



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

### ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## ANALÝZA SPEKTRA A SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY ELEKTRO-AKUSTICKÉHO VIOLONCELLA Z KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

#### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jana Vysloužilová

#### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. et Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2023

# Bakalářská práce

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

**Studentka:** Jana Vysloužilová

**ID:** 230350

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2022/23

## NÁZEV TÉMATU:

### **Analýza spektra a směrovosti elektro-akustického violoncella z kompozitních materiálů**

#### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Zaznamenejte, změřte a vyhodnoťte vybrané tóny hrané na tradiční violoncello ze dřeva a na inovované elektro-akustické violoncello bez rezonanční skříně vyrobené navíc z kompozitů. Vyberte reprezentativní smyky a polohy. Soustředte se na barvy generované v různé dynamice. U inovovaného violoncella změřte jeho prvotní akustickou barvu a barvu, která se změnila při snímání snímačem a zapojením dalších efektů. Porovnejte spektra, zastoupení harmonických složek a jejich intenzitu, ale hlavně formantové oblasti. Porovnejte i směrové vyzařování nástrojů. Výstupem budou komparační tabulky spekter, rezonančních pásem a směrových laloků. Zjistěte, kde má inovované violoncello jiné a kde shodné vlastnosti.

#### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-297-8
- [2] FLETCHER, Neville H., ROSSING, Thomas D. The Physics of Musical Instruments, Second Edition, Springer, © 1998 Springer Science+ Business Media New York Originally published by Springer Science+ Business Media, Inc. in 1998 Softcover reprint of the hardcover 2nd edition 1998, ISBN 978-1-4419-3120-7

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 26.5.2023

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

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

#### **UPOZORNĚNÍ:**

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

## **Abstrakt**

Tato práce se zaměřuje na zvukové vlastnosti inovovaného violoncella vyrobeného pomocí 3D tisku z umělých materiálů od firmy MyCello v porovnání s tradičním violoncellem. V teoretické části se práce zabývá akustickými vlastnostmi, stavbou a snímáním obou violoncell. Praktická část poté popisuje průběh měření a zpracování výsledků a vyhodnocuje výstupy. Analyzuje se spektrum, formantové oblasti a směrovost nástrojů.

## **Klíčová slova**

Violoncello, spektrální analýza, směrová charakteristika, formantové oblasti, LPC, FFT

## **Abstract**

This academic paper focuses on the sound properties of an inovated 3D printed cello made from synthetic materials by the company MyCello as compared to traditional cello. The theoretical part of this paper deals with acoustics, anatomy and recording of both types of cello. The practical part then describes the process of measuring and processing of the data and evaluates the outcomes. The spectrum, formant frequencies and sound radiation are analyzed in this paper.

## **Keywords**

Cello, spectral analysis, sound radiation, formant frequencies, LPC, FFT

## **Bibliografická citace**

VYSLOUŽILOVÁ, Jana. *Analýza spektra a směrové charakteristiky elektro-akustického violoncella z kompozitních materiálů*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/144612>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Jana Vysloužilová</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>230350</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Bakalářská práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2022/23</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Analýza spektra a směrové charakteristiky elektro-akustického violoncella z kompozitních materiálů.</i>

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 autor 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 jsem si plně vědoma 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: 24. května 2023

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce MgA. et Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za odborné konzultace, metodické rady a konzultace při zpracování bakalářské práce. Také děkuji firmě MyCello za propůjčení nástroje a vstřícnou spolupráci.

V Brně dne: 24. května 2023

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1. ANATOMIE A AKUSTIKA KLASICKÉHO VIOLONCELLA .....</b>	<b>11</b>
1.1 ANATOMIE KLASICKÉHO VIOLONCELLA .....	12
1.2 AKUSTIKA KLASICKÉHO VIOLONCELLA.....	13
1.2.1 Vyzářování.....	13
1.2.2 Vliv materiálu strun na akustiku .....	14
<b>2. ANATOMIE A AKUSTIKA INOVOVANÉHO VIOLONCELLA.....</b>	<b>15</b>
2.1 ANATOMIE INOVOVANÉHO VIOLONCELLA.....	15
2.1.1 Snímače.....	17
<b>3. POROVNÁNÍ VIOLONCELL .....</b>	<b>19</b>
<b>4. SPEKTRUM, FORMANTY A SMĚROVOST NÁSTROJE .....</b>	<b>20</b>
4.1 SPEKTRUM .....	20
4.2 FORMANTY.....	21
4.3 SMĚROVOST .....	21
<b>5. MĚŘENÍ .....</b>	<b>22</b>
5.1 SNÍMÁNÍ VIOLONCELLA.....	22
5.2 PRAKTICKÝ POSTUP MĚŘENÍ.....	22
5.2.1 Měřené tóny .....	24
<b>6. ANALÝZA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....</b>	<b>25</b>
6.1 MATLAB .....	25
6.2 SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA .....	25
6.2.1 Spektrální analýza tónů se stejnou dynamikou .....	26
6.2.2 Spektrální analýza tónů v různých dynamikách .....	36
6.3 FORMANTOVÉ OBLASTI.....	51
6.4 KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA SNÍMAČE .....	54
6.5 SMĚROVOST .....	55
6.6 CELKOVÉ POROVNÁNÍ .....	57
<b>7. ZÁVĚR.....</b>	<b>61</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>62</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>63</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>64</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	<i>Ilustrace Helmholtzova pohybu na struně (převzato z [4] a upraveno)</i> .....	11
1.2	<i>Měřené violoncello</i> .....	13
2.1	<i>Konstrukce nástroje MyCello</i> .....	16
2.2	<i>Kobylka a doladovače</i> .....	16
2.3	<i>Potenciometry pro regulaci hlasitosti, basů a výšek</i> .....	17
5.1	<i>Ilustrační nákres rozestavění mikrofonů při nahrávání</i> .....	23
5.2	<i>Struny použité při měření</i> .....	24
6.1	<i>Spektrogram prázdné struny – a na tradičním violoncelle s dusítkem</i> .....	26
6.2	<i>Spektrogram prázdné struny – a na tradičním violoncelle</i> .....	27
6.3	<i>Spektrogram prázdné struny – a na violoncelle z kompozitních materiálů nahraného akusticky</i> .....	27
6.4	<i>Spektrogram prázdné struny – a na violoncelle z kompozitních materiálů nahraného linkou</i> .....	28
6.5	<i>Spektrogram prázdné struny – d na tradičním violoncelle s dusítkem</i> .....	29
6.6	<i>Spektrogram prázdné struny – d na tradičním violoncelle</i> .....	29
6.7	<i>Spektrogram prázdné struny – d na violoncelle z kompozitních materiálů nahrané akusticky</i> .....	30
6.8	<i>Spektrogram prázdné struny – d na violoncelle z kompozitních materiálů nahrané linkou</i> .....	30
6.9	<i>Spektrogram prázdné struny G na tradičním violoncelle s dusítkem</i> .....	31
6.10	<i>Spektrogram prázdné struny G na tradičním violoncelle</i> .....	32
6.11	<i>Spektrogram prázdné struny G na violoncelle z kompozitních materiálů nahrané akusticky</i> .....	32
6.12	<i>Spektrogram prázdné struny G na violoncelle z kompozitních materiálů nahrané linkou</i> .....	33
6.13	<i>Spektrogram flážoletu a'' na tradičním violoncelle s dusítkem</i> .....	34
6.14	<i>Spektrogram flážoletu a'' na tradičním violoncelle</i> .....	34
6.15	<i>Spektrogram flážoletu a'' na violoncelle z kompozitních materiálů nahrané akusticky</i> .....	35
6.16	<i>Spektrogram flážoletu a'' na violoncelle z kompozitních materiálů nahrané linkou</i> .....	35
6.18	<i>Spektrogram tónu F na tradičním violoncelle – piano</i> .....	36
6.19	<i>Spektrogram tónu F na tradičním violoncelle s dusítkem – piano</i> .....	37
6.20	<i>Spektrogram tónu F na inovovaném violoncelle – piano</i> .....	37
6.21	<i>Spektrogram tónu F na inovovaném violoncelle nahraného linkou– piano</i> .....	38
6.22	<i>Spektrogram tónu F na tradičním violoncelle – mezzoforte</i> .....	38
6.23	<i>Spektrogram tónu F na tradičním violoncelle s dusítkem – mezzoforte</i> .....	39
6.24	<i>Spektrogram tónu F na inovovaném violoncelle – mezzoforte</i> .....	39
6.25	<i>Spektrogram tónu F na inovovaném violoncelle nahraného linkou– mezzoforte</i> .....	40
6.26	<i>Spektrogram tónu F na tradičním violoncelle – forte</i> .....	40
6.27	<i>Spektrogram tónu F na tradičním violoncelle s dusítkem – forte</i> .....	41
6.28	<i>Spektrogram tónu F na inovovaném violoncelle – forte</i> .....	41
6.29	<i>Spektrogram tónu F na inovovaném violoncelle nahraného linkou– forte</i> .....	42
6.30	<i>Spektrogram tónu c na tradičním violoncelle – piano</i> .....	42
6.31	<i>Spektrogram tónu c na tradičním violoncelle s dusítkem – piano</i> .....	43
6.32	<i>Spektrogram tónu c na inovovaném violoncelle – piano</i> .....	43
6.33	<i>Spektrogram tónu c na tradičním violoncelle – mezzoforte</i> .....	44
6.34	<i>Spektrogram tónu c na tradičním violoncelle s dusítkem – mezzoforte</i> .....	44
6.35	<i>Spektrogram tónu c na inovovaném violoncelle – mezzoforte</i> .....	45
6.36	<i>Spektrogram tónu c na tradičním violoncelle – forte</i> .....	45
6.37	<i>Spektrogram tónu c na tradičním violoncelle s dusítkem – forte</i> .....	46
6.38	<i>Spektrogram tónu c na inovovaném violoncelle – forte</i> .....	46
6.39	<i>Spektrogram tónu d' na tradičním violoncelle – piano</i> .....	47
6.40	<i>Spektrogram tónu d' na tradičním violoncelle s dusítkem – piano</i> .....	47



