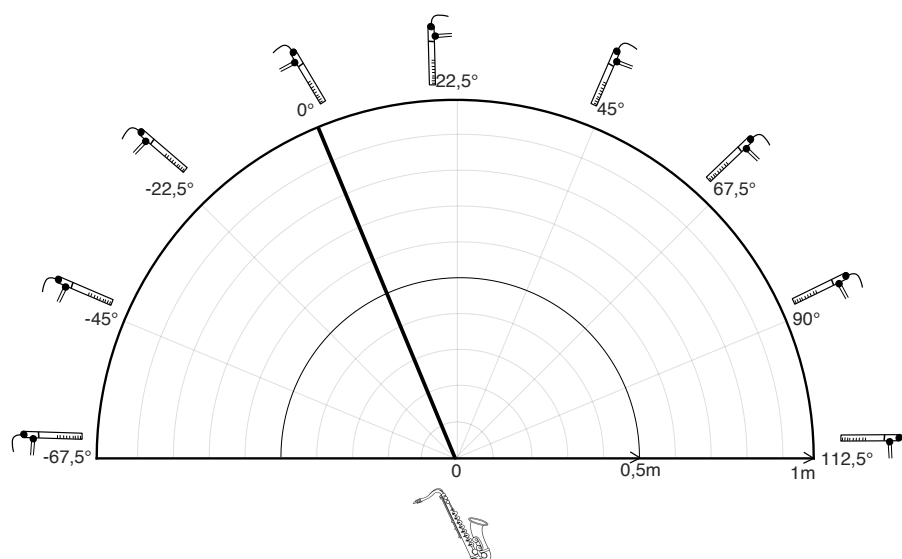
Měření probíhalo v bezodrazové komoře v budově D Vysokého učení technického v Brně. Komora byla zvolena z důvodu minimalizace odrazů zvukových vln, které by zneřesnily následné výsledky.

2.1 Metody měření

1. Analýza spektra: Vzorky na spektrální analýzu byly nahrávány na mikrofon BrüelKjær 4189, který byl umístěn ve středu půlkruhu mikrofonů používaných, na měření směrovosti. Jeho parametry jsou následující:
 - Frekvenční rozsah: $6,3 \text{ Hz} - 20 \text{ kHz}$
 - Citlivost: 50 mV/Pa
 - Dynamický rozsah: $14,6 - 146 \text{ dB}$
 - Typ: Prepolarizovaný kondenzátor

2. Analýza směrovosti nástroje: Vzorky pro analýzu směrovosti byly nahrávány na 9 mikrofonů typu AUDIX TM1. Jejich parametry jsou následující:
 - Frekvenční rozsah: $20 \text{ Hz} - 25 \text{ kHz} \pm 2 \text{ dB}$
 - Impedance: 200Ω
 - Citlivost: $6 \text{ mV/Pa} \pm 3 \text{ dB}$
 - Max. SPL: $130 \text{ dB} < 1\%$ zkreslení
 - Typ: Prepolarizovaný kondenzátor

Mikrofony byly rozestavěny kolem hráče do půlkruhu o poloměru 1 m. Tato vzdálenost byla zvolena s ohledem na prostorové možnosti komory a též s ohledem na případné využití výsledků pro ozvučování saxofonů. Pokud by to místnost umožňovala, bylo by vhodné zvolit i větší vzdálenost a minimalizovat ruchy způsobené například pusou hráče. Mikrofony byly umístěny na stojanech ve výšce 1,2 m, aby dosahovaly do výšky poloviny nástroje při hře ve stoje. Zvolen byl jeden hráč, aby byl nátlak na všechny nástroje co nejvíce stejný. Hráč byl při hraní čelem proti čtvrtému mikrofону zleva. Tento směr byl zvolen z důvodu předpokladu silnějšího vyzařování do pravé strany díky převážnému vrtání otvorů klapky z pravé strany nástroje. Na schématu je tučně zvýrazněna osa, ve které hráč stál při nahrávání.



Obr. 2.1: Schéma rozestavení mikrofónů při nahrávání

2.2 Volba tónů

1. *Soprán saxofon*: Rozsah 208 – 1245 Hz
 - Znějící C4 – 261 Hz (Psané D1)
 - Znějící A4 – 440 Hz (Psané H1)
 - Znějící G5 – 783 Hz (Psané A2)
 - Znějící C6 – 1047 Hz (Psané D3)
2. *Alt saxofon*: Rozsah 139 – 831 Hz
 - Znějící E3 – 164 Hz (Psané Cis1)
 - Znějící C4 – 261 Hz (Psané A1)
 - Znějící A4 – 440 Hz (Psané Fis2)
 - Znějící F5 – 698 Hz (Psané D3)
3. *Tenor saxofon*: Rozsah 104 – 622 Hz
 - Znějící H2 – 123 Hz (Psané Cis1)
 - Znějící F3 – 174 Hz (Psané G1)
 - Znějící C4 – 261 Hz (Psané D2)
 - Znějící A4 – 440 Hz (Psané H2)

Kvůli různému ladění saxofonů oproti klasičtějším nástrojům musíme rozlišovat značení tónů znějících a psaných. Psané tóny jsou takové, které jsou zapsány v notovém zápisu pro saxofon, jejich zvuk však odpovídá tónu znějícímu. Pro jednotnost a přehlednost mezi jednotlivými typy saxofonů v této bakalářské práci bylo zvoleno označení znějících tónů, případně jejich ekvivalentní předpokládaná frekvence v Hz.

Tóny o těchto frekvencích byly zvoleny s ohledem na rozsahy nástrojů, tzn. aby byl co nejvíce pokryt celý rozsah každého nástroje. Dva ze čtyř tónů hrané na každý nástroj jsou stejně znějící pro všechny z nich, aby bylo možné je přímo porovnat. Pokud má nástroj psaný tón shodný s dalším nástrojem, jsou tóny hrány stejným hmatem. Nahrány byly několika sekundové vzorky tónů v dynamice *forte* a poté v dynamice *piano*. Téměř pro všechny následné analýzy byly použity vzorky v dynamice *forte*, díky následnému lepšímu rozpoznání vyšších harmonických složek. Vzorky v dynamice *piano* jsou použity pouze na porovnání ostrosti v kapitole 3.7.

3 Analýza získaných signálů

3.1 Zpracování v MATLABu

Ke zpracování zvukových vzorků byl použit program MATLAB, verze R2021b pro macOS, a jeho toolbox *Signal analyzer*. Je třeba zmínit, že některé syntaxe se od použití na Windows liší.

Pro účely porovnání směrových charakteristik byly vytvořeny čtyři skripty ve složce *AudioSmer*, které se postupně spouští v pomocném skriptu *main.m*. Ve skriptu *nacteniZvukovehoZaznamu.m* zadáváme cestu ke zvukovému souboru a poté je signál načten pomocí příkazu `audioread` ve formátu `.wav`. Vzorkovací frekvence je uložena do proměnné `fs`. Tato informace nám říká, kolik vzorků bylo zaznamenáno a jak rychle. Díky toolboxu *Signal analyzer* je získána proměnná `signal_ROI` s časovým průběhem signálu, ten je následně převeden do spektra. To vše provádí skript *zpracovaniZvukovehoZaznamu.m*. V tomto skriptu jsou také vyhledány hodnoty amplitud harmonických složek pomocí příkazu `findpeaks`. Dále jsou upraveny zobrazované osy. Na ose y je zobrazena amplituda v dB (pomocí příkazu `pow2dB`). Na ose x je zobrazena frekvence a převedena na logaritmické měřítko (pomocí příkazu `semilogx`). [11]

Pokud chceme spektrum načtených signálů zkontrolovat, použijeme skript *vykresleniPeaku.m*. Pro konečné zobrazení polárních grafů však použijeme skript *vykreselniPolarPlotu.m*. Hodnoty amplitud 1. harmonických ze všech 9 měřících mikrofonů jsou uloženy do proměnné `rho`. Do proměnné `theta` jsou pak vypsány (pomocí příkazu `linespace`) velikosti úhlů, ve kterých byly mikrofony rozestavěny. Tyto proměnné byly poté vyneseny do polárních grafů pomocí příkazu `polarplot`. Celý řetězec skriptů se spustí zavoláním skriptu *main.m* a vepsáním požadovaných parametrů. Jako příklad lze uvést `main('ZvukoveZaznamy/Alt/Ton_440/',400)`, kde voláme tón o frekvenci 440 Hz hraný na alt a chceme aby rozdíl mezi vrcholy byl minimálně 400 Hz.

K porovnání spekter nahraných tónů byly vytvořeny dva skripty ve složce *AudioAnalyza*. Skript *Audioanalysis.m* načítá pomocí proměnných vygenerovaných *Signal analyzerem* vybraný vzorek. Je potřeba jen vepsat cestu do složky *Zvuk* a vybrat jaký nástroj a tón chceme. Poté spustíme skript *Peakanalysis.m*. Ten již vykreslí spektrum do grafu.

Zde je ukázka ze skriptu `zpracovaniZvukovehoZaznamu.m`:

```
frequencyLimits = [0 24000]; % Hz
%Signal Processing Toolbox
signal_ROI = signal(:);
startTime = 0; % seconds
timeValues = startTime + (0:length(signal_ROI)-1) ./ fs;
signal_ROI = timetable(seconds(timeValues(:)), signal_ROI, ...
    'VariableNames', {'Data'});

[Psignal_ROI, Fsignal_ROI] = pspectrum(signal_ROI, ...
    'FrequencyLimits', frequencyLimits);
```

Proměnné vytvořené ve skriptech pro zobrazení spekter využijeme následně i pro LPC analýzu. Ta se spouští ve skriptu `LPCAn.m`. Zde se musí pro každý tón upravit koeficienty a a b . Ty určují jak má být výsledná obálka „ostrá“ a jak má být nad signálem vysoko.

Poslední skript ve složce *AudioAnalyza* je `OstrostSax.m`. Ten pracuje nezávisle na předchozích zmíněných skriptech. Načítá postupně všechny vzorky ze složek *Zvuk/forte* a *Zvuk/piano*, u všech pak pomocí funkce `acousticSharpness` vypočítá ostrost a hodnoty uloží do proměnných `audioF` a `audioP`.

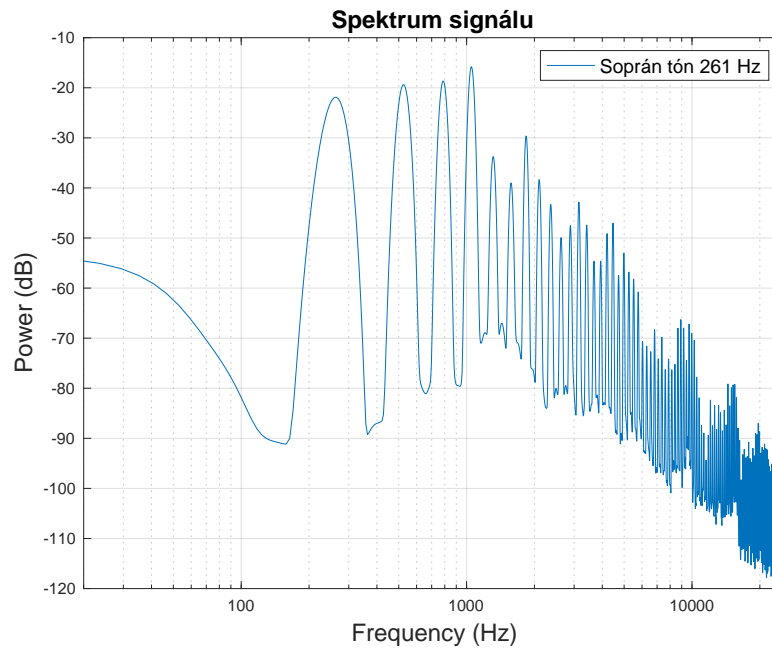
3.2 Porovnání frekvenčních spekter – stejný tón na různé saxofony

Na začátku je důležité zmínit, že pro analýzu byla ze všech nahraných vzorků vyseknuta pouze sekundová část. Vzorky tak získaly stejnou délku a také se díky tomu eliminovaly nechtěné zákmity při možném nečistém nasazení tónu hráčem či neúplném zakončení hraného tónu.

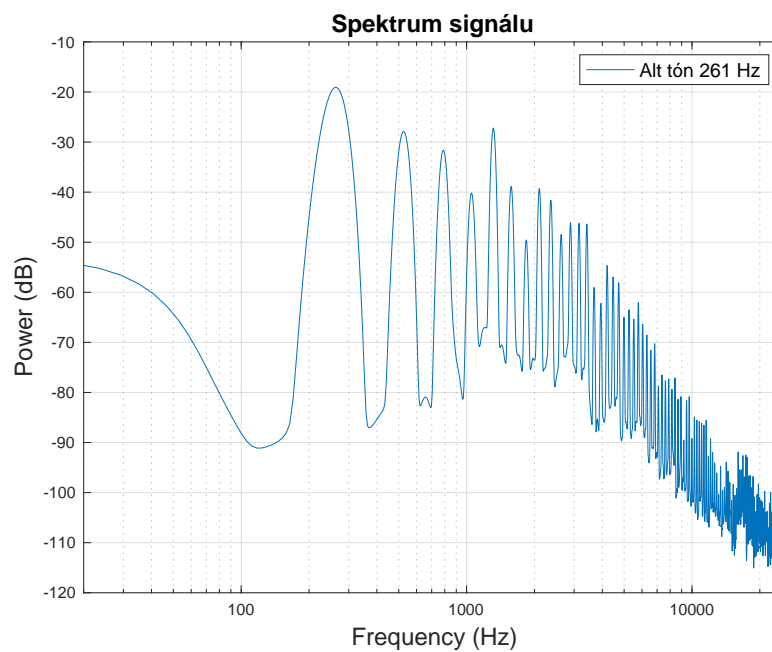
Pro porovnání stejně znějících tónů na všechny tři nástroje byly zvoleny dva tóny a to C_4 a A_4 . Tyto tóny byly zvoleny s ohledem na společný rozsah všech tří nástrojů. Navíc tón A_4 , známé jako komorní A , je považován za jakýsi referenční tón při ladění nástrojů. Pro porovnání jsou zobrazeny grafy frekvenčních spekter nahraných tónů. Dále jsou zde vloženy komparační tabulky pro přehledné zobrazení porovnávaných hodnot.

Ve spektrech můžeme vidět harmonické složky nahraného tónu ve frekvenčním rozsahu 20 Hz – 24 kHz. Z takového spektra můžeme vyčíst jaké frekvence se v tónu nacházejí a jak jsou silné. Důležité je si také všimnout jaké jsou poměry amplitud frekvenčních složek mezi sebou.

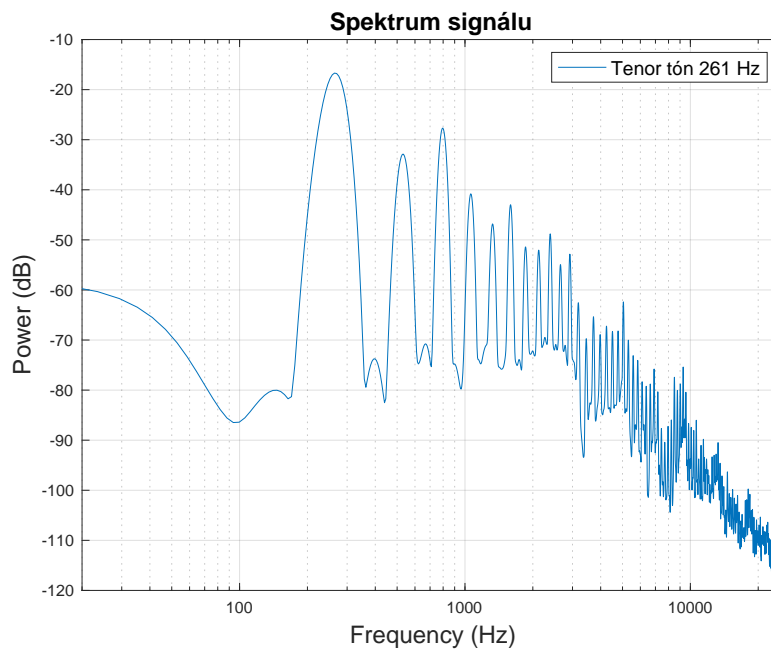
3.2.1 Znějící tón C4 – 261 Hz



Obr. 3.1: Soprán – spektrum tónu C4

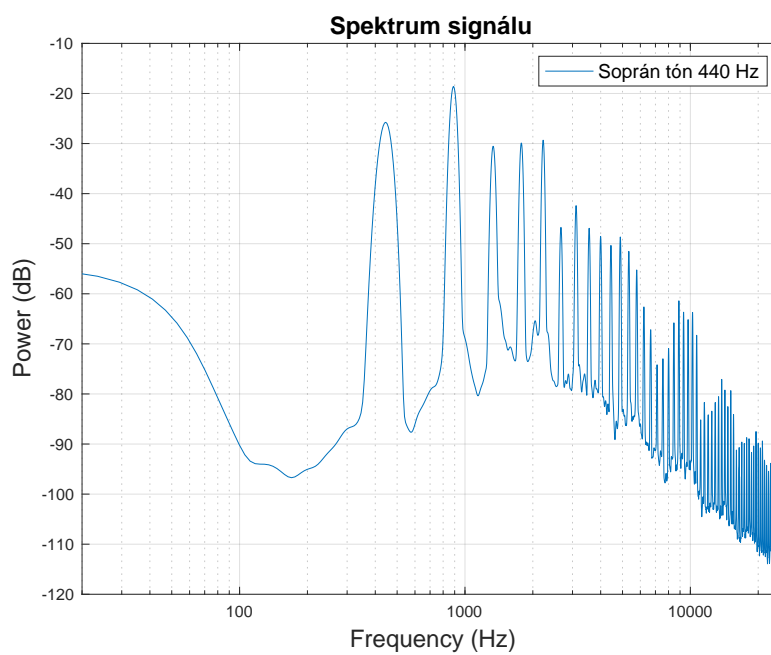


Obr. 3.2: Alt – spektrum tónu C4

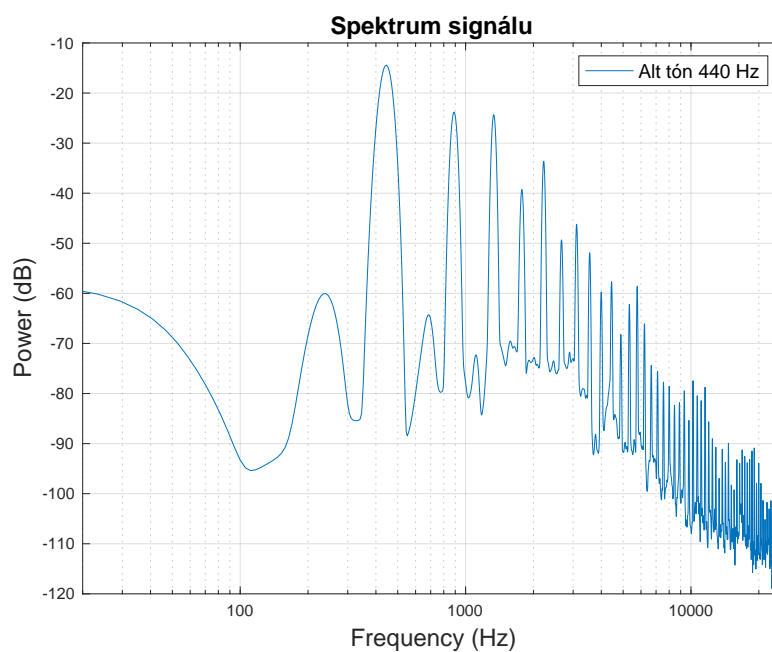


Obr. 3.3: Tenor – spektrum tónu C4

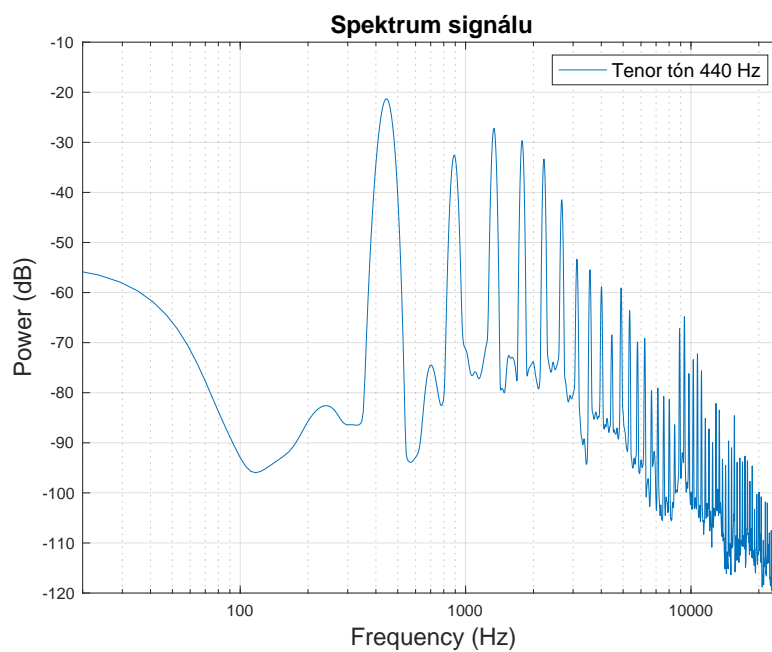
3.2.2 Znějící tón A4 – 440 Hz



Obr. 3.4: Soprán – spektrum tónu A4



Obr. 3.5: Alt – spektrum tónu A4



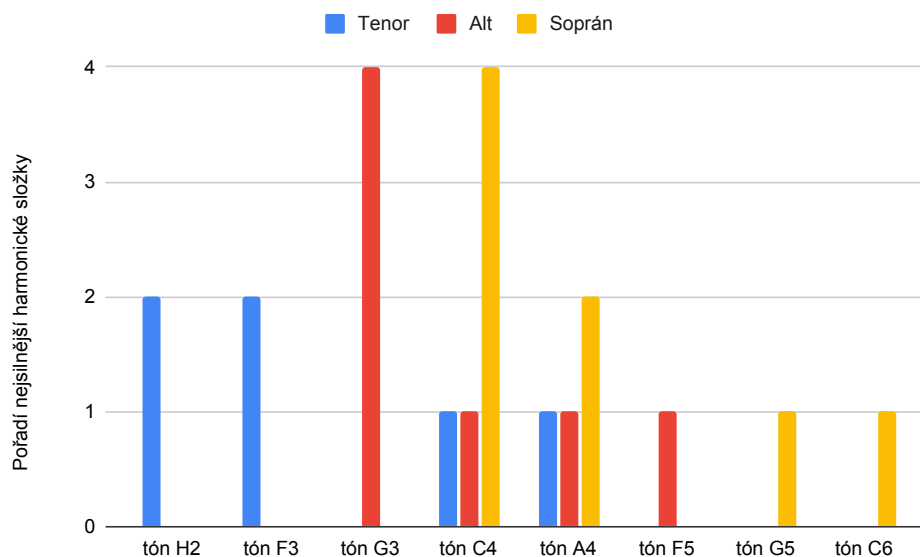
Obr. 3.6: Tenor – spektrum tónu A4

Ve spektrech tónu C_4 můžeme vidět výrazné první 3 – 4 harmonické složky výraznější oproti zbylým složkám. Prvních 8 harmonických složek jde v tónu nejlépe slyšet. Díky vyvážené intenzitě sudých i lichých složek je tón nosný a mohutný, má také svojí charakteristickou barvu.

Ve spektrech tónu A_4 můžeme pozorovat výrazných prvních 5 harmonických složek, lze již říci typických pro saxofony. Na obr. 3.5 tónu hraný na alt saxofon, lze pozorovat subharmonickou složku. Ta se nachází na frekvenci $f_{sub} = f_{1,harm}/2$. Lze ji také zpozorovat na obr. 3.6 ve spektru tenor saxofonu.

Shrnutí

Z přiložených spekter lze vyčíst, že tvar harmonických složek o stejné frekvenci na různé typy saxofonů je velice podobný až stejný, zejména tvar první harmonické. Co se ale mezi typy saxofonů liší jsou poměry amplitud mezi 1. a vyššími harmonickými. Ač jde frekvenčně o stejný tón, nemají všechny nástroje nejsilnější 1. harmonickou s klesající tendencí vyšších harmonických. Lze říci, že vyšší harmonické jsou silnější, když má nástroj tón ve své nižší poloze, to se projevuje zejména u soprán saxofonu na obrázcích 3.1 a 3.4. Naopak pokud je tón u určitého nástroje spíše ve střední a vyšší poloze, je nejsilnější 1. harmonická a s vyššími složkami amplituda klesá. Tuto závislost demonstruje graf na obr. 3.7.

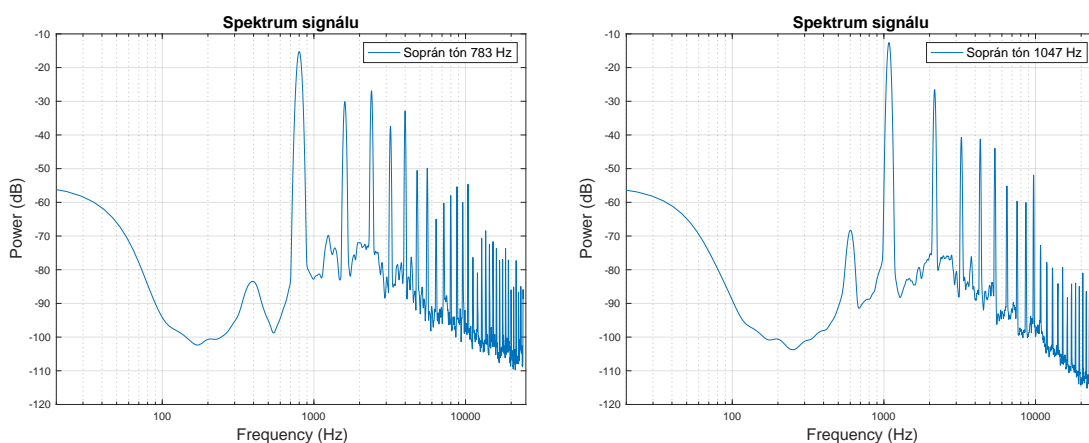


Obr. 3.7: Závislost polohy tónu v rozsahu na pořadí nejsilnější harm. složky

3.3 Porovnání frekvenčních spekter – dva různé tóny na stejný saxofon

Pro doplnění analýzy spektra všech nástrojů byly dále vybrány další dva tóny na každý z nástrojů v různých polohách, aby pokryly co největší část rozsahu nástroje. Soprán saxofon tedy dále pokračuje do vyšších poloh tóny *G5* a *C6*. Alt saxofon hraje tón *E3* ze spodní části rozsahu a tón *F5* naopak z vyšší části rozsahu. Tenor saxofon hraje tóny na pokrytí spodní části svého rozsahu a to jsou tóny *H2* a *F3*. Na níže zobrazených spektrech můžeme přímo porovnat 2 tóny vycházející ze stejného nástroje.

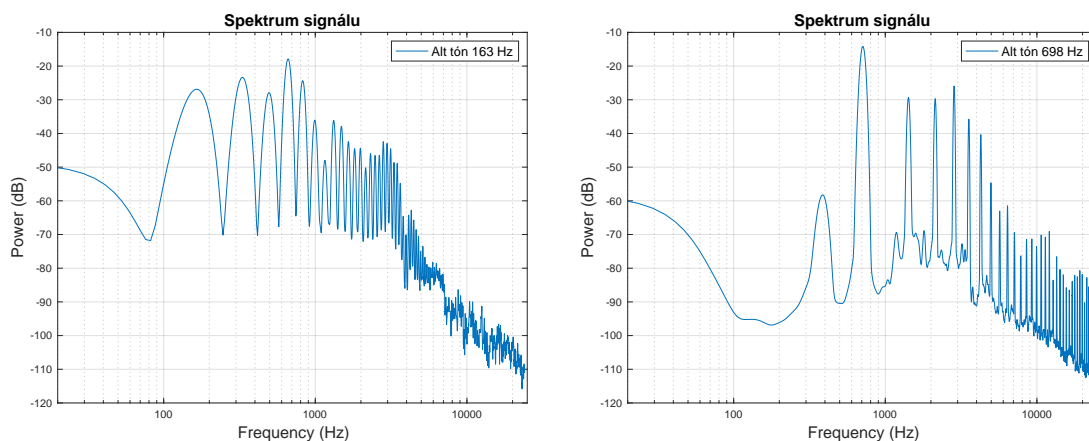
3.3.1 Spektra tónů soprán saxofonu



Obr. 3.8: Soprán – spektrum tónů *G5* a *C6*

Ve spektrech soprán saxofonu (obr. 3.8) lze vidět výraznou 1. harmonickou složku. Pod ní se objevuje též jedna subharmonická složka a to u obou hraných tónů. Ty se začínají objevovat právě ve vyšších polohách námi zkoumaných nástrojů (také u alt saxofonu na obr. 3.9). Díky vyšším frekvencím tónů sopránu jsou spektra relativně diskrétní. Tóny také již nemají tolik slyšitelných vyšších harmonických složek (slyšitelné jsou pouze do zhruba 20 kHz).