6.41	<i>Spektrogram tónu d' na inovovaném violoncelle – piano</i> .....	48
6.42	<i>Spektrogram tónu d' na tradičním violoncelle – mezzoforte</i> .....	48
6.43	<i>Spektrogram tónu d' na tradičním violoncelle s dusítkem – mezzoforte</i> .....	49
6.44	<i>Spektrogram tónu d' na inovovaném violoncelle – mezzoforte</i> .....	49
6.45	<i>Spektrogram tónu d' na tradičním violoncelle – forte</i> .....	50
6.46	<i>Spektrogram tónu d' na tradičním violoncelle s dusítkem – forte</i> .....	50
6.47	<i>Spektrogram tónu d' na inovovaném violoncelle – forte</i> .....	51
6.48	<i>Formantové oblasti prázdné struny G</i> .....	52
6.49	<i>Formantové oblasti prázdné struny d</i> .....	53
6.50	<i>Formantové oblasti prázdné struny a</i> .....	53
6.51	<i>Formantové oblasti tónu e na tradičním violoncelle</i> .....	54
6.51	<i>Experimentálně zjištěná frekvenční charakteristika</i> .....	55
6.53	<i>Směrovost tónu G2 na tradičním violoncelle (nahore) a violoncelle z kompozitních materiálů (dole)</i> .....	56
6.54	<i>Směrovost tónu A4 na tradičním violoncelle (nahore) a violoncelle z kompozitních materiálů (dole)</i> .....	56
6.55	<i>Kmitočtová charakteristika 1.-8. harmonické složky tónu g</i> .....	58
6.56	<i>Kmitočtová charakteristika 1.-8. harmonické složky tónu d'</i> .....	58

# ÚVOD

Bakalářská práce se věnuje porovnání zvukových vlastností tradičního dřevěného violoncella a jeho inovované obdoby bez rezonanční skříně vyrobené z kompozitního materiálu. Porovnávají se výsledky snímání z bezodrazové komory, pomocí kterých se zjišťují vlastnosti spektra, harmonické složky, směrovost vyzařování nástroje a jeho formantové oblasti. Tyto vlastnosti poskytují informace o rozdílnostech v barvě nástroje. Pro vyhodnocení zvukových vzorků je použito prostředí MATLAB. Výstupy z tohoto programu jsou spektrogramy, grafy spektra s vyznačenou obálkou pro analýzu formantů a grafy směrovosti.

Cílem práce je porovnat a zhodnotit rozdíly ve spektru a směrovosti vyzařování klasického violoncella a violoncella z kompozitních materiálů, přičemž by měla hodnotit vybrané reprezentativní tóny a různé způsoby hry a druhy smyků. Práce spadá tematicky do oblasti akustiky a může být vhodnou referencí i pro hudebníky, či potenciální zákazníky firmy MyCello.

V první kapitole se práce věnuje úvodu do historie klasického violoncella a následně jeho stavbě a akustickým vlastnostem, zároveň je blíže rozebráno vyzařování nástroje a vliv materiálu strun na barvu a vlastnosti zvuku.

Druhá kapitola obsahuje opět informace o anatomii a akustice, tentokrát u violoncella z kompozitních materiálů. Dále byla popsána i problematika snímačů.

Třetí kapitola teoreticky porovnává obě violoncella z konstrukčního hlediska, z hlediska samotné hry, a také subjektivní barvy zvuku nástrojů.

Ve čtvrté kapitole jsou vysvětleny parametry, které jsou v rámci práce na violoncellech hodnoceny, tedy spektrum, formantové oblasti a směrovost.

Pátá kapitola se věnuje měření, a to nejprve z teoretického pohledu, následně pak popisuje praktický průběh měření nástrojů v bezodrazové komoře. Jsou v ní obsaženy také informace o konkrétních nahráných tónech, které byly vybrány jako reprezentativní pro účely této práce.

Šestá kapitola obsahuje konečnou analýzu výsledků měření. Popisuje práci s programem MATLAB a jednotlivé kódy. Dále v podkapitolách rozebírá jednotlivé výstupy z programu – spektrogramy, formanty z grafů FFT a LPC spektra a grafy směrovosti, snaží se najít parametry snímače inovovaného violoncella a vysvětlit jejich vliv přenos zvuku a všechny výsledky mezi sebou porovnává.

# 1. ANATOMIE A AKUSTIKA KLASICKÉHO VIOLONCELLA

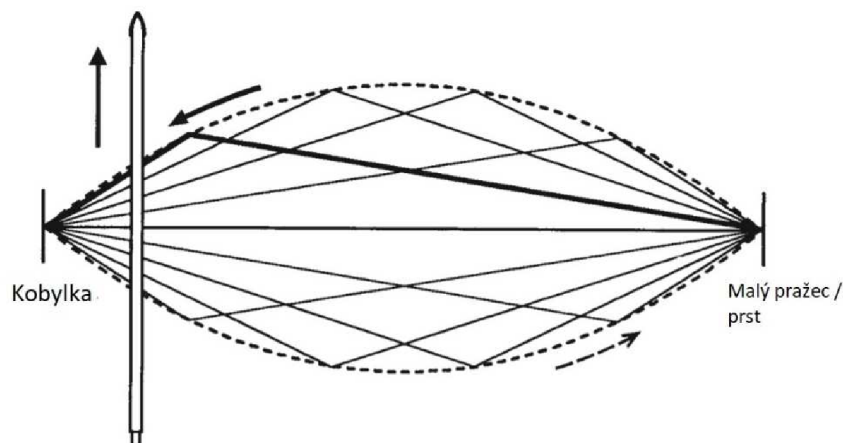
Violoncello je strunný smyčcový hudební nástroj, který se nejčastěji vyskytuje v klasické hudbě.

Za předchůdce violoncella bývají považovány nástroje z rodiny viola da braccio, především nástroj viola da gamba. Ten však violoncellem nebyl nahrazen, ale hrálo se na něj až do konce 18. století. Oba nástroje tedy existovaly dlouhou dobu vedle sebe. Předchůdci violoncella a samotné violoncello ve svých počátcích plnili spíše funkci doprovodnou a zastávali basovou linku. Původní model, který se od novodobého poněkud liší, dnes nazýváme barokní violoncello a jeho historie je poněkud komplikovaná. [1]

Pojem violoncello se objevil kolem roku 1665, avšak velikost nástroje nebyla standardizovaná až do období mezi lety 1707-1710, kdy byl uznán jako univerzální model Antonia Stradivariho, zvaný „Forma B“. Obecné odlišnosti barokního violoncella od moderního jsou především struny ze střev, kratší hmatník, kratší a užší basový trápec, užší duše a většinou absence bodce. Významný rozdíl byl také ve smyčci, jelikož barokní smyčec má, na rozdíl od moderního, konkávní zakřivení, což významně ovlivňuje hru. Smyčec se např. chová zcela jinak při vyvíjení tlaku u žabky a u špičky.