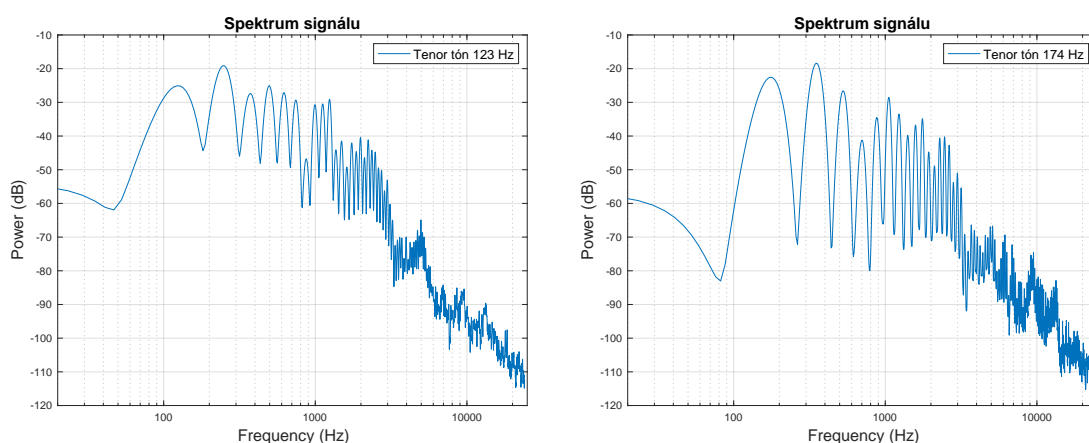
3.3.2 Spektra tónů alt saxofonu



Obr. 3.9: Alt – spektrum tónů E3 a F5

Alt saxofon má taktěž výrazných prvních 5 harmonických složek. V tónu $E3$ je zachycen spodní rozsah nástroje. Počáteční harmonické jsou vyrovnané a nejvýraznější je zde 4. harmonická, dalo by se říct že tón je díky tomu jasný. U vyššího z vybraných tónů (tón $F5$) se objevuje složka subharmonická. Jeho 1. harmonická je nejvýraznější, tudíž je tón nosný. Není už tolik plný, jelikož amplitudy od 7. harmonické výrazněji klesají.

3.3.3 Spektra tónů tenor saxofonu



Obr. 3.10: Tenor – spektrum tónů H2 a F3

Vybrané tóny tenor saxofonu jsou oba z nižší polohy nástroje. Co do intenzity jednotlivých složek jsou si velmi podobné. Jako u nižšího tónu alt saxofonu zde není nejsilnější 1. harmonická, ale je to druhá. Ta dodává tónu mohutnost.

Tab. 3.1: Porovnání harmonických složek sopránu

Soprán	tón C4				tón A4			
	pořadí harmonické	frekvence	intenzita v dB	rozdíl mezi n a $n-1$ harm. složkou	rozdíl mezi 1. a n harm. složkou	frekvence	intenzita v dB	rozdíl mezi n a $n-1$ harm. složkou
1	263,74	-21,88			445,42	-25,76		
2	527,47	-19,39	2,49	2,49	890,84	-18,61	7,15	7,15
3	785,35	-18,65	0,74	3,23	1336,26	-30,55	-11,94	-4,79
4	1049,08	-15,80	2,85	6,08	1775,82	-29,91	0,64	-4,15
5	1312,82	-33,74	-17,94	-11,86	2221,25	-29,33	0,58	-3,57
6	1576,56	-39,01	-5,27	-17,13	2666,67	-46,74	-17,42	-20,99
7	1834,43	-29,64	9,37	-7,76	3112,09	-42,40	4,35	-16,64
8	2098,17	-38,34	-8,70	-16,46	3557,51	-46,92	-4,52	-21,16
9	2361,90	-43,31	-4,97	-21,43	3997,07	-48,55	-1,63	-22,79
10	2625,64	-49,93	-6,62	-28,05	4442,49	-50,34	-1,79	-24,58
11	2889,38	-47,53	-47,53	-25,65	4887,91	-48,65	1,69	-22,90
12	3147,25	-42,84	4,70	-20,95	5333,33	-51,54	-2,89	-25,78
13	3410,99	-47,42	-4,58	-25,54	5778,75	-55,24	-3,70	-29,48
14	3674,73	-54,64	-7,22	-32,76	6224,18	-62,62	-7,38	-36,86
15	3938,46	-54,59	-54,59	0,05	6669,60	-67,17	-4,55	-41,41
16	4196,34	-49,12	5,47	-27,24	7115,02	-74,17	-7,00	-48,42
17	4460,07	-47,02	2,09	-25,14	7554,58	-72,98	1,20	-47,22
18	4723,81	-57,47	-10,44	-35,58	8005,86	-70,93	2,04	-45,18
19	4987,55	-53,02	4,44	-31,14	8451,28	-65,80	5,13	-40,05
20	5251,28	-56,82	-3,79	-34,94	8890,84	-61,39	4,41	-35,64

Soprán	tón G5				tón C6			
	pořadí harmonické	frekvence	intenzita v dB	rozdíl mezi n a $n-1$ harm. složkou	rozdíl mezi 1. a n harm. složkou	frekvence	intenzita v dB	rozdíl mezi n a $n-1$ harm. složkou
1	797,07	-15,27			1078,39	-12,58		
2	1600,00	-30,10	-14,83	-14,83	2162,64	-26,54	-13,96	-13,96
3	2397,07	-26,88	3,22	-11,61	3241,03	-40,71	-14,17	-28,13
4	3200,00	-37,48	-10,60	-22,21	4325,27	-41,24	-0,53	-28,67
5	3997,07	-32,88	4,60	-17,62	5397,80	-43,96	-2,72	-31,38
6	4794,14	-50,53	-17,65	-35,26	6476,19	-55,13	-11,17	-42,56
7	5591,21	-49,89	0,64	-34,63	7560,44	-59,63	-4,49	-47,05
8	6394,14	-64,99	-15,10	-49,72	8644,69	-60,05	-0,42	-47,47
9	7191,21	-60,23	4,76	-44,96	9717,22	-51,89	8,16	-39,31
10	7988,28	-58,01	2,22	-42,74	10801,47	-72,78	-20,89	-60,20
11	8785,35	-55,35	2,65	-40,09	11862,27	-77,82	-5,04	-65,24
12	9588,28	-60,05	-4,70	-44,78	12940,66	-79,47	-1,64	-66,89
13	10385,35	-54,62	5,43	-39,36	14060,07	-84,11	-4,64	-71,53
14	11188,28	-76,36	-21,74	-61,10	15091,58	-79,32	4,78	-66,75
15	11979,49	-80,92	-4,56	-65,65	16234,43	-88,28	-8,96	-75,70
16	12782,42	-70,69	10,23	-55,42	17295,24	-84,23	4,05	-71,65
17	13579,49	-68,43	2,26	-53,16	18379,49	-83,96	0,26	-71,38
18	14376,56	-72,44	-4,02	-57,18	19446,15	-84,97	-1,01	-72,39
19	15179,49	-71,66	0,78	-56,39	20512,82	-80,97	4,00	-68,39
20	15976,56	-73,68	-2,02	-58,41	21626,37	-86,45	-5,48	-73,87

V tabulkách 3.1, 3.2 a 3.3 můžeme vidět hodnoty amplitud prvních 20 harmonických složek v decibelech. V prvním barevném sloupci jsou od sebe hodnoty sousedních složek odečteny podle vztahu:

$$\Delta = nA - (n + 1)A, \quad (3.1)$$

kde A značí hodnotu amplitudy a n značí pořadové číslo harmonické složky.

Tab. 3.2: Porovnání harmonických složek alt

Alt	tón E3				tón C4			
	pořadí harmonické	frekvence	intenzita v dB	rozdíl mezi n a $n-1$ harm. složkou	rozdíl mezi 1. a n harm. složkou	frekvence	intenzita v dB	rozdíl mezi n a $n-1$ harm. složkou
1	164,10	-26,86			263,74	-19,05		
2	328,21	-23,38	3,48	3,48	527,47	-27,89	-8,84	-8,84
3	498,17	-27,90	-4,52	-1,04	785,35	-31,64	-3,75	-12,59
4	662,27	-17,89	10,01	8,97	1049,08	-40,18	-8,54	-21,13
5	826,37	-24,33	-6,44	2,53	1312,82	-27,20	12,98	-8,15
6	990,48	-36,06	-11,73	-9,20	1576,56	-38,86	-11,66	-19,81
7	1154,58	-47,98	-11,92	-21,12	1840,29	-49,55	-10,68	-30,50
8	1324,54	-36,11	11,87	-9,26	2104,03	-39,28	10,26	-20,23
9	1488,64	-37,87	-1,76	-11,02	2361,90	-41,62	-2,34	-22,57
10	1652,75	-42,43	-4,55	-15,57	2625,64	-48,46	-6,83	-29,41
11	1816,85	-44,51	-2,09	-17,66	2889,38	-46,11	2,35	-27,05
12	1980,95	-44,40	0,11	-17,55	3153,11	-46,24	-0,13	-27,19
13	2150,92	-50,20	-5,79	-23,34	3416,85	-46,37	-0,13	-27,32
14	2315,02	-45,99	4,21	-19,13	3680,59	-59,03	-12,66	-39,98
15	2479,12	-46,52	-4,52	-19,67	3938,46	-62,21	-3,18	-43,16
16	2643,22	-46,48	0,04	-19,63	4202,20	-54,65	7,56	-35,60
17	2807,33	-42,43	4,05	-15,58	4465,93	-56,95	-2,30	-37,90
18	2971,43	-42,94	-0,51	-16,08	4729,67	-58,08	-1,13	-39,03
19	3141,39	-44,52	-1,59	-17,67	4993,41	-64,98	-6,91	-45,93
20	3305,49	-48,64	-4,12	-21,79	5257,14	-63,48	1,50	-44,43

Alt	tón A4				tón F5			
	pořadí harmonické	frekvence	intenzita v dB	rozdíl mezi n a $n-1$ harm. složkou	rozdíl mezi 1. a n harm. složkou	frekvence	intenzita v dB	rozdíl mezi n a $n-1$ harm. složkou
1	445,42	-14,44			709,16	-14,17		
2	890,84	-23,80	-9,37	-9,37	1424,18	-29,34	-15,17	-15,17
3	1330,40	-24,34	-0,53	-9,90	2133,33	-29,68	-0,34	-15,51
4	1775,82	-39,27	-14,94	-24,83	2842,49	-25,93	3,74	-11,76
5	2221,25	-33,61	5,66	-19,17	3557,51	-35,77	-9,84	-21,61
6	2666,67	-49,34	-15,73	-34,90	4266,67	-40,34	-4,57	-26,17
7	3106,23	-46,21	3,13	-31,77	4975,82	-54,67	-14,32	-40,50
8	3551,65	-51,90	-5,69	-37,46	5684,98	-63,03	-8,36	-48,86
9	3997,07	-59,75	-7,85	-45,31	6400,00	-61,48	1,55	-47,31
10	4442,49	-57,67	2,08	-43,23	7109,16	-69,34	-7,86	-55,17
11	4882,05	-68,20	-10,53	-53,76	7830,04	-76,34	-7,00	-62,17
12	5327,47	-62,23	5,97	-47,80	8545,05	-71,43	4,91	-57,26
13	5772,89	-58,63	3,60	-44,19	9260,07	-71,31	0,12	-57,14
14	6212,45	-66,06	-7,43	-51,63	9945,79	-73,55	-2,24	-59,38
15	6663,74	-74,37	-8,30	-59,93	10672,53	-70,14	3,40	-55,98
16	7109,16	-75,56	-1,19	-61,12	11364,10	-70,75	-0,60	-56,58
17	7548,72	-77,72	-2,16	-63,28	12079,12	-69,11	1,64	-54,94
18	8005,86	-78,53	-0,82	-64,09	12794,14	-83,55	-14,45	-69,39
19	8445,42	-82,32	-3,79	-67,88	13497,44	-76,59	6,97	-62,42
20	8890,84	-81,82	0,49	-67,39	14206,59	-80,38	-3,80	-66,21

V tabulkách lze tedy v prvním barevném sloupci vidět nárůst hodnot (zelená barva). To znamená, že ne vždy je hodnota amplitudy následující harmonické složky nižší oproti předchozí. Takto vznikají ve spektru formantové oblasti – oblasti ve kterých amplitudy lehce stoupnou. Tyto oblasti má každý nástroj různé a to vytváří jejich jedinečnou barvu zvuku. Formantové oblasti budou dále přiblíženy v kapitole 3.4.

Tab. 3.3: Porovnání harmonických složek tenor

Tenor	tón H2				tón F3			
	pořadí harmonické	frekvence	intenzita v dB	rozdíl mezi n a $n-1$ harm. složkou	rozdíl mezi 1. a n harm. složkou	frekvence	intenzita v dB	rozdíl mezi n a $n-1$ harm. složkou
1	164,10	-26,86			175,82	-22,53		
2	328,21	-23,38	3,48	3,48	351,65	-18,37	4,16	4,16
3	498,17	-27,90	-4,52	-1,04	527,47	-26,58	-8,20	-4,04
4	662,27	-17,89	10,01	8,97	703,30	-41,22	-14,65	-18,69
5	826,37	-24,33	-6,44	2,53	879,12	-34,48	6,74	-11,95
6	990,48	-36,06	-11,73	-9,20	1054,95	-28,54	5,94	-6,00
7	1154,58	-47,98	-11,92	-21,12	1230,77	-33,48	-4,94	-10,95
8	1324,54	-36,11	11,87	-9,26	1406,59	-39,83	-6,35	-17,30
9	1488,64	-37,87	-1,76	-11,02	1582,42	-36,74	3,09	-14,21
10	1652,75	-42,43	-4,55	-15,57	1758,24	-34,87	1,88	-12,33
11	1816,85	-44,51	-2,09	-17,66	1934,07	-44,71	-9,84	-22,18
12	1980,95	-44,40	0,11	-17,55	2109,89	-48,85	-4,14	-26,32
13	2150,92	-50,20	-5,79	-23,34	2285,71	-40,57	8,28	-18,04
14	2315,02	-45,99	4,21	-19,13	2461,54	-40,23	0,34	-17,70
15	2479,12	-46,52	-0,54	-19,67	2637,36	-42,76	-2,53	-20,23
16	2643,22	-46,48	0,04	-19,63	2813,19	-53,78	-11,01	-31,24
17	2807,33	-42,43	4,05	-15,58	2989,01	-50,97	2,81	-28,44
18	2971,43	-42,94	-0,51	-16,08	3164,84	-55,38	-4,41	-32,85
19	3141,39	-44,52	-1,59	-17,67	3340,66	-69,18	-13,80	-46,65
20	3305,49	-48,64	-4,12	-21,79	3516,48	-74,21	-5,03	-51,68

Tenor	tón C4				tón A4			
	pořadí harmonické	frekvence	intenzita v dB	rozdíl mezi n a $n-1$ harm. složkou	rozdíl mezi 1. a n harm. složkou	frekvence	intenzita v dB	rozdíl mezi n a $n-1$ harm. složkou
1	263,74	-16,70			445,42	-21,29		
2	533,33	-32,89	-16,19	-16,19	890,84	-32,56	-11,27	-11,27
3	797,07	-27,67	5,22	-10,97	1336,26	-27,21	5,34	-5,92
4	1060,81	-40,80	-13,13	-24,10	1781,68	-29,67	-2,46	-8,38
5	1324,54	-46,81	-6,01	-30,11	2227,11	-33,35	-3,68	-12,06
6	1594,14	-42,99	3,83	-26,29	2672,53	-41,48	-8,13	-20,19
7	1857,88	-51,40	-8,41	-34,70	3117,95	-53,34	-11,86	-32,05
8	2121,61	-52,05	-0,65	-35,35	3563,37	-55,45	-2,11	-34,16
9	2391,21	-48,81	3,25	-32,11	4008,79	-58,83	-3,38	-37,54
10	2664,95	-54,95	-6,14	-38,25	4454,21	-68,45	-9,62	-47,16
11	2918,68	-52,85	2,10	-36,15	4899,63	-59,08	9,37	-37,79
12	3182,42	-62,56	-9,70	-45,86	5345,05	-63,60	-4,52	-42,31
13	3452,01	-69,74	-7,18	-53,04	5790,48	-69,85	-6,24	-48,56
14	3715,75	-65,36	4,38	-48,66	6235,90	-69,16	0,68	-47,87
15	3979,49	-68,92	-3,56	-52,22	6681,32	-79,54	-10,38	-58,25
16	4243,22	-67,22	1,70	-50,52	7126,74	-79,08	0,47	-57,79
17	4512,82	-68,29	-1,07	-51,59	7572,16	-80,71	-1,64	-59,42
18	4776,56	-68,19	0,10	-51,49	8011,72	-81,37	-0,66	-60,08
19	5046,15	-62,39	5,81	-45,69	8463,00	-86,38	-5,01	-65,09
20	5304,03	-70,03	-7,64	-53,33	8902,56	-67,21	19,17	-45,92

V druhém barevném sloupci jsou pak vyšší harmonické složky odečteny od první harmonické podle vztahu:

$$\Delta = A_1 - nA, \quad (3.2)$$

kde A_1 značí hodnotu amplitudy první harmonické a n značí pořadové číslo vybrané harmonické složky.

V tomto sloupci lze vidět postupný pokles amplitud vyšších harmonických. U některých tónů, zejména v nižších polohách, však není pravidlo, že by byla nejsilnější první harmonická. Hodnoty v zelené barvě nám ukazují, že nejsilnější může být i až čtvrtá harmonická.

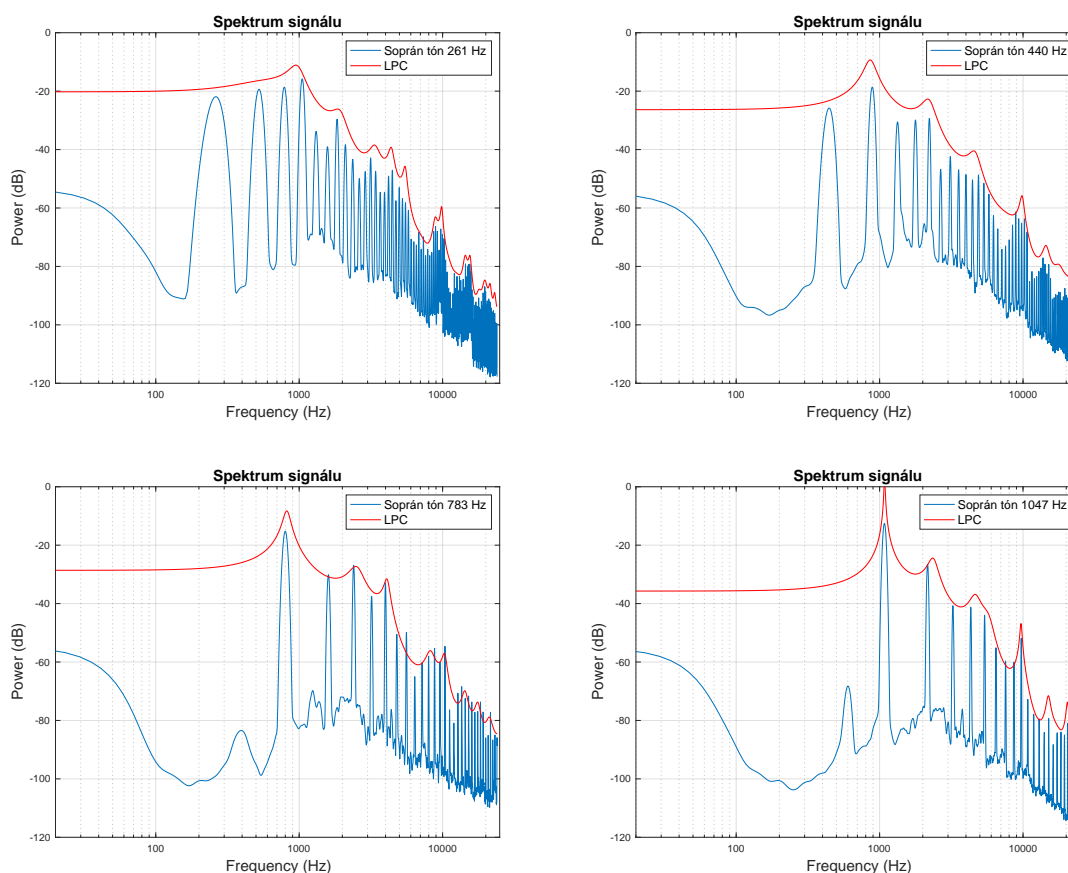
Shrnutí

Lze si všimnout, že počáteční frekvence v tabulkách 3.1, 3.2 a 3.3 je nepatrně vyšší, než stanovená před měřením. To může být způsobeno několika faktory. Dechové nástroje jsou velmi náchylné k rozladění, například i vlivem okolní teploty.

V grafech i tabulkách je patrných prvních 5 – 6 složek, které jsou ve všech uvedených tónech u všech typů saxofonů znatelně silnější. Vidíme také, že saxofon ve svém spektru nevynechává liché ani sudé harmonické. Spektrum je silné a plné v celé své šířce. Jinak řečeno, obsahuje vysoký počet vyšších harmonických složek, i proto je jeho zvuk jeden z nejprůraznějších a často maskuje jiné nástroje.

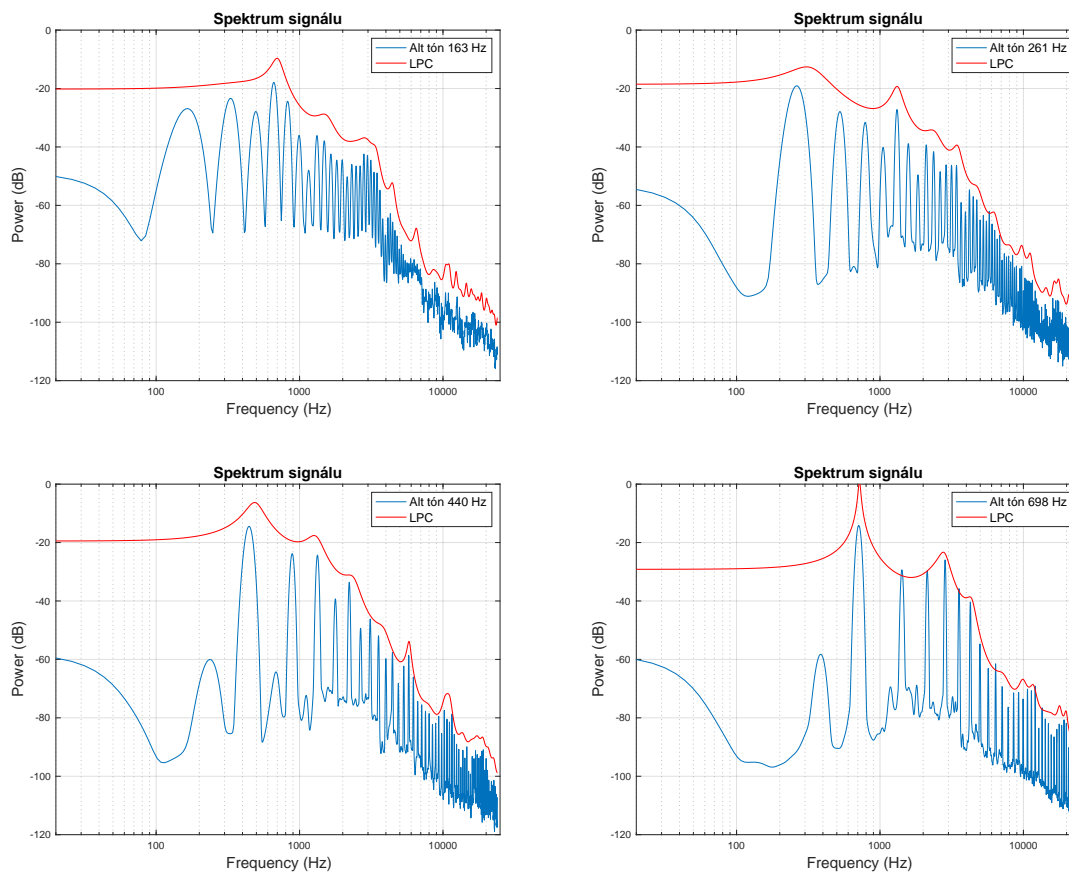
Při hře v nižším rozsahu se na saxofonu uzavírá většina klapek. Je tedy pravděpodobné, že vyšší harmonické jsou zvýrazněny více díky průchodu vzduchu větší částí nástroje v případě tónu v nižším rozsahu. V tabulce se to projevuje vždy v posledním sloupci ne tolik sytou červenou barvou. Spektra tónů ve vyšším rozsahu nástroje neobsahují tolik výrazných vyšších harmonických složek a tudíž mají i strmější pokles (v tabulkách hodnoty v rudých číslech). Tuto teorii potvrzuje srovnání tónů C_4 a A_4 mezi nástroji. Čím výše v rozsahu jej nástroj má, tím rychleji klesají intenzity vyšších harmonických složek na nižší intenzitu.

3.4 Porovnání grafů LPC analýzy



Obr. 3.11: LPC analýza sopránu – tóny C₄, A₄, G₅ a C₆

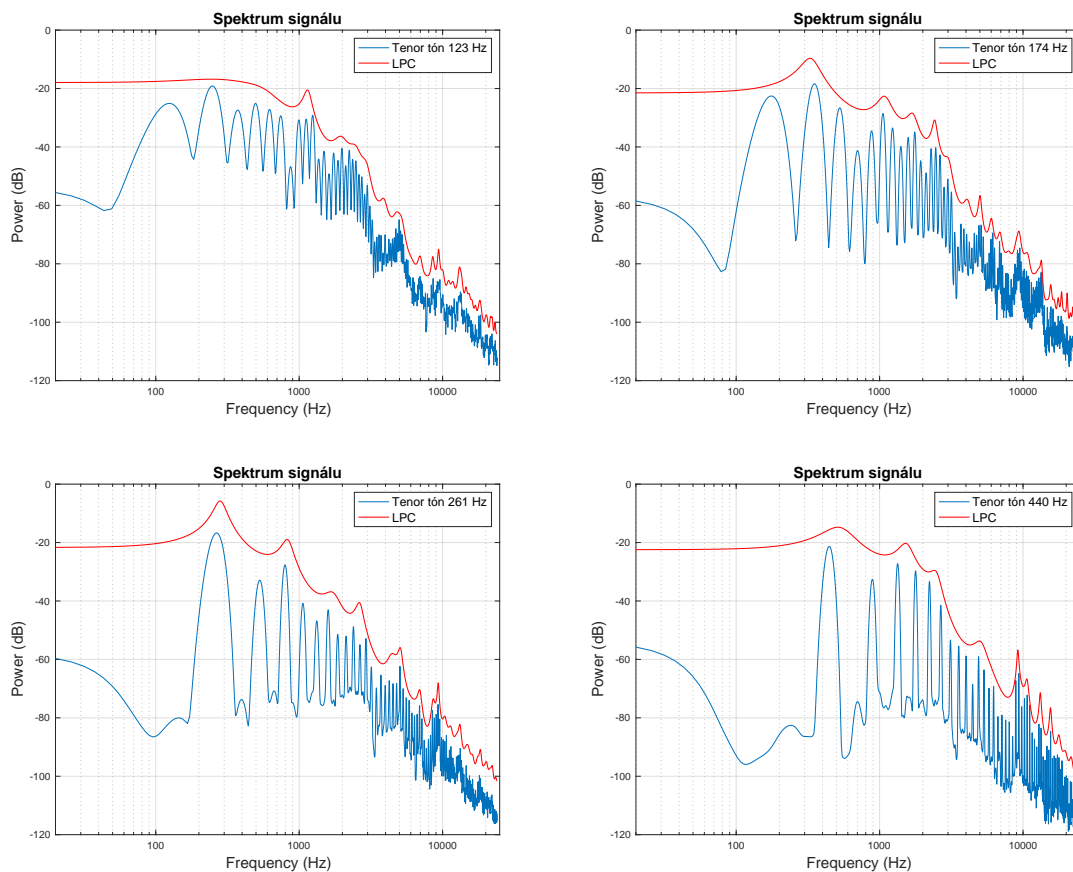
Ve výsledcích LPC analýzy tónů soprán saxofonu vidíme povětšinou 3 – 4 formantové oblasti. Soprán viditelně zesiluje kolem frekvence 1 kHz, i tóny s fundamentem (1. harmonickou) na nižší frekvenci mají nejsilnější složku právě kolem zmíněné frekvence 1 kHz. Oblast kolem frekvence 9 kHz je velmi výrazná ve všech tónech, tudíž typická pro soprán saxofon, taktéž ale pro saxofony obecně, jak uvidíme dále. Na okraji slyšitelného pásma lze u tónů C₄ a A₄ vidět ještě další výraznou oblast, ta už však nebude snadno slyšitelná.