Violoncello se začalo projevovat jako sólový nástroj právě s nástupem baroka konkrétně koncem 17. století, kdy byly v Itálii složeny první kompozice pro sólové violoncello. [2]

Tvorba zvuku u hraní smyčcem spočívá ve střídavém přilnutí a uvolnění struny ve vztahu ke smyčci, tyto fáze se na struně pravidelně střídají a vytváří tak periodický pohyb. Tento jev se nazývá Helmholtzův pohyb.



Obrázek 1.1 *Ilustrace Helmholtzova pohybu na struně (převzato z [4] a upraveno)*

## 1.1 Anatomie klasického violoncella

Klasické moderní violoncello by se dalo rozdělit zhruba do 70 částí. Pro účely této práce zde bude popsáno několik základních, přičemž postupujeme odshora dolů.

Nahoře je hlava se šnekovitým zakončením, pod ní čtyři doladovací kolíky, většinou vyráběné z černého ebenového dřeva. Doladovací kolíky se v baroku využívaly k běžnému ladění, u dnešního violoncella však slouží především pro výměnu strun a doladování v případě, že dojde k výraznému povolení strun a nestačí spodní doladovače. Následuje malý pražec, na který navazuje krk, přes jehož délku se rozprostírá hmatník. Hmatník se vyrábí výhradně z ebenu. Tento materiál se volí pro svou odolnost a hmotnost, jelikož jako jediný dokáže snést mechanické namáhání, které je na hmatník vyvíjeno při hře. Hmatník nemívá přesně půlkruhový tvar, ale „láme“ se mezi dvěma nejnižšími strunami. Tohle nalomení poskytuje struně C větší prostor pro kmitání. Přes hmatník jsou natažené struny, které napíná uprostřed kobylka a vedou ke struníku se spodními doladovači. Kobylka u akustiky violoncella hraje velkou roli. Na rozdíl od kobylky u houslí a viol je violoncellová kobylka postavena na dvou „nožičkách“, díky čemuž je více vzdálená od těla nástroje. Kobylky se vyrábí ze speciálního druhu javorového dřeva. Poté následuje velký pražec a žalud s bodcem.

Dále bude popsáno tělo violoncella. To se skládá z přední a zadní desky a lubů, tedy bočních částí. Přední deska bývá vyrobena ze dvou spojených částí borového či smrkového dřeva a má v sobě dva otvory ve tvaru f. Zadní deska je vyrobena podobně, ale většinou z javorového či topolového dřeva. Vevnitř mezi deskami jsou potom další dva komponenty, a to duše a basový trámec. Jak už název napovídá, duše je velmi kritickou částí nástroje a hraje zásadní vliv na jeho zvuk. Ve své podstatě se jedná pouze o dřevěný kolík, který je uvnitř těla nástroje umístěn tak, že přenáší vibrace mezi přední a zadní deskou. Je držen pouze tlakem, který je vyvíjen na přední desku kobylkou, přičemž ta samotná je připevněna pouze tlakem strun. Z tohoto důvodu je velmi důležité při výměně strun postupovat maximálně po dvou strunách zároveň. V případě, že se z nástroje odstraní všechny struny, kobylka ani duše již nebudou drženy. Velmi opatrně se také musí postupovat při jakékoli manipulaci s kobylkou, aby nedošlo k uvolnění duše. Manipulace je však u kobylky často nutná, jelikož se při stálém doladování strun může vyklonit z původního úhlu.[3]



Obrázek 1.2 *Měřené violoncello*

## 1.2 Akustika klasického violoncella

Klasické violoncello se vyrábí běžně z dřevěného masivu, jak už bylo řečeno v úvodu kapitoly. Má rezonanční skříň, která značně ovlivňuje vyzařování a zvukovou barvu, což také můžeme během této práce pozorovat.

### 1.2.1 Vyzařování

Excitátor u violoncella představuje většinou prst či smyčec, ten vytváří pohyb oscilátoru – tedy struny. Při vychýlení struny v konkrétním místě potom dochází ke vzniku příčného vlnění. V případě drnknutí jde o impulzní buzení, a naopak ke kontinuálnímu buzení dochází smykem.

Pokud vychýlíme strunu drnknutím v polovině, dostaneme trojúhelníkový tvar, přičemž ve spektru budou převažovat liché harmonické tóny. Při drnknutí v  $1/5$  vznikne asymetrický tvar, který má ve spektru minima v násobcích 5. harmonické.

Během hry smyčcem je struna buzena kontinuálně a pokud je rychlost pohybu smyčce konstantní, dochází k tzv. Helmholtzovu pohybu, přičemž nejvyšší bod ohybu struny se pohybuje po dráze charakterizované krajními polohami kmitů.

U reálné struny nastávají také neharmonicity. Harmonické složky se vlivem ohybové tuhosti struny posouvají směrem k vyšším kmitočtům. Neobvyklý vliv na zvukový výsledek má technika flažoletů, při které dochází k utlumení některých konkrétních frekvenčních složek ve spektru kvůli nedokonalému přitisknutí struny k hmatníku. Jedná se o takzvané přirozené harmonie, kdy při přiložení prstu na konkrétní místo na struně lze zahrát tón o kvintu nebo o oktávu vyšší. Další způsob hry, který ovlivňuje barvu tónu je hraní s dusítkem. Dusítko je většinou gumový předmět, který se upevňuje na kobytku nástroje a slouží k jeho ztišení a změně barvy. Zmenšení hlasitosti je způsobeno omezením vibrací kobytky, což se projeví utlumením vyšších harmonických složek.

Barva je tedy prázdnější a dala by se tak srovnat se zvukem nástroje bez rezonanční skříně.

Profil výsledného tónu je vždy ovlivněn vztahem excitátoru a oscilátoru, a to především napínací silou, rychlostí úderu, tlakem smyku a místem buzení. Energetické ztráty vzniklé vlivem vnějšího a vnitřního tření, vyzářováním a přenosem kmitů kobylkou, také ovlivňují charakter tónu. Konkrétně kobylka tvoří mezi vrchní deskou rezonanční skříně a strunou pevnou vazbu. Spojením kobylky a horní desky dochází k rozkmitání této desky při hře. Horní a spodní deska jsou poté spojeny pomocí duše, která přenáší kmity i na spodní desku, a tím dochází k rozkmitání celé ozvučné skřínky. Kobylka má také u violoncella vlastní rezonance v oblasti mezi 1 a 2 kHz.

Rezonátorem u violoncella je tedy ozvučná skřín, konkrétně spodní a horní deska a luby. Rezonuje však i krk nástroje, vzduch v dutinách a v otvorech tvaru f. Rezanční vlastnosti ozvučné skřínky ovlivňují kvalitu tónu, a to frekvenční strukturou a úrovní vlastních rezonančních módů. U některých tónů může docházet k tomu, že jsou kmity kobylky a struny zpětně ovlivněny módem ozvučnice. V případě, že kmitočet módu se blíží kmitočtu hraného tónu, nastane „strhávání“ kmitů struny do frekvence, kterou má mód rezonátoru. To způsobí zdvojení základního tónu. Na struně nastanou rázy, jelikož dvě blízké frekvence se začnou sčítat a tím dochází k zvukovému jevu, který se dá srovnat s tremolem – tedy pravidelným změnám amplitudy tónu. Tomuto zvukovému jevu říkáme vlčí tóny, jež se vyznačují značnou nestabilitou. U violoncella jej nejčastěji pozorujeme ve vyšších polohách na struně G.[5][6]

### **1.2.2 Vliv materiálu strun na akustiku**

Tři druhy strun, které se na violoncelle typicky používají jsou ze střev, plastu a oceli. Většina strun vyrobených z kteréhokoli ze jmenovaných materiálů je ovinuta vrstvou kovu.

Nejstarším typem jsou struny ze střev (převážně ovčích). Vyrábí se i bez kovového vinutí, ty se však využívají především na historických barokních violoncellech. Struny ze střev mají měkčí a teplejší zvuk, avšak jsou velmi náchylné na změny vlhkosti a teploty okolního vzduchu. Mají také nejmenší životnost.

Struny z plastu jsou vždy ovinuté kovem. Zvukové vlastnosti jsou v některých ohledech srovnatelné se strunami ze střev, avšak nedokážou zcela napodobit jejich přirozený zvuk. Chovají se lépe při změnách teplot a vlhkosti. Barva zvuku se dá popsat jako kulatá a měkká.

Kovové struny jsou nejběžnější z vyjmenovaných druhů. Bývají nejodolnější. Nejčastěji jsou také ovinuté další vrstvou kovu a jejich barva bývá měkká a zvučná. Při rozkmitání dokážou dlouho vibrovat a dobře drží zvuk. Pro hru smyčcem ovšem nechceme příliš velký dozvuk, a proto se upravují např. právě ovinutím pro jeho zkrácení.

## **2. ANATOMIE A AKUSTIKA INOVOVANÉHO VIOLONCELLA**

Tato kapitola se věnuje porovnání rozdílů ve stavbě a zvukových vlastnostech inovovaného violoncella od firmy MyCello a klasického violoncella.

### **2.1 Anatomie inovovaného violoncella**

MyCello, jakožto nástroj tištěný na 3D tiskárně má celé tělo vyrobené z jednoho typu plastu, tím je plast PET-G. Podle specialisty na CAD a 3D tisk pro MyCello má právě tento plast nejlepší akustické vlastnosti.

Violoncello z 3D tisku má konstrukci, která by se na první pohled mohla přirovnat k elektrickým violoncellům (obrázek 2.1). Stejně jako klasické violoncello má hmatník, kobylku, struny a bodec. Dále místo klasického těla rezonanční skříně má pouze hrudní opěrku a opěrku pro levou ruku a dále dvě kolenní opěrky v místech, kde na klasickém violoncelle nalezneme prohlubně ve tvaru C. Místo hlavy se šnekovitým zakončením a ladících kolíků má MyCello pouze víčko hlavy. Rozdíl je také ve spodních doladovačích, které by se daly přirovnat k doladovačům u kytary (obrázek 2.2). MyCello je také opatřeno komponenty navíc, a to snímačem pod kobylkou a dílem, kde se nachází elektronika. Konkrétně to je 9 voltová baterie, ekvalizér, otvory malý a velký jack konektor a vypínač. Nástroj je také vybaven posuvnými potenciometry pro regulaci nižších a vyšších frekvencí a hlasitosti, viz. obrázek 2.3. Potom také můžeme nalézt na MyCello části jako otvor pro držák na mobil, držáky na tužku, gumu, smyčec a další.



Obrázek 2.1 *Konstrukce nástroje MyCello*



Obrázek 2.2 *Kobylka a doladovače*





Obrázek 2.3 Potenciometry pro regulaci hlasitosti, basů a výšek

### 2.1.1 Snímače

Při reprodukování hry na inovované violoncello hraje velkou roli snímač, proto je třeba uvést, jaké typy snímačů existují, jak fungují a důvod, proč violoncello používá konkrétní snímač.

Rozdělujeme dva základní typy snímačů, a to magnetické a piezoelektrické. Magnetické, na rozdíl od piezoelektrických, nefungují s jakýmkoliv strunami, ale pouze s kovovými. Jak již název napovídá, fungují totiž pomocí magnetu a cívky. Existují dva nejčastější druhy magnetických snímačů. Prvním je tzv. singlecoil, který se skládá buď z jednoho magnetu, či z více magnetů pod každou strunou a jedné cívky. Jsou náchylnější na zachycení šumů a brumů. Druhý typ je tzv. humbucker. Ten má dvě cívky s opačným vinutím, díky čemuž se odečtou, a tedy potlačí nežádoucí zvukové signály. [7]

Piezoelektrické snímače potom fungují na základě piezoelektrického jevu, tedy snímají tlak, který vytváří vibrace strun a převádí jej na elektrický signál.

Pro elektrická violoncella a také pro violoncello z 3D tiskárny se využívají většinou piezoelektrické snímače. Většina magnetických snímačů, které lze běžně pořídit, jsou snímače na elektrické kytary. Díky jejich přizpůsobení jsou struny v rovině. Na violoncelle struny kopírují zaoblený tvar hmatníku, proto by s takovýmto snímačem nebyly kompatibilní. Pro violoncello se dá použít jiný typ magnetických snímačů, kdy máme dva menší snímače umístěné mezi struny C a G, a dále mezi D a A. Bývají však poněkud objemné, což nevádí pouze vizuálně, ale především proto, že mohou překážet při hře.

Kvůli těmto faktorům se na MyCelle využívá piezoelektrický snímač, avšak jeho nevýhodou je, že současně s vibracemi strun se přenáší i veškeré další vibrace v nástroji. To se projevuje např. přenášením perkusivních zvuků při ťuknutí do nástroje.

### 3. POROVNÁNÍ VIOLONCELL

Tato kapitola se věnuje teoretickému porovnání obou zkoumaných violoncell z pohledu hráče a posluchače.

Při prvním vyzkoušení nástroje od firmy MyCello jsou samozřejmě poznat značné rozdíly. Avšak poměrně dobře je vyřešená konstrukce kostry nástroje. Nástroj obsahuje všechny části, kterých se hráč běžně dotýká, popř. o které se opírá při hře, tím pádem není třeba si zvykat na jiný způsob držení a usazení při hře. Když si nástroj poslechneme v akustické formě, slyšíme jasně zvukový rozdíl. I bez měření se dá říct, že nástroj bez rezonanční skříně produkuje méně sytý tón, kde je znatelná první harmonická složka a složky, které u běžného violoncella dodávají jeho barvu, jsou utlumeny. Při hře může hráč také pozorovat, že u violoncella z 3D tisku mnohem víc dochází k vibracím v oblasti hmatníku a krku nástroje. To může být způsobeno několika faktory. Prvním by mohl být materiál nástroje, dále potom hmotnost a stabilita violoncella. Je očividné, že violoncello s ozvučnou skříní vyrobenou z dřevěného masivu bude poněkud bytelnější než violoncello, které má pouze „kostru“ namísto běžného těla a je vyrobeno z plastového materiálu. Vytáhneme-li na nástroji MyCello bodec, je možné si povšimnout toho, že nástroj nestojí tak stabilně, jak je hráč zvyklý u tradičního violoncella. Pokud se hráč o nástroj více opře, popř. vyvine větší tlak při hře smyčcem, nástroj se značně pohybuje a je více poddajný a náchylný k ohybům.

## 4. SPEKTRUM, FORMANTY A SMĚROVOST NÁSTROJE

Tato kapitola bude zaměřena na teoretické přiblížení parametrů, které jsou v této práci měřeny a rozebírány. Konkrétně se tedy jedná o spektrum analyzované ze spektrogramu, formantové oblasti zjištěné pomocí metody LPC a směrovost nástroje, tedy jeho vyzářování v prostoru.

Základem pro výpočet spektra a z něj i formantů nástroje je rychlá Fourierova transformace tedy FFT. Díky ní je možné z periodického signálu určit Fourierovu řadu, která nám udává frekvence a amplitudy složek ve spektru. Pro základní pochopení principu Fourierovy řady je důležité uvést základní vzorec pro její výpočet. Rovnice pro určení funkce  $F(t)$  s periodou  $T$  vyjádřené pomocí Fourierovy řady je tedy:

$$F(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi n \frac{t}{T}) + b_n \sin(2\pi n \frac{t}{T})], \quad (4.1)$$

kde  $n$  je přirozené číslo a v případě určování spektra zvukového signálu určuje pořadí harmonické složky a koeficienty  $a_n$  a  $b_n$  se určí jako [10]:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) dt, \quad (4.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos\left(2\pi n \frac{t}{T}\right) dt, \quad (4.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin\left(2\pi n \frac{t}{T}\right) dt. \quad (4.4)$$

### 4.1 Spektrum

Pokud se v případě akustiky mluví o spektru, je tím myšleno zvukové spektrum. To představuje všechny frekvenční složky zvuku. Většina zvuků neobsahuje pouze jednu základní frekvenci. Všechny hudební nástroje, stejně jako lidský hlas, mají kromě základní frekvenční složky, která určuje tón zvuku, také tzv. vyšší harmonické složky, tedy celočíselné násobky první harmonické. Právě tyto složky určují barvu nástroje a pomocí rozložení amplitud jednotlivých složek, pak můžeme od sebe jednotlivé nástroje rozeznat. Mimo vyšší harmonické složky se ve spektru většiny zvuků objevují i hluky a šumy, což jsou zvuky s nepravidelným průběhem spektra. Spektrum obecně můžeme považovat za závislost amplitudy měřené veličiny na frekvenci. V tomto případě je tou veličinou hladina intenzity zvuku. V bakalářské práci bude spektrum vyhodnocováno

pomocí spektrogramu, který je vygenerován v programu MATLAB. Spektrogram je vizuální zobrazení časové změny frekvencí ve spektru signálu. Kromě frekvence a času také obsahuje intenzitu zvukového signálu. V grafech z prostředí MATLAB je intenzita znázorněna pomocí barevných změn.