Obr. 3.12: LPC analýza altu – tóny E3, C4, A4 a F5

Ve spektrech alt saxofonu vidíme výrazné formantové oblasti jak v okolí frekvence 9 kHz (podobně jako u sopránu na obr. 3.11), tak v oblasti mezi 2 – 3 kHz. Tato oblast je rovněž velmi citlivá pro lidské ucho.

Za zvláštní úkaz by se dal považovat formant mezi frekvencemi 5 – 6 kHz v tónech *E3* a *A4* (vlevo dole). Formanty jsou tvořeny v důsledku stavby nástroje. Zde jsou však výrazné pouze u dvou tónů. Lze to přisuzovat hmatu, kterým jsou hrané. V obou případech jsou totiž použity klapky obou rukou, tedy v horní i spodní části nástroje. V případě druhého jmenovaného je navíc přidána oktávová klapka. U zbylých dvou tónů je použit hmat pouze horní rukou, je tedy možné že v tomto případě není tato formantová oblast zvýrazněna.

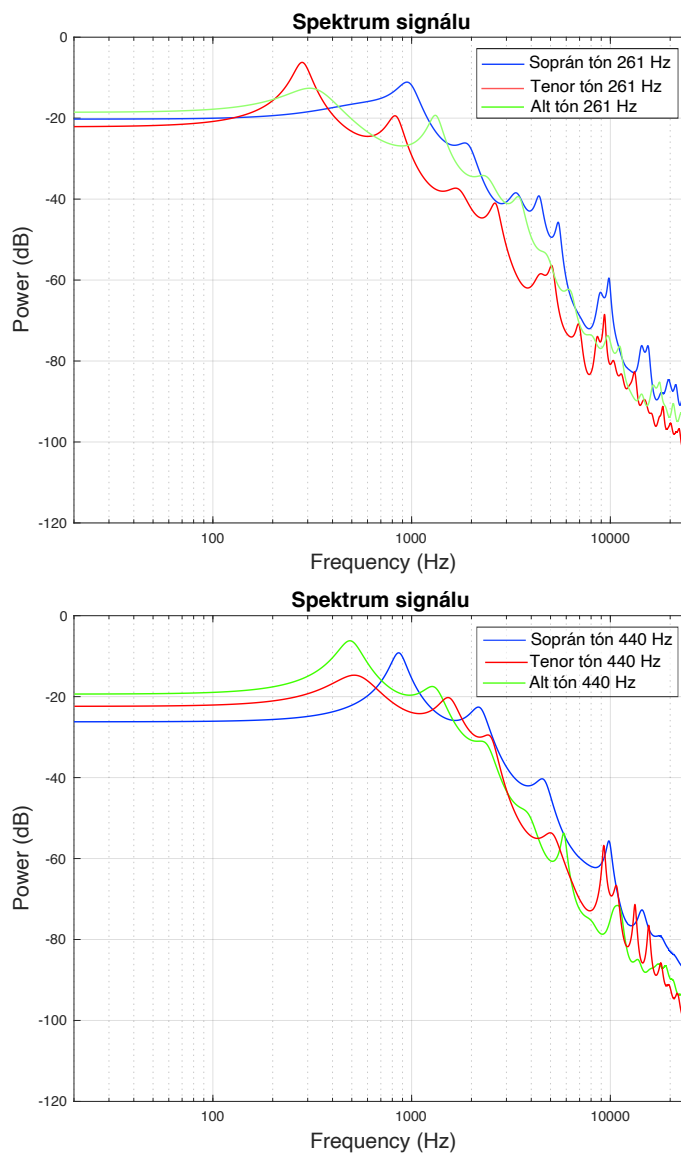


Obr. 3.13: LPC analýza tenoru – tóny H2, F3, C4 a A4

Tenor saxofon přidává kromě výše zmíněných také výraznou formantovou oblast v okolí frekvence 5 kHz, rovněž citlivou oblast pro lidské ucho. Ve spektrech soprán a alt saxofonu je také vidět, u tenoru je však mnohem výraznější, hlavně v jeho spodním rozsahu. Velmi zajímavé podobnosti si lze povšimnout u dvou nejnižších tónů hraných na alt (obr. 3.12) a tenor (obr. 3.13). Pro oba nástroje je to psané *Cis1*, tudíž tón hraný stejným hmatem. Průběh jejich spekter je tedy velmi podobný, taktéž tvar jejich obálek. Nevidíme zde výrazné pokles v první části spektra (1. – 8. harmonická), nejsou zde tedy ani výraznější formantové oblasti.

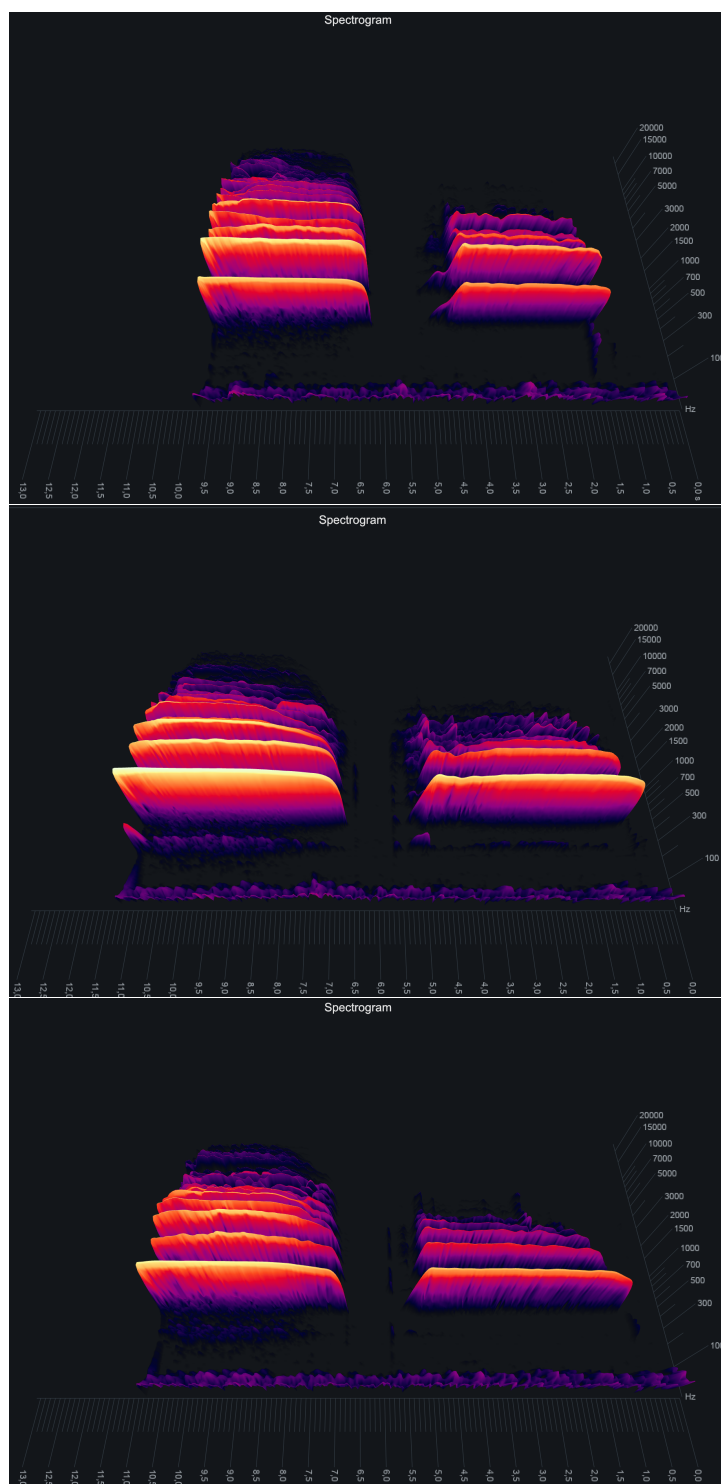
Shrnutí

Lze říci že pro saxofony je typická formantová oblast v okolí frekvence 2 – 3 kHz. S vysokou četností se objevují u většiny nahraných tónů. Tak stejně si lze všimnou oblasti okolo 9 kHz. Taktéž se výrazná formantová oblast objevuje ve většině vzorcích. Pro srovnání jsou níže vloženy dva srovnávací grafy. Nejvýrazněji jde vidět společná formantová oblast právě kolem 9 kHz. Oblast mezi 2 a 3 kHz je u sopránů posunutá více k frekvenci 2 kHz oproti altu a tenoru, je zde však také viditelná podobnost



Obr. 3.14: Porovnání LPC – tón C4 a A4

3.5 Porovnání spektrogramů



Obr. 3.15: Spektrogramy soprán, alt a tenor saxofonu

Spektrogramy zobrazují průběhy tónů v 3D prostoru, můžeme tedy sledovat 3 zobrazované parametry. V tomto případě je to na ose x čas, na ose y intenzita a na ose z frekvence. Žlutě jsou zvýrazněny nejvyšší amplitudy, které postupně přecházejí přes oranžovou do fialové (nejslabší). Na obr. 3.15 jsou pod sebou zobrazeny tóny A_4 na soprán, alt a tenor saxofon. Na průbězích je vždy tón zahrán první v dynamice *forte* (na obrázcích na levé straně) a poté *piano* (na obrázcích na pravé straně). Také se zde ověřuje tvrzení na konci kapitoly 1.7, tedy že s vyšší dynamikou se vyrovnává intenzita vyšších harmonických s 1. harmonickou. Ze spektrogramů také můžeme získat představu o tom, kolik složek z tónu je uchem rozpoznatelných oproti těm, které lze změřit.

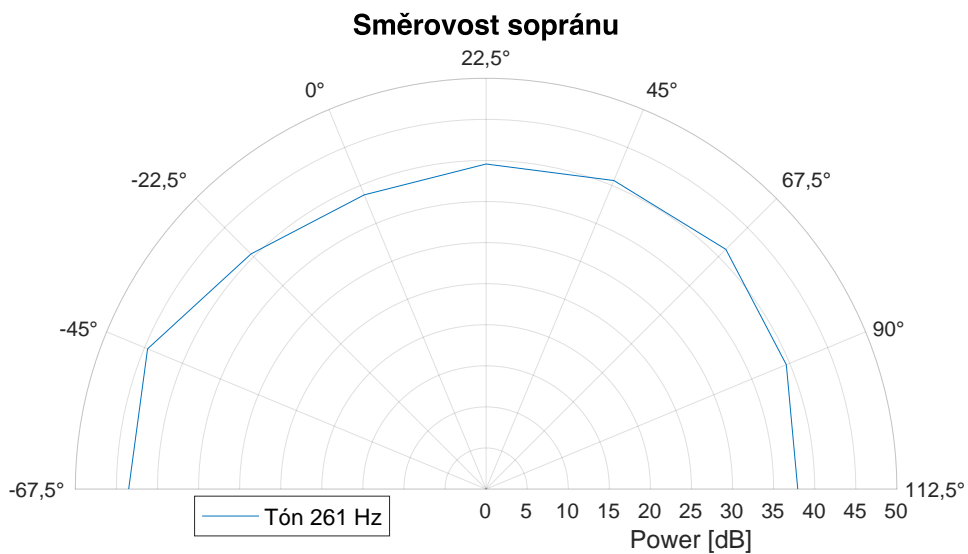
3.6 Porovnání grafů směrového vyzařování

Amplitudy jednotlivých tónů jsou zde vyneseny do polárních souřadnic od -67.5° do 112.5° s krokem 22.5° . Hráč byl čelem proti pozici 0° . Toto rozestavení bylo z důvodu předpokladu vyzařování nástrojů spíše pravým směrem vzhledem k jejich konstrukci popsané v kapitole 2.2. Mřížka vyplňující graf znázorňuje amplitudy v rozsahu $0 - 50$ dB s krokem 5 dB. Grafy jsou zobrazeny ve větším měřítku z důvodu lepšího rozeznání rozdílů amplitud mezi jednotlivými směry. U některých tónů jsou změny velmi malé.