## 4.2 Formanty

Formanty jsou oblasti lokálních maxim ve spektru, které jsou většinou způsobené rezonancí těla nástroje. Díky nim tedy můžeme zjistit rezonanční vlastnosti nástrojů, či lidského hlasu. Pro jejich získání ze zvukových vzorků bude opět použit MATLAB. Konkrétně je využito LPC, tedy Linear Predictive Coding, což je typ kódování, který se často využívá při analýze lidského hlasu a popisuje rezonance vznikající uvnitř lidského těla, v našem případě těla nástroje. Jedná se o algoritmus, který analyzuje zvukový signál, komprimuje jej a následně opět obnoví. Ve výsledném signálu je zobrazena spektrální obálka. [8]

Princip lze popsat rovnicí [9]:

$$\hat{s}(n) = \sum_{k=1}^p a_k s(n-k), \quad (4.5)$$

kde,  $k$  je pořadí vzorku signálu, který se dá odhadnout lineární kombinací buzení a hodnot  $p$  předchozích vzorků,  $\hat{s}(n)$  je odhad členu, jehož pořadí je určeno koeficientem  $n$ . Hodnota  $a_k$  určuje samotnou charakteristiku a je hledána tak, aby byla následující hodnota co nejblíže lineární kombinaci předchozích [9].

U tradičního violoncella jsou typické první formanty kolem 100 až 250 Hz a dále mezi 300 až 500 Hz, proto je důležité se na tyto oblasti zaměřit, protože jejich absence významně ovlivňuje barvu zvuku. [11]

## 4.3 Směrnost

Směrností je v rámci akustiky myšleno vyzařování zvukového signálu nástroje v prostoru. Každý hudební nástroj, tedy i lidský hlas, vyzařuje jiným způsobem a směr se liší i při hraní různých tónů na stejný nástroj. Většinou je směrnost dána především rezonanční skříň nástroje. Jelikož MyCello rezonanční skříň nemá, bude na směrnosti možné pozorovat značné rozdíly. Pro zjištění směrnosti je využit kód v programu MATLAB, který vyhodnocuje zvukové vzorky z 9 mikrofonů rozestavených do 180°. Výsledek této analýzy je graf směrnosti, na kterém lze pozorovat vyzařování nástroje různých harmonických složek jednoho tónu, což poskytne informaci nejen právě o směrnosti, ale také o tom, jakou barvu nástroj pro posluchače má.

## 5. MĚŘENÍ

Tato kapitola popisuje teoretickou přípravu a průběh měření zvukových vzorků pro následnou analýzu.

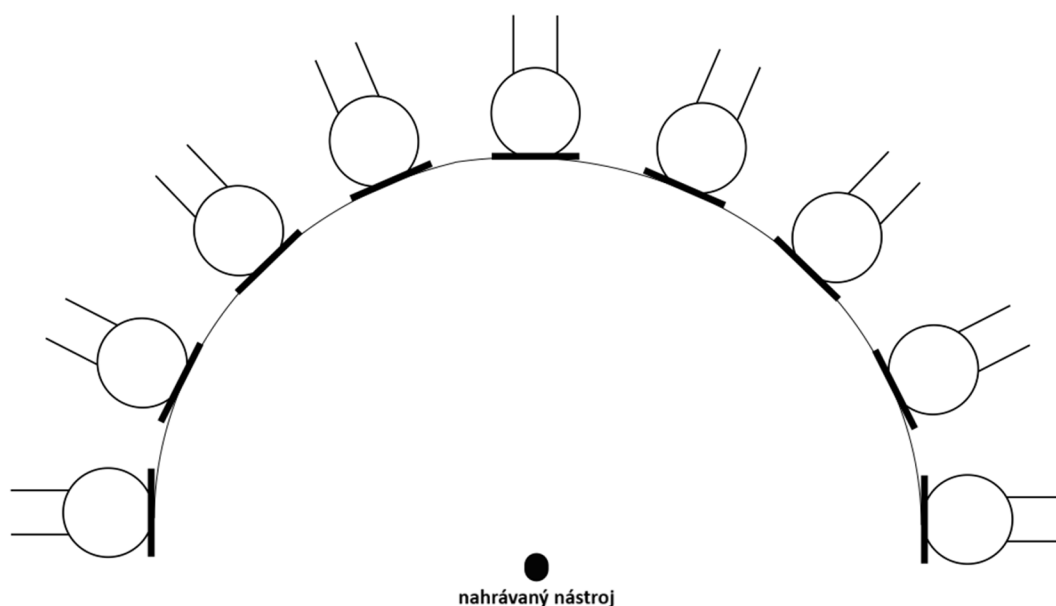
### 5.1 Snímání violoncella

Při snímání nás zajímá směrovost vyzařování nástroje. U violoncella se dá obecně říct, že vyzařuje především dopředu před hráče, a to jak ve vodorovné, tak ve svislé rovině. Nejčastěji se tedy mikrofon při snímání polohuje zepředu ke strunám ve výšce mezi koncem hmatníku a kobylkou, tedy zhruba v úrovni, kde hráč tahá smyčcem.

Výjimkou u vyzařování violoncella jsou frekvence mezi 250 a 300 Hz a dále i mezi 800 a 1000 Hz, jelikož dochází k výraznému vyzařování spodní deskou, tedy dozadu za hráče. V nízkých frekvencích, zhruba do 150 Hz je vyzařování téměř všesměrové. Pro kmitočty vysoké nad 2000 Hz se směr rozděluje a dále závisí na odrazu od plochy, na které violoncello stojí. [5]

### 5.2 Praktický postup měření

Pro účely semestrální práce byly provedeny 3 měření. Měřilo se klasické violoncello a violoncello inovované akusticky a následně i zapojené přes DI box. Violoncello z 3D tisku mělo původně struny z mírně jiného materiálu než klasické violoncello. Proto byly pro účely měření pořízeny stejné struny, aby výsledky měření nebyly zkresleny. Jedná se o ocelové struny s niklovým vinutím (viz obr. 5.2) První dvě měření probíhala v bezodrazové místnosti pomocí devíti všesměrových kondenzátorových mikrofonů, rozmístěných do půlkruhu. Violoncello bylo umístěno do vzdálenosti 1 m od mikrofonů a všechny mikrofony se nastavily do výšky 120 cm. Pro měření směrovosti se používaly kondenzátorové mikrofony AUDIX TM1. Prostřední mikrofon směřující po ose na violoncello se využíval na hodnocení spektra. Jedná se o mikrofon Bruel&kjaer typu 4189. Mikrofony poté byly XLR kabelem přivedeny na A/D převodník, pomocí kterého se signál převedl do prostředí Cubase v režijní místnosti. Mikrofony byly nastaveny pomocí tónového kalibrátoru na stejnou úroveň. Komunikace mezi režijní místností a hráčem probíhala pomocí talkback kanálu. Nahrané měření bylo vyexportováno jako zvukové stopy ve formátu wav a následně zpracováno v programu MATLAB.



Obrázek 5.1 Ilustrační náčrt rozestavení mikrofonů při nahrávání

Při měření byla snaha vytvářet smyčcem co nejpravidelnější tahy. Tedy podobný attack, intenzitu i místo na struně, kde smyčcem bylo taženo. To bylo vždy přibližně 5 cm od kobyly.

Měření inovovaného violoncella bylo ještě jednou provedeno v nahrávacím studiu v budově fakulty. Neakusticky bylo využito nahrávání přes DI box, ze kterého byl signál přiveden na vstup mixážního pultu a následně nahrán do programu Cubase. Na potenciometrech low a high na violoncelle byly nastaveny střední hodnoty.

Během tohoto měření probíhalo zároveň i další měření mikrofony, přičemž jeden byl umístěn těsně před kobytku nástroje a druhý zezadu na krk pro zjištění rezonance materiálu nástroje. Mikrofony byly přivedeny na převodník a z nich šel signál opět přes mixážní pult a do programu Cubase.

Při měření inovovaného violoncella se narazilo na problém v jeho slabém vyzařování. Vzorky nahrané ze stejné dálky jako u klasického violoncella mají velmi vysokou hladinu šumu, způsobenou vlastním šumem mikrofonu, na kterém musela být zvýšena hodnota gainu, aby vzorky vůbec byly slyšitelné. To narušuje čitelnost spektrogramů. Proto při druhém měření byl mikrofon umístěn přímo ke kobyly, což způsobuje obsah více harmonických složek, které z větší dálky nejsou slyšet, avšak dají se v grafu poměrově odlišit od těch, které jsou hlasitější a vyzáří tedy do větší vzdálenosti a s touto znalostí jsou vzorky analyzovány. Důležitým faktorem pro objektivní posouzení výsledků je i pozorování toho, jak dlouho jednotlivé složky zůstanou hrát po zastavení smyčce.



Obrázek 5.2 *Struny použité při měření*

### 5.2.1 Měřené tóny

Tónů pro měření bylo zvoleno pro zajištění přesnosti více, ve výsledku se dále vybíralo na základě reprezentativnosti a také dle toho, jaké tóny se podařilo dobře nahrát. Při hře smyčcem může docházet k mnoha nepravidlostem a měření není úplně exaktní i vlivem únavy hráče.

Změřené tóny tedy jsou vždy prázdné struny a od nich vždy kvarta. Na struně G byla také změřena sexta, jelikož se na ní na akustickém violoncelle nachází tzv. vlčí tón. Dále byly na strunách D a A změřeny flažolety v oktávách.



## 6. ANALÝZA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Tato kapitola se věnuje vyhodnocení naměřených zvukových vzorků.

### 6.1 MATLAB

Analýza změřených nahrávek byla prováděna v prostředí MATLAB.

Vzorky byly zpracovány pomocí kódu ze zdroje [12] upraveného pro účely této konkrétní analýzy. Základem výpočtu a vykreslení spektrogramů a LPC grafů je FFT analýza, která převádí vzorky z časové do frekvenční oblasti. Vzorky však před provedením FFT musí být upraveny pomocí datového okna, které upravuje signál, aby nedošlo ke zkreslení. Následně jsou nalezeny jednotlivé harmonické složky a výsledkem je tedy graf spektra.

Spektrogram je zpracován pomocí kódu, který provede na omezeném časovém úseku analýzu pomocí FFT a na vyobrazeném grafu je tedy vidět časový průběh změn ve spektrální hustotě v celém frekvenčním spektru.

Formantové oblasti jsou vypočítány pomocí lineární predikce – tedy LPC. Výsledkem je tedy graf s vyznačenou spektrální obálkou.

Pomocí dalšího kódu ze zdroje [12] je provedeno porovnání směrovosti nástrojů pro prvních 12 harmonických složek daného tónu. V kódu byly nejprve načteny kalibrační soubory a následně zpracovány nahrané vzorky. Výstupem jsou dva grafy směrovosti pro prvních 6 a druhých 6 složek, na nichž lze vidět jednotlivé úhly a poměry směřování tónů v horizontální rovině.

### 6.2 Spektrální analýza

Ze stop nahraných kondenzátorovým mikrofonem Bruel&kjær byly vystříhány jednotlivé tóny. Ty se následně zpracovaly pomocí funkce v MATLABu, kde se dá vyobrazit spektrogram. Spektrogramy jednotlivých tónů budeme porovnávat mezi tradičním violoncellem a violoncellem z kompozitních materiálů nahraným akusticky a linkou. Na osách grafů máme frekvenci v Herzích, čas v sekundách a barevným rozlišením určujeme modul výkonu signálu.

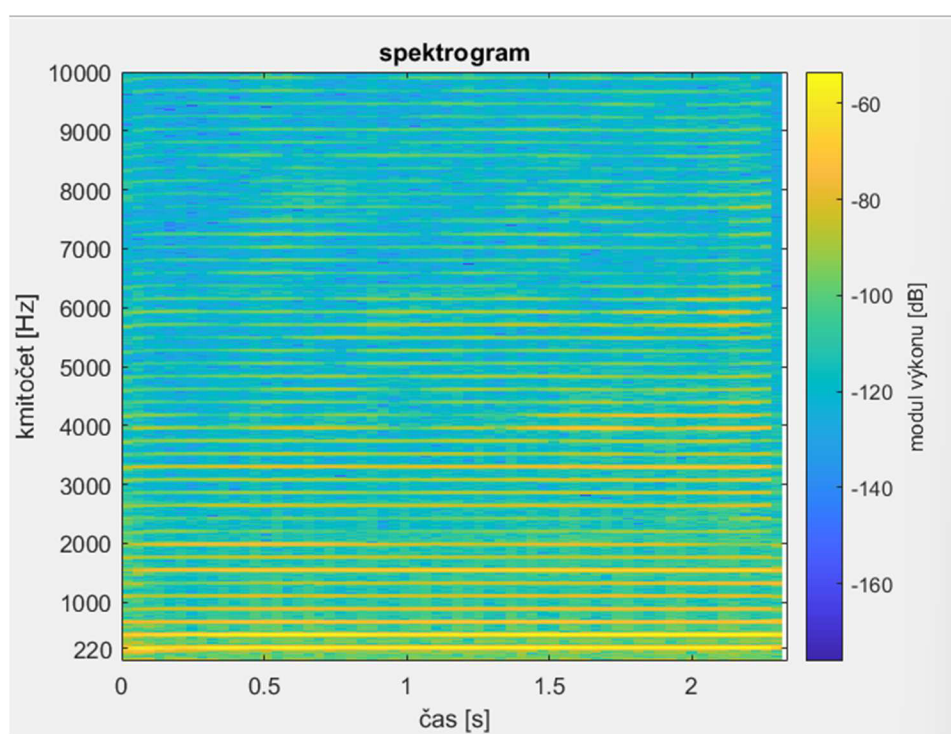
Budou porovnávány vzorky tradičního violoncella nahraného s dusítkem a bez dusítka a violoncella z plastového materiálu nahraného mikrofonem a linkou. Dále se porovnejí nahrávky v různých dynamikách a nahrávky MyCella nahrané u kobyly a ze zadu krku pro přibližnou představu o jeho rezonanci při hře. Pro zjištění kmitočtové charakteristiky snímače se porovná spektrum několika vybraných vzorků.

Měřítka na grafech jsou vždy upravena pro optimální čitelnost – tedy tóny o nižším kmitočtu, jejichž harmonické složky nedosahují do vysokých kmitočtů mají omezené měřítko.

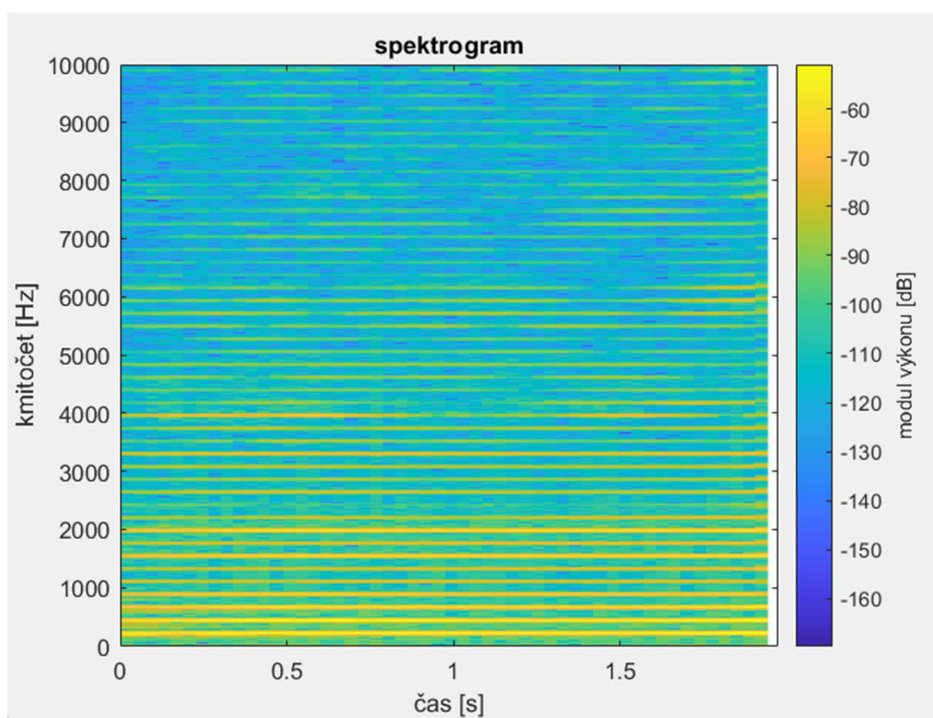
Nejprve jsou porovnány pro každý tón čtyři vzorky, a to klasické violoncello s dusítkem a bez dusítka a následně inovované violoncello nahrané mikrofonem a přes DI box. Pro tato porovnání byly zvoleny prázdné struny na tónech a, d, G a flažolet v tónu a'.