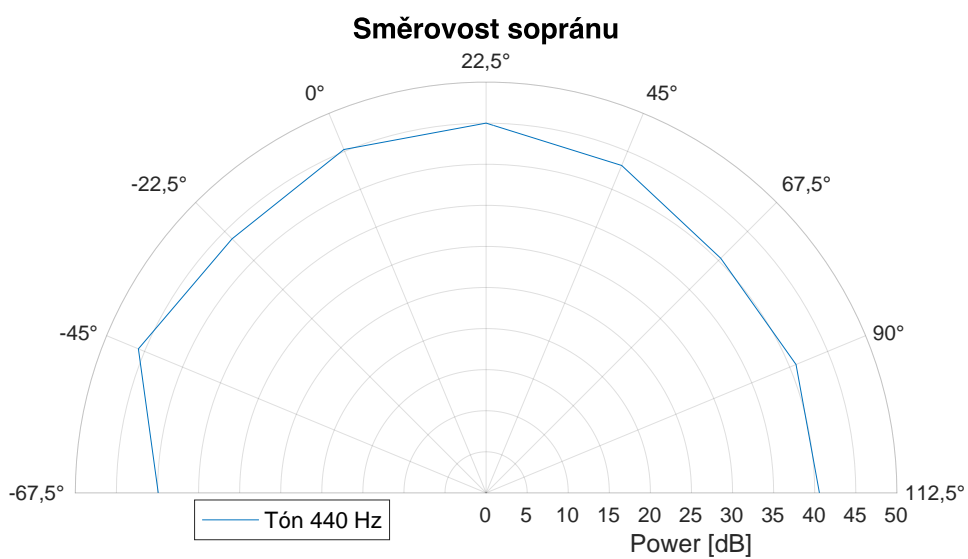
V grafech 3.16, 3.17, 3.18 a 3.19 můžeme vidět zobrazeny výstupy z nahraných vzorků pro určení směrového vyzařování soprán saxofonu. Ten má tvar rovného kuželu s klapkami po celém těle. Díky jeho konstrukci je při hře držen roztrubem mírně k zemi.

V grafech 3.20, 3.21, 3.22 a 3.23 máme zobrazeny směrové charakteristiky alt saxofonu. Ten má již jeho zakončení zahnuté směrem vzhůru. Jeho průměr je větší než u sopránu a má tělo taktéž celé pokryté klapkami.

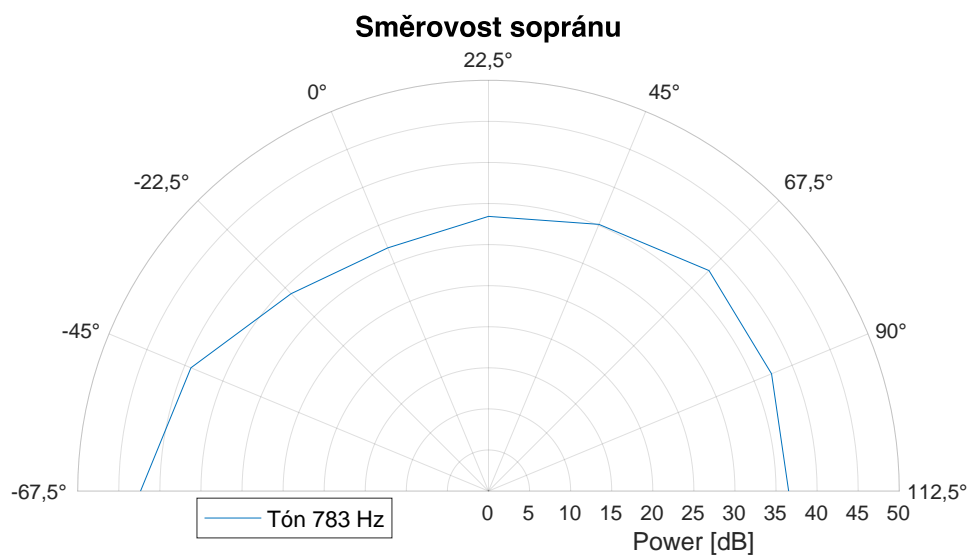
V grafech 3.24, 3.25, 3.26 a 3.27 jsou vykresleny směrové charakteristiky tenor saxofonu. Ten má průměr svého těla největší. Také je nejdelší, tudíž má roztrub taktéž zahnut směrem vzhůru. Zahnutí těla nástroje dosahuje do nižší výšky od země oproti altu. Klapky jsou shodně jako u předchozích typů rozprostřeny od krku až po roztrub.