Vždy na prvním spektrogramu v pořadí při analýze každého tónu je pro referenci a lepší orientaci přidána na ose kmitočtu hodnota první harmonické složky. Dále jsou porovnány vzorky klasického violonocella opět s dusítkem a bez něj a inovovaného violonocella nahraného mikrofonem v různých dynamikách. V tomto případě se analyzují tóny F, c, d'.

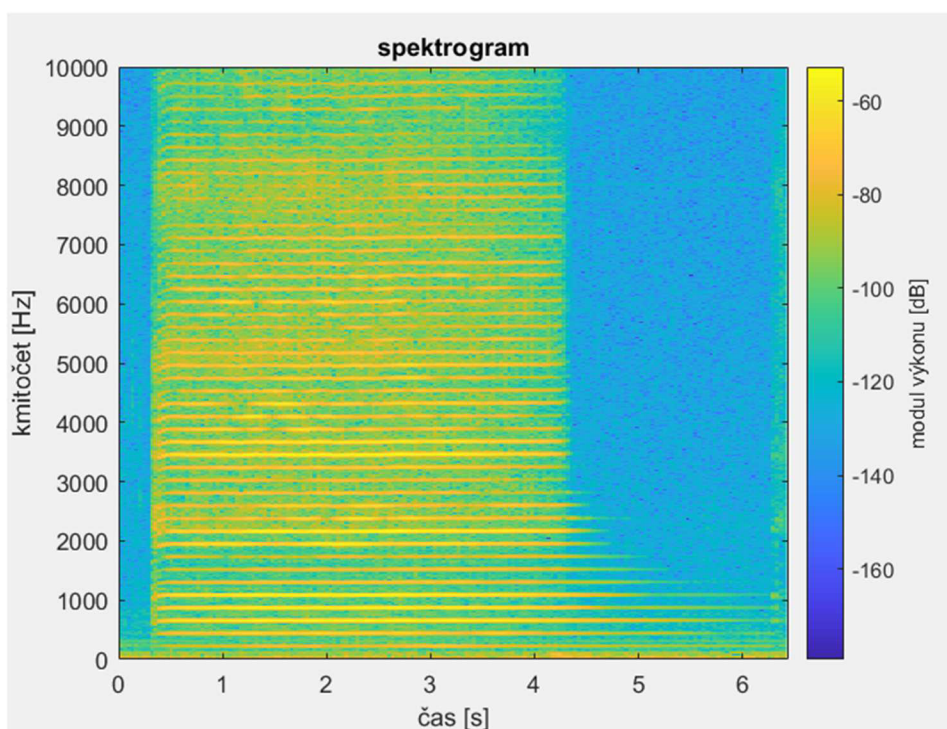
### 6.2.1 Spektrální analýza tónů se stejnou dynamikou



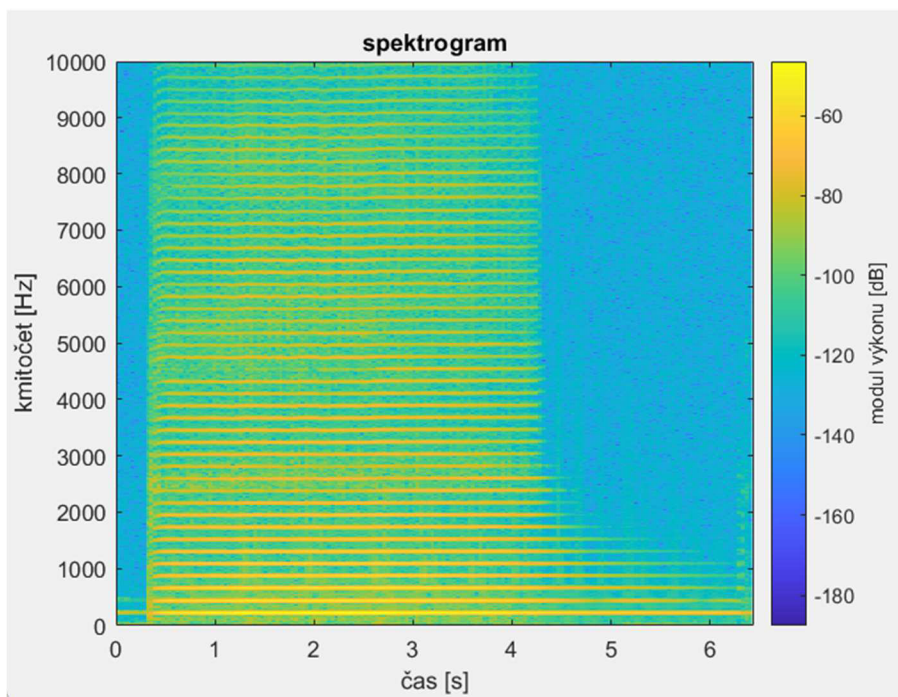
Obrázek 6.1 *Spektrální analýza tónů se stejnou dynamikou – a na tradičním violoncelle s dusítkem*



Obrázek 6.2 *Spektrogram prázdné struny – a na tradičním violoncelle*



Obrázek 6.3 *Spektrogram prázdné struny – a na violoncelle z kompozitních materiálů nahraného akusticky*

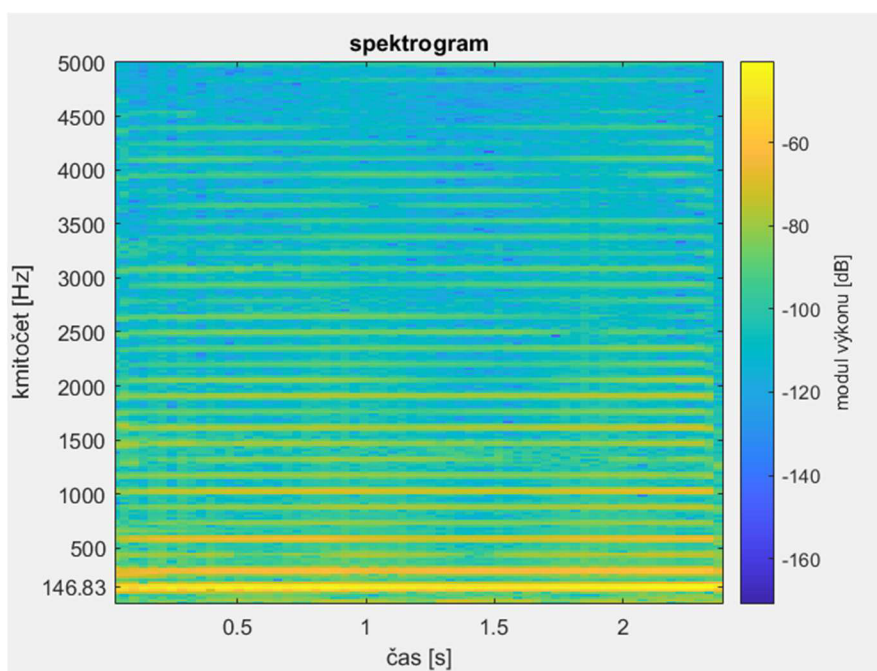


Obrázek 6.4 *Spektrogram prázdné struny – a na violoncelle z kompozitních materiálů nahraného linkou*