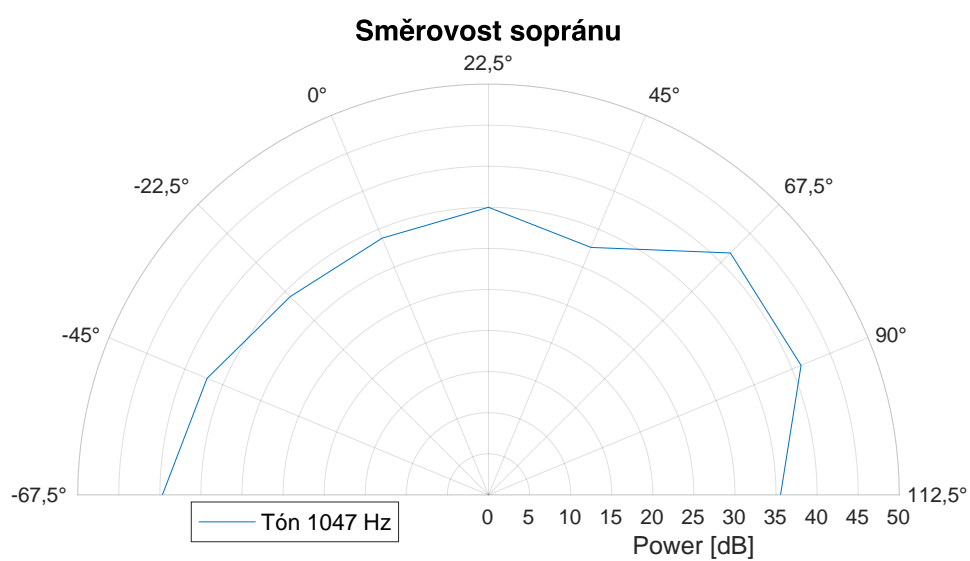
Obr. 3.16: Soprán – směrnost tónu C4



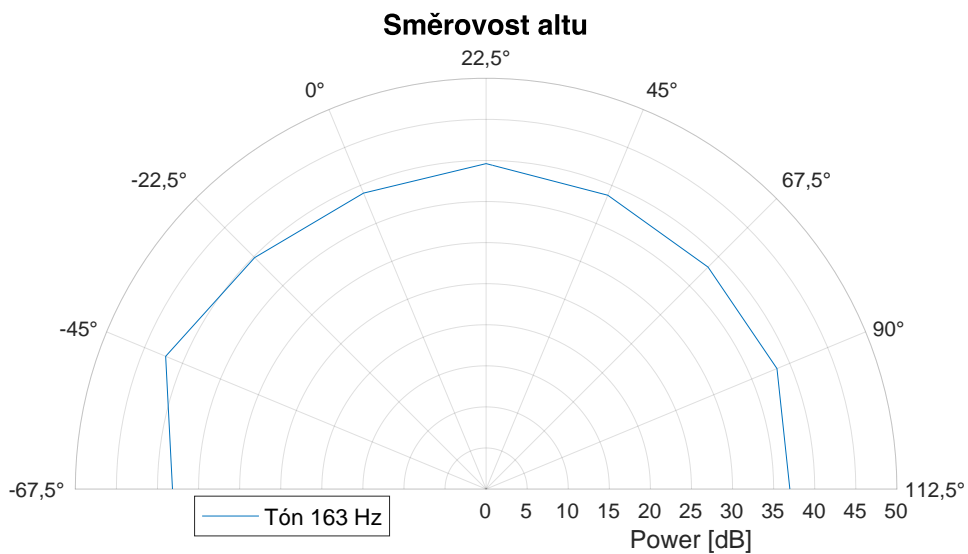
Obr. 3.17: Soprán – směrnost tónu A4



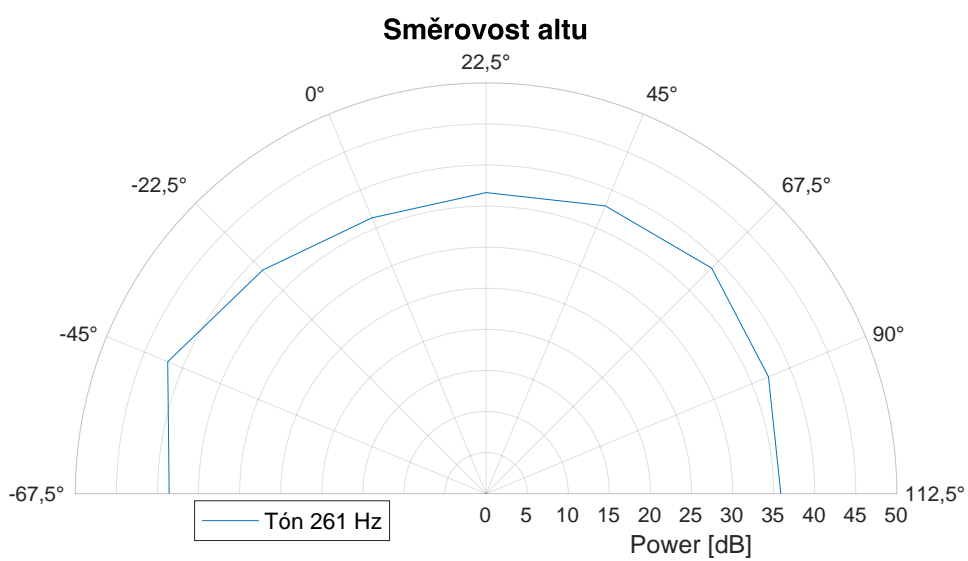
Obr. 3.18: Soprán – směrovost tónu G5



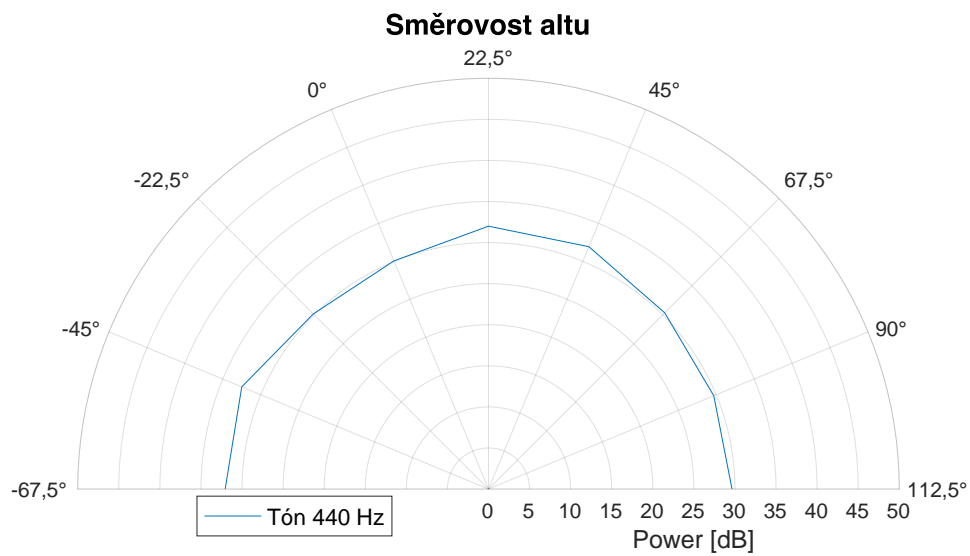
Obr. 3.19: Soprán – směrovost tónu C6



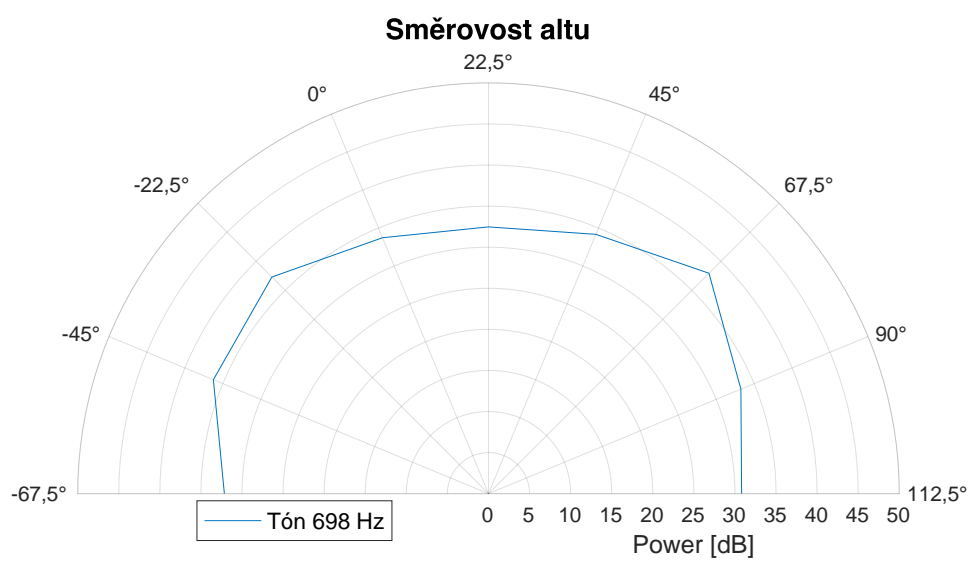
Obr. 3.20: Alt – směrovost tónu E3



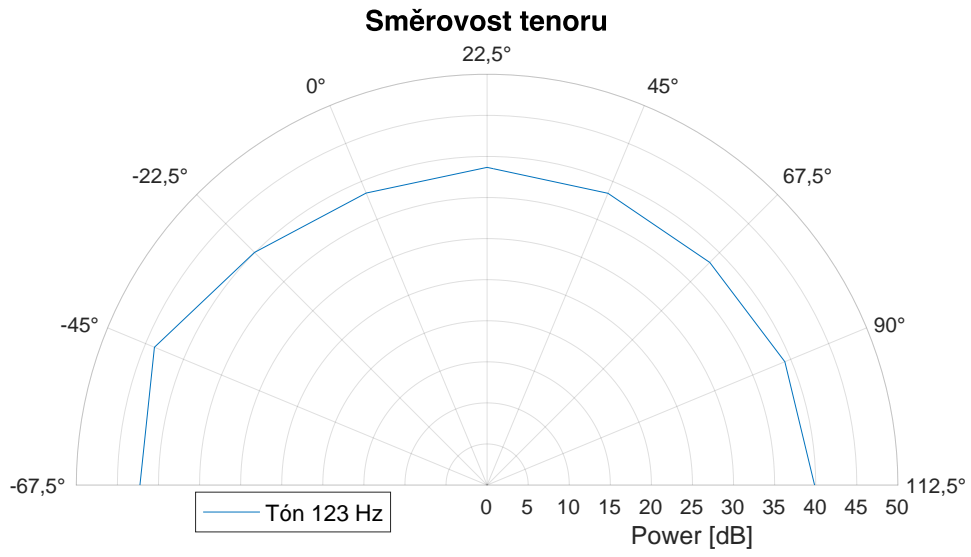
Obr. 3.21: Alt – směrovost tónu C4



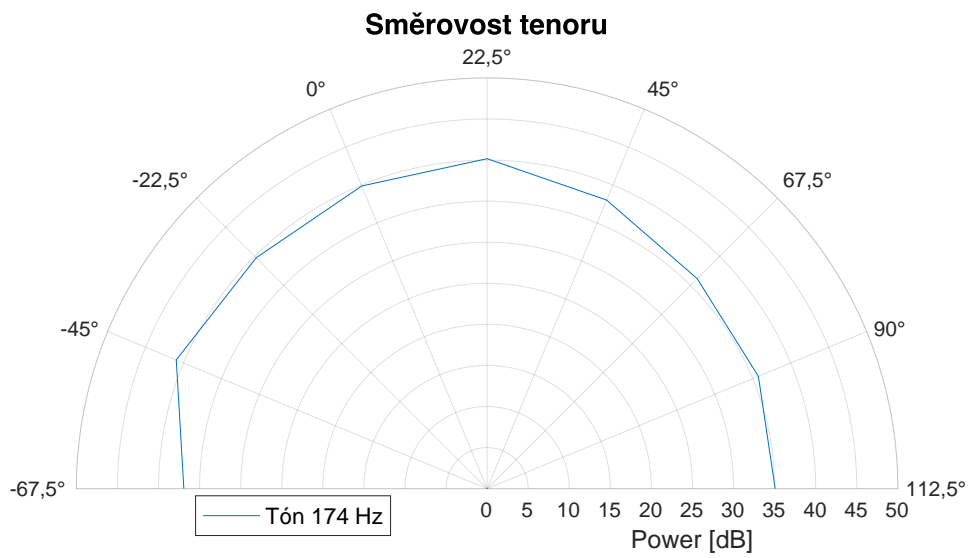
Obr. 3.22: Alt – směrovost tónu A4



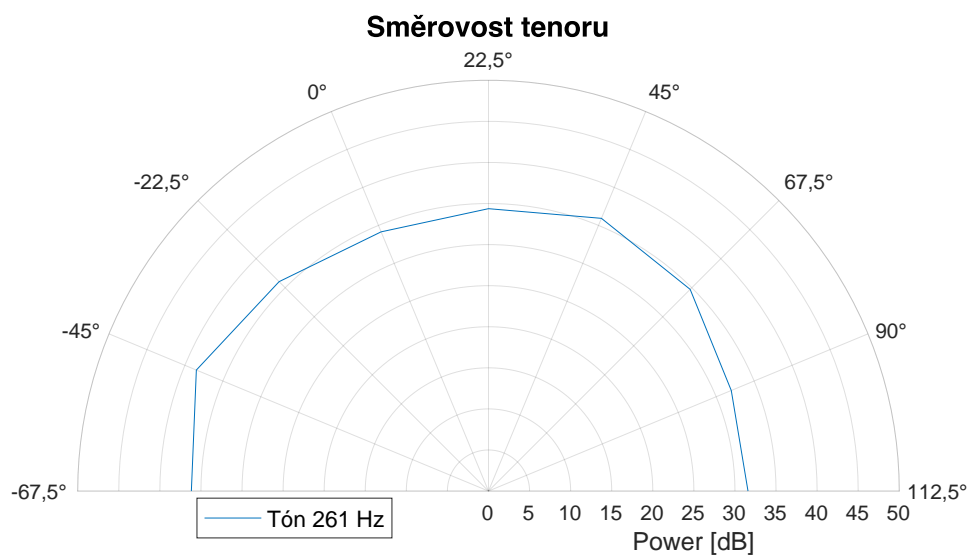
Obr. 3.23: Alt – směrovost tónu F5



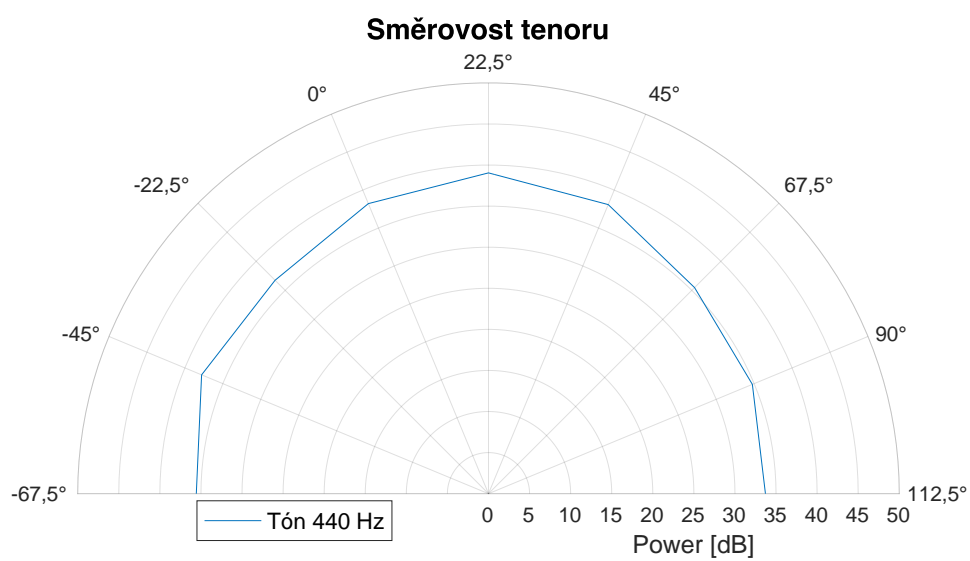
Obr. 3.24: Tenor – směrovost tónu H2



Obr. 3.25: Tenor – směrovost tónu F3



Obr. 3.26: Tenor – směrovost tónu C4



Obr. 3.27: Tenor – směrovost tónu A4

Shrnutí

Ve směrových charakteristikách soprán saxofonu vidíme, že nástroj vyzařuje celkem výrazněji do stran. Na souřadnici 0° je amplituda buď stejně vysoká nebo nižší než okolní. Tóny *G5* a *C6*, které se nachází ve vyšší poloze rozsahu nástroje jsou nejvíce rozprostřené do stran. To může být způsobeno zvedáním přídatných klapků na těle nástroje k dosažení vyšších tónů.

Směrová charakteristika nejvyššího z měřených tónů alt saxofonu na obr. 3.23 je podobně rozprostřená do stran jako nejvyšší tón hraný na soprán saxofon na obr. 3.19. Na oba nástroje se navíc tento tón hraje stejným hmatem. Tóny ze spodního a středního rozsahu (obr. 3.20, 3.21 a 3.22) alt saxofonu jsou téměř stejně silné do všech zobrazených směrů. Odchytky jsou do ± 5 dB. Tento rozdíl je jen těžce rozpoznatelný lidských uchem.

Tenor saxofon lze považovat také za směrově vyvážený jako v případě altu. Na jeho výsledných grafech se výška amplitudy na stupních od -45 do 45 mění o jednotky dB, tedy minimálně. Směrem dál od nulové osy pak klesají rychleji. Tuto klesající tendenci směrem za hráče lze nejlépe pozorovat na obr. 3.25 a 3.26.

Předpoklad o výraznějším vyzařování doprava nemůžeme podle výsledků potvrdit. Celkově lze říct, že ve výseči -45° až 45° se hodnoty amplitud drží na velmi podobné úrovni a jsou zde nejsilnější. Často potom u vyšších tónů amplitudy s vyšším úhlem od osy středu klesají rychleji. Nelze to však potvrdit na 100%. Některé hmaty otevírající přídatné klapky na různých místech nástroje můžou i ve vyšších polohách rozšířit směrové vyzařování právě do větších úhlů.

3.7 Porovnání inharmonicit a ostrosti

3.7.1 Inharmonicity

Inharmonicity v tónu jsou odchylky vyšších harmonických od frekvencí, na kterých se mají v ideálním případě nacházet. Teoreticky jsou totiž vyšší harmonické násobky té první. Pokud se ale naměřené liší od těch předpokládaných, vznikají v tónu inharmonicity, které lze vyjádřit v procentech.

Tab. 3.4: Inharmonicity soprán

Soprán pořadí harmonické	tón C4			tón A4		
	frekvence	předpokládaná frekvence	inharmonita v %	frekvence	předpokládaná frekvence	inharmonita v %
1	263,74			445,42		
2	527,47	527,47	0,00	890,84	890,84	0,00
3	785,35	791,21	0,75	1336,26	1336,26	0,00
4	1049,08	1054,95	0,56	1775,82	1781,68	0,33
5	1312,82	1318,68	0,45	2221,25	2227,11	0,26
6	1576,56	1582,42	0,37	2666,67	2672,53	0,22
7	1834,43	1846,15	0,64	3112,09	3117,95	0,19
8	2098,17	2109,89	0,56	3557,51	3563,37	0,16
9	2361,90	2373,63	0,50	3997,07	4008,79	0,29
10	2625,64	2637,36	0,45	4442,49	4454,21	0,26
11	2889,38	2901,10	0,41	4887,91	4899,63	0,24
12	3147,25	3164,84	0,56	5333,33	5345,05	0,22
13	3410,99	3428,57	0,52	5778,75	5790,48	0,20
14	3674,73	3692,31	0,48	6224,18	6235,90	0,19
15	3938,46	3956,04	0,45	6669,60	6681,32	0,18
16	4196,34	4219,78	0,56	7115,02	7126,74	0,16
17	4460,07	4483,52	0,53	7554,58	7572,16	0,23
18	4723,81	4747,25	0,50	8005,86	8017,58	0,15
19	4987,55	5010,99	0,47	8451,28	8463,00	0,14
20	5251,28	5274,73	0,45	8890,84	8908,42	0,20

Soprán pořadí harmonické	tón G5			tón C6		
	frekvence	předpokládaná frekvence	inharmonita v %	frekvence	předpokládaná frekvence	inharmonita v %
1	797,07			1078,39		
2	1600,00	1594,14	-0,37	2162,64	2156,78	-0,27
3	2397,07	2391,21	-0,24	3241,03	3235,16	-0,18
4	3200,00	3188,28	-0,37	4325,27	4313,55	-0,27
5	3997,07	3985,35	-0,29	5397,80	5391,94	-0,11
6	4794,14	4782,42	-0,24	6476,19	6470,33	-0,09
7	5591,21	5579,49	-0,21	7560,44	7548,72	-0,16
8	6394,14	6376,56	-0,27	8644,69	8627,11	-0,20
9	7191,21	7173,63	-0,24	9717,22	9705,49	-0,12
10	7988,28	7970,70	-0,22	10801,47	10783,88	-0,16
11	8785,35	8767,77	-0,20	11862,27	11862,27	0,00
12	9588,28	9564,84	-0,24	12940,66	12940,66	0,00
13	10385,35	10361,90	-0,23	14060,07	14019,05	-0,29
14	11188,28	11158,97	-0,26	15091,58	15097,44	0,04
15	11979,49	11956,04	-0,20	16234,43	16175,82	-0,36
16	12782,42	12753,11	-0,23	17295,24	17254,21	-0,24
17	13579,49	13550,18	-0,22	18379,49	18332,60	-0,26
18	14376,56	14347,25	-0,20	19446,15	19410,99	-0,18
19	15179,49	15144,32	-0,23	20512,82	20489,38	-0,11
20	15976,56	15941,39	-0,22	21626,37	21567,77	-0,27

V tabulkách inharmonicit je v prvním sloupci uvedené pořadí harmonické složky. V druhém jsou pak uvedeny naměřené frekvence harmonických složek nahraného tónu. Ve sloupci „předpokládaná frekvence“ jsou spočítány frekvence podle násobků naměřené 1. harmonické složky. Použitý vztah je následující:

$$f_{\text{předp.}} = f_1 * n \quad (3.3)$$

, kde f_1 je hodnota 1. harmonické a n je pořadí zvolené vyšší harmonické složky.

Tab. 3.5: Inharmonicity alt

Alt	tón E3			tón C4			
	pořadí harmonické	frekvence	předpokládaná frekvence	iharmonicita v %	frekvence	předpokládaná frekvence	iharmonicita v %
1		164,10			263,74		
2		328,21	328,21	0,00	527,47	527,47	0,00
3		498,17	492,31	-1,18	785,35	791,21	0,75
4		662,27	656,41	-0,88	1049,08	1054,95	0,56
5		826,37	820,51	-0,71	1312,82	1318,68	0,45
6		990,48	984,62	-0,59	1576,56	1582,42	0,37
7		1154,58	1148,72	-0,51	1840,29	1846,15	0,32
8		1324,54	1312,82	-0,88	2104,03	2109,89	0,28
9		1488,64	1476,92	-0,79	2361,90	2373,63	0,50
10		1652,75	1641,03	-0,71	2625,64	2637,36	0,45
11		1816,85	1805,13	-0,65	2889,38	2901,10	0,41
12		1980,95	1969,23	-0,59	3153,11	3164,84	0,37
13		2150,92	2133,33	-0,82	3416,85	3428,57	0,34
14		2315,02	2297,44	-0,76	3680,59	3692,31	0,32
15		2479,12	2461,54	-0,71	3938,46	3956,04	0,45
16		2643,22	2625,64	-0,67	4202,20	4219,78	0,42
17		2807,33	2789,74	-0,63	4465,93	4483,52	0,39
18		2971,43	2953,85	-0,59	4729,67	4747,25	0,37
19		3141,39	3117,95	-0,75	4993,41	5010,99	0,35
20		3305,49	3282,05	-0,71	5257,14	5274,73	0,33

Alt	tón A4			tón F5			
	pořadí harmonické	frekvence	předpokládaná frekvence	iharmonicita v %	frekvence	předpokládaná frekvence	iharmonicita v %
1		445,42			709,16		
2		890,84	890,84	0,00	1424,18	1418,32	-0,41
3		1330,40	1336,26	0,44	2133,33	2127,47	-0,27
4		1775,82	1781,68	0,33	2842,49	2836,63	-0,21
5		2221,25	2227,11	0,26	3557,51	3545,79	-0,33
6		2666,67	2672,53	0,22	4266,67	4254,95	-0,27
7		3106,23	3117,95	0,38	4975,82	4964,10	-0,24
8		3551,65	3563,37	0,33	5684,98	5673,26	-0,21
9		3997,07	4008,79	0,29	6400,00	6382,42	-0,27
10		4442,49	4454,21	0,26	7109,16	7091,58	-0,25
11		4882,05	4899,63	0,36	7830,04	7800,73	-0,37
12		5327,47	5345,05	0,33	8545,05	8509,89	-0,41
13		5772,89	5790,48	0,30	9260,07	9219,05	-0,44
14		6212,45	6235,90	0,38	9945,79	9928,21	-0,18
15		6663,74	6681,32	0,26	10672,53	10637,36	-0,33
16		7109,16	7126,74	0,25	11364,10	11346,52	-0,15
17		7548,72	7572,16	0,31	12079,12	12055,68	-0,19
18		8005,86	8017,58	0,15	12794,14	12764,84	-0,23
19		8445,42	8463,00	0,21	13497,44	13473,99	-0,17
20		8890,84	8908,42	0,20	14206,59	14183,15	-0,17

V posledním sloupci u každého z tónů nalezneme již vypočítanou hodnotu inharmonicity v procentech. Hodnoty jsou barevně rozlišeny – čím vyšší odchylka od hodnoty 0, tím více je buňka „zčervenala“. Použitý vztah je uveden níže:

$$I = (f_{\text{předp.}} - f_{\text{měř.}}) * \left(\frac{100}{f_{\text{měř.}}} \right) \quad (3.4)$$

,kde $f_{\text{předp.}}$ je hodnota předpokládané frekvence a $f_{\text{měř.}}$ je hodnota naměřené frekvence.

Tab. 3.6: Inharmonicity tenor

Tenor pořadí harmonické	tón H2			tón F3		
	frekvence	předpokládaná frekvence	iharmonicity v %	frekvence	předpokládaná frekvence	iharmonicity v %
1	123,08			175,82		
2	246,15	246,15	0,00	351,65	351,65	0,00
3	375,09	369,23	-1,56	527,47	527,47	0,00
4	498,17	492,31	-1,18	703,30	703,30	0,00
5	621,25	615,38	-0,94	879,12	879,12	0,00
6	744,32	738,46	-0,79	1054,95	1054,95	0,00
7	873,26	861,54	-1,34	1230,77	1230,77	0,00
8	996,34	984,62	-1,18	1406,59	1406,59	0,00
9	1119,41	1107,69	-1,05	1582,42	1582,42	0,00
10	1242,49	1230,77	-0,94	1758,24	1758,24	0,00
11	1365,57	1353,85	-0,86	1934,07	1934,07	0,00
12	1488,64	1476,92	-0,79	2109,89	2109,89	0,00
13	1611,72	1600,00	-0,73	2285,71	2285,71	0,00
14	1740,66	1723,08	-1,01	2461,54	2461,54	0,00
15	1863,74	1846,15	-0,94	2637,36	2637,36	0,00
16	1986,81	1969,23	-0,88	2813,19	2813,19	0,00
17	2109,89	2092,31	-0,83	2989,01	2989,01	0,00
18	2232,97	2215,38	-0,79	3164,84	3164,84	0,00
19	2361,90	2338,46	-0,99	3340,66	3340,66	0,00
20	2484,98	2461,54	-0,94	3516,48	3516,48	0,00

Tenor pořadí harmonické	tón C4			tón A4		
	frekvence	předpokládaná frekvence	iharmonicity v %	frekvence	předpokládaná frekvence	iharmonicity v %
1	263,74			445,42		
2	533,33	527,47	-1,10	890,84	890,84	0,00
3	797,07	791,21	-0,74	1336,26	1336,26	0,00
4	1060,81	1054,95	-0,55	1781,68	1781,68	0,00
5	1324,54	1318,68	-0,44	2227,11	2227,11	0,00
6	1594,14	1582,42	-0,74	2672,53	2672,53	0,00
7	1857,88	1846,15	-0,63	3117,95	3117,95	0,00
8	2121,61	2109,89	-0,55	3563,37	3563,37	0,00
9	2391,21	2373,63	-0,74	4008,79	4008,79	0,00
10	2654,95	2637,36	-0,66	4454,21	4454,21	0,00
11	2918,68	2901,10	-0,60	4899,63	4899,63	0,00
12	3182,42	3164,84	-0,55	5345,05	5345,05	0,00
13	3452,01	3428,57	-0,68	5790,48	5790,48	0,00
14	3715,75	3692,31	-0,63	6235,90	6235,90	0,00
15	3979,49	3956,04	-0,59	6681,32	6681,32	0,00
16	4243,22	4219,78	-0,55	7126,74	7126,74	0,00
17	4512,82	4483,52	-0,65	7572,16	7572,16	0,00
18	4776,56	4747,25	-0,61	8017,58	8017,58	0,07
19	5046,15	5010,99	-0,70	8463,00	8463,00	0,00
20	5304,03	5274,73	-0,55	8902,56	8908,42	0,07

Můžeme si povšimnout, že některé tóny mají odchylky do záporných čísel, hodnoty naměřených frekvencí jsou tedy vyšší než byly předpokládány. Kladné odchylky tedy značí, že změřené frekvence byly nižší než předpokládány. Povětšinou je nejvyšší odchylka hned na 2. harmonické složce. Dále pak pomalu klesá a opět po 4 – 5 harmonických opět vzroste. Tento úkaz lze pozorovat u tónů C_4 , A_4 a částečně G_5 soprán saxofonu, E_3 , C_4 a A_4 alt saxofonu a H_2 tenor saxofonu. Nejvyšší nahrané tóny jednotlivých nástrojů mají hodnoty inharmonicity spíše nepravidelné. Velmi zajímavým úkazem, kterého si nelze nevšimnout, jsou zcela, respektive téměř zcela, chybějící inharmonicity v tónech F_3 a A_4 tenor saxofonu. Tento úkaz je velmi překvapivý a bylo by vhodné jej prozkoumat více, pomocí více měření společně s dalšími tóny k porovnání.

3.7.2 Ostrost

Ostrost je jedna z psychoakustických veličin ovlivňující barvu zvuku. Uvádí se v jednotkách acum podle latinského „acumen“, tedy ostrost. Hodnoty se často pohybují pod číslem 1, uvádí se tedy většinou v deciacumech. V případě této práce však byly zvoleny acumy z důvodu vyšších výsledných hodnot. Tato veličina nabývá vyšších hodnot s větším počtem vyšších frekvencí zastoupených ve spektru.[12]

Tab. 3.7: Ostrost

Ostrost [acum]		
Nástroj	Dynamika	
Soprán	forte	piano
tón C4	0,975	0,809
tón A4	1,075	0,733
tón G5	1,112	0,821
tón C6	1,337	1,009
Alt	forte	piano
tón G3	1,679	1,205
tón C4	1,201	0,913
tón A4	1,390	0,983
tón F5	1,576	1,094
Tenor	forte	piano
tón H2	0,912	0,727
tón F3	1,002	0,712
tón C4	0,935	0,614
tón A4	1,245	0,789

Podle měření lze tedy usoudit, že nástroj saxofon má tóny spíše ostřejší, hodnoty však klesají se snižující se dynamikou i frekvencí tónu. V nižší dynamice jsou hodnoty nižší podle předpokladu z kapitoly 1.7, tedy že počet vyšších harmonických s nižší dynamikou klesá. Tento jev lze pozorovat i na spektrogramech tónů na obr. 3.15. V tónech sopránů v dynamice *forte* lze pozorovat nárůst hodnot ostrosti se zvyšující se frekvencí tónů. To však nelze s jasnou pravidelností tvrdit i o altu a tenoru. Hodnoty se u všech tónů jednotlivých nástrojů drží velmi blízko sobě, tudíž lze říci, že saxofony mají svou charakteristickou ostrost, která se nejvíce mění spíše s různou dynamikou hry, než s výškou tónu. Také z výsledků měření vyplývá, že alt saxofon má v obou dynamikách největší ostrost ze všech třech měřených nástrojů.

Závěr

Práce popisuje 3 typy saxofonů a jejich zvuk. Zaměřuje se na jejich vznik, způsob hry, společné vlastnosti i vzájemné rozdíly. Zkoumány byly tři nejběžnější velikosti saxofonů a to soprán, alt a tenor saxofon, všechny od japonského výrobce Yamaha. Zvukové vzorky byly zaznamenány hrou jednoho hráče s co nejpodobnějším nátiskem a dynamikou v bezodrazové komoře.

Tóny byly vybrány dva stejně znějící na všechny tři nástroje a dále další dva na každý nástroj pro doplnění pokrytí co největšího rozsahu každého z nástrojů. Dohromady tedy dvanáct tónů, které jsou navzájem porovnány pomocí zobrazení jejich frekvenčních spekter a hodnot amplitud harmonických složek. Tyto spektra jsou dále rozšířeny o LPC analýza každého z tónů pro zobrazení formantových oblastí ve spektru tónů.

Výsledky těchto analýz nám dokázaly, proč je saxofon jeden z nejprůraznějších akustických nástrojů. Jeho spektra jsou plná bez vynechaných harmonických složek. Míra šikmosti složek ve spektrech je nízká. Tóny s vyšší frekvencí se vyznačují také vyšší špičatostí harmonických složek, naopak tóny na nižších frekvencích jsou více ploché. Výrazných bylo několik prvních harmonických, těžiště spektra tedy leží právě na nich. Další harmonické složky tvořily 2 – 3 formantové oblasti, u kterých se potvrdilo, že jsou typické právě pro konstrukci saxofonu. Podle formantů také šlo částečně rozlišit, zda byl použit hmat pomocí jedné či dvou rukou.

Dále se práce věnuje zobrazení a srovnání směrových charakteristik jednotlivých typů saxofonů a zobrazuje je v polárním grafu. V práci jsou zobrazeny grafy všech dvanácti porovnávaných tónů. Směrové vyzařování saxofonů je v literatuře popsáno zatím velmi málo, zde bylo možné se odpíchnout pouze od předpokladů podobného vyzařování jako mají jiné dřevěné dechové nástroje (klarinet, hoboj). Výsledky nám ukázaly velmi odlišné směrové vyzařování v závislosti na hloubce tónu a použitých hmatů, tak stejně na typu saxofonu. Pro praktické použití lze využít poznatek na nevyrovnané směrové vyzařování, vzhledem k tomu že saxofon velmi často při hře využívá téměř celý svůj rozsah. Dalo by se ale říct, že do všech směrů vyzařuje přibližně stejně, až směrem za hráče se intenzita snižuje. Pro konkrétnější pokrytí tohoto tématu by bylo potřeba se například zaměřit na větší množství zkoumaných tónů jednoho typu saxofonu.

Ke konci práce je věnována pozornost inharmonicitám vyšších harmonických složek v tónech každého saxofonu. Z těchto výsledků plyne, že saxofony obecně nemají vysokou míru inharmonicity ve svém zvuku, tudíž se dá říci, že se dobře harmonicky a zvukově pojí mezi sebou i s jinými nástroji. Dále je však změřena ostrost saxofonů, které dosahuje poměrně vysokých hodnot. To společně s plným spektrem přispívá k maskování okolních nástrojů, které mají tyto hodnoty nižší. Je pravděpodobné, že na všechny měření měl do jisté míry vliv lidský faktor, počínaje nestejnými hlasitostmi nahrávaných tónů a konče možným nepřesným natočením nástroje na měřicí mikrofon. Tyto nepřesnosti by se daly eliminovat například použitím roboticky tvořeným tónem na fyzický nástroj, bez jakýchkoli nechtěných pohybů mimo osy mikrofonního pole.

Literatura

- [1] Saxofon. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA):Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021.11.09]. Dostupné z: <<https://cs.wikipedia.org/wiki/Saxofon>>
- [2] Saxophone - Musical instrument guide. Yamaha [online]. Japan: Yamaha, 2019/03/25 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <https://www.yamaha.com/en/musical_instrument_guide/saxophone/>.
- [3] PEARSON, Bruce. Standard of Excellence Book 3 - Eb Alto Saxophone. San Diego: Kjos Music Company, Neil A, 1995. ISBN 0849759811.
- [4] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 2. dopl. vyd. Praha: Akademie múzických umění, 2008. ISBN 978-80-7331-127-8
- [5] JANOUSĚK, Ivo. ABC akustiky pro hudební praxi. Praha: Supraphon, 1979. ISBN 02-203-79.
- [6] Saxophone acoustics: an introduction [online]. Sydney: The University New South Wales, 2019 [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <<https://www.phys.unsw.edu.au/jw/saxacoustics.html>>.
- [7] NAVE, Rod. Conical Air Column. In: HyperPhysics [online]. Atlanta: Georgia State University, 2000 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Waves/clocol2.html>>
- [8] Linear predictive coding. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Linear_predictive_coding>
- [9] GEIST, Bohumil. *Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: Muzikus, c2005. ISBN 80-86253-31-7.
- [10] SMĚKAL, Zdeněk. Analýza signálů a soustav-BASS. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. ISBN 978-80-214- 4716-5.
- [11] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. MATLAB: začínáme se signály. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 271 s. : obr., čb. fot., tabulky, grafy. ISBN 80-7300-200-0.
- [12] MELKA, Alois. Základy experimentální psychoakustiky. Praha: Nakladatelství AMU, 2005. ISBN 80-7331-043-0.

A Elektronické přílohy

Ve složkách jsou vloženy .pdf soubory s odkazem na složku s přílohou. Složka je nahrána na disk z důvodu nadměrné velikosti.

A.1 MATLAB

V příloze lze nalézt použité skripty z MATLABu, verzi 2021b, pro spektrální a směrovou analýzu a to pro všechny tři nástroje. Ve složce *AudioSmer* se nachází skripty a audio vzorky k analýze směrového vyzařování a tvorbu polárních grafů. Ve složce *AudioAnalyza* jsou potom zbývající skripty pro analýzu spekter, LPC analýzu a vypočtení ostrosti.

A.2 Audio

V příloze lze nalézt zvukové soubory ve formátu .wav. Ve složce jsou nahrané audio vzorky z bezodrazové komory. Mikrofony 1 – 9 jsou pro směrovou analýzu. Mikrofon s číslem 10 je pak měřicí mikrofon k analýzám spektra. Upravené audio vzorky, které jsou použity k analýzám jsou ve složkách přílohy *MATLAB*.

A.3 Tabulky a grafy

V příloze lze nalézt tabulky hodnot použitých v práci. Dále se zde nacházejí i použité grafy. Vše je ve formátu .pdf kvůli bezztrátové kompresi.