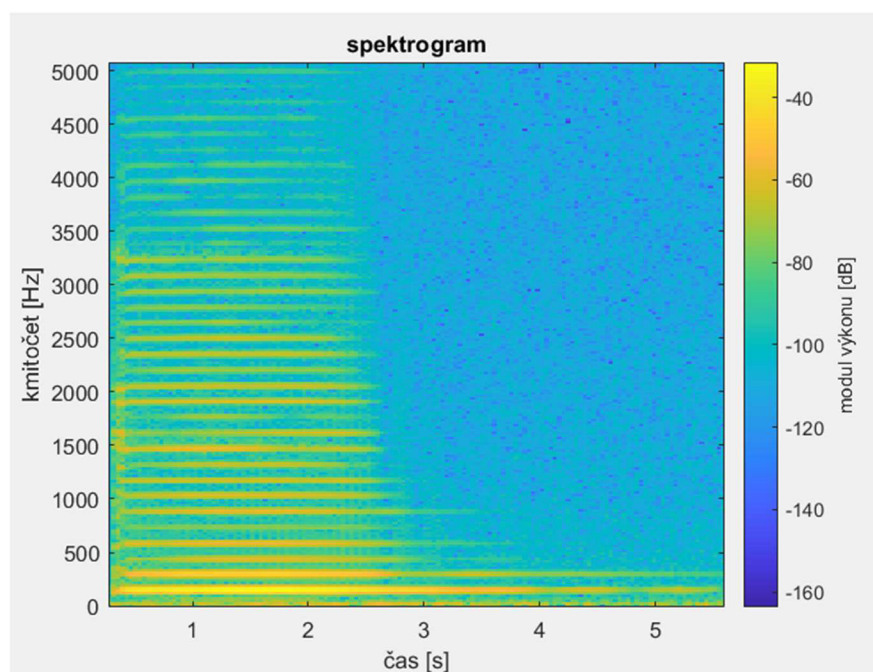
Až na předpokládaný jev rychlejšího poklesu hustoty výkonu s rostoucími harmonickými má spektrum s dusítkem a bez dusítka podobné hodnoty. První 2-3 harmonické jsou silné, na dalších nastává mírný útlum a potom je výrazná 7.složka, u klasického violoncella i 9. složka.

U inovovaného violoncella je tomu jinak, jsou výrazné spíše 3. až 5. složka, které jak je vidět, zní i po zastavení smyčce. Velmi nevýrazná je nosná složka, což může vyústit v efekt, kdy tón bude znít o oktávu výše, než by ve skutečnosti měl.

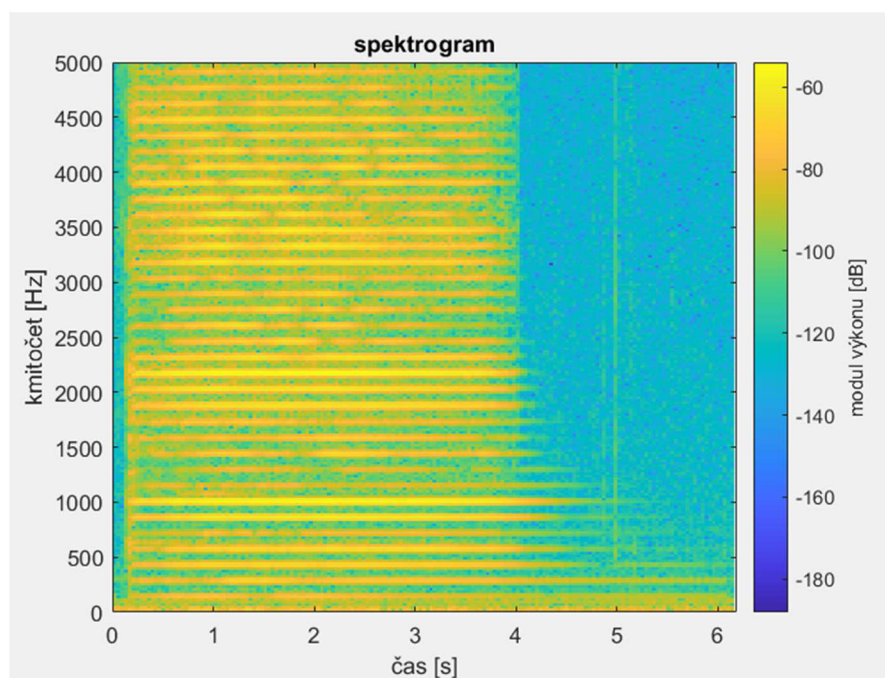
Při nahrávání linkou klesá intenzita složek postupně se zvyšující se harmonickou složkou a při zastavení smyčce také doznívají postupně od vyšších harmonických až po nosnou složku.



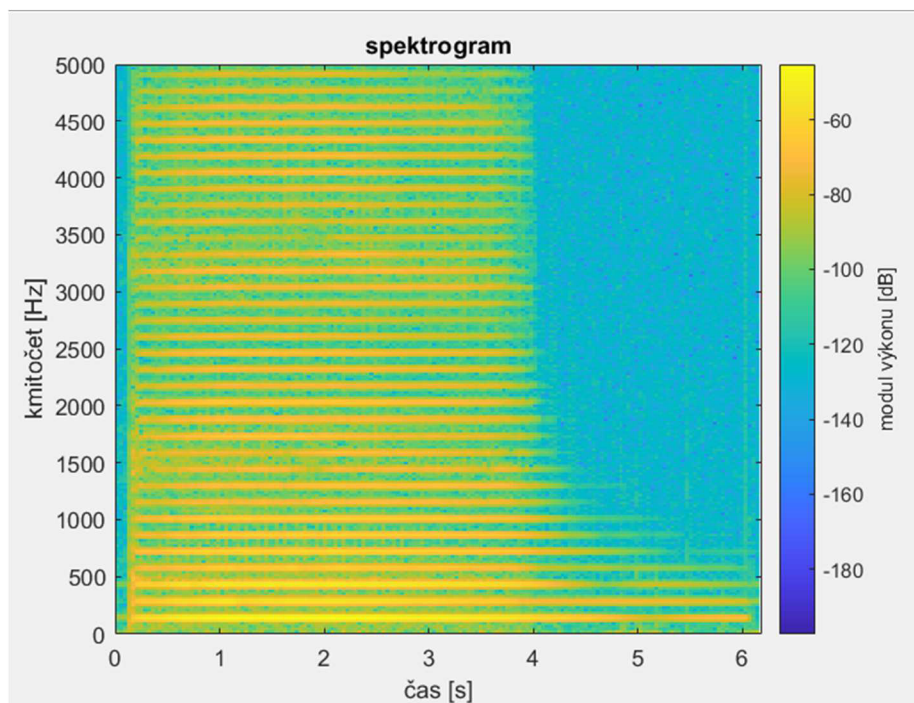
Obrázek 6.5 *Spektrogram prázdné struny – d na tradičním violoncelle s dusítkem*



Obrázek 6.6 *Spektrogram prázdné struny – d na tradičním violoncelle*



Obrázek 6.7 *Spektrogram prázdné struny – d na violoncelle z kompozitních materiálů nahrané akusticky*

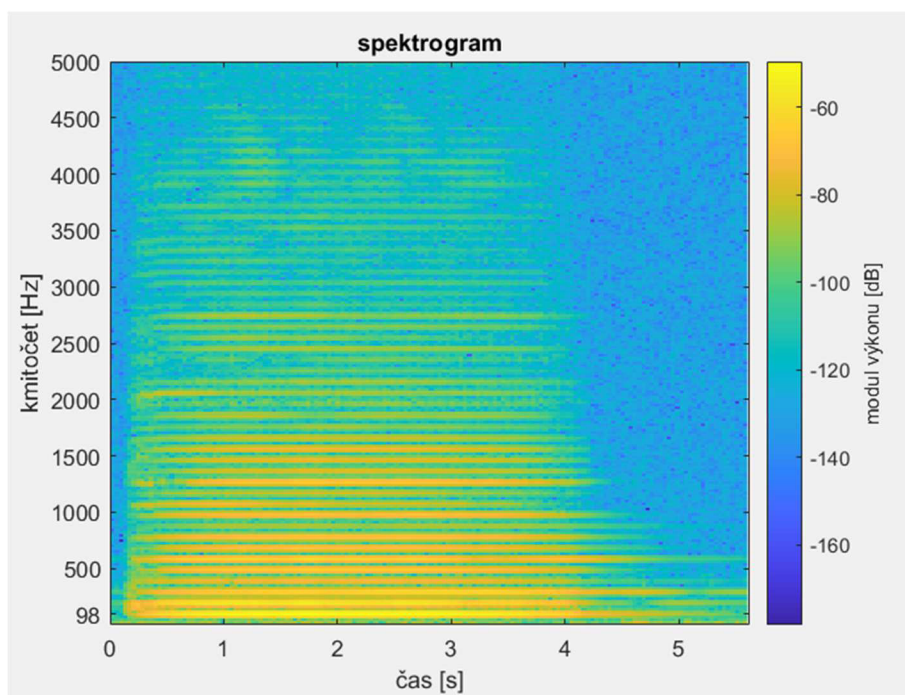


Obrázek 6.8 *Spektrogram prázdné struny – d na violoncelle z kompozitních materiálů nahrané linkou*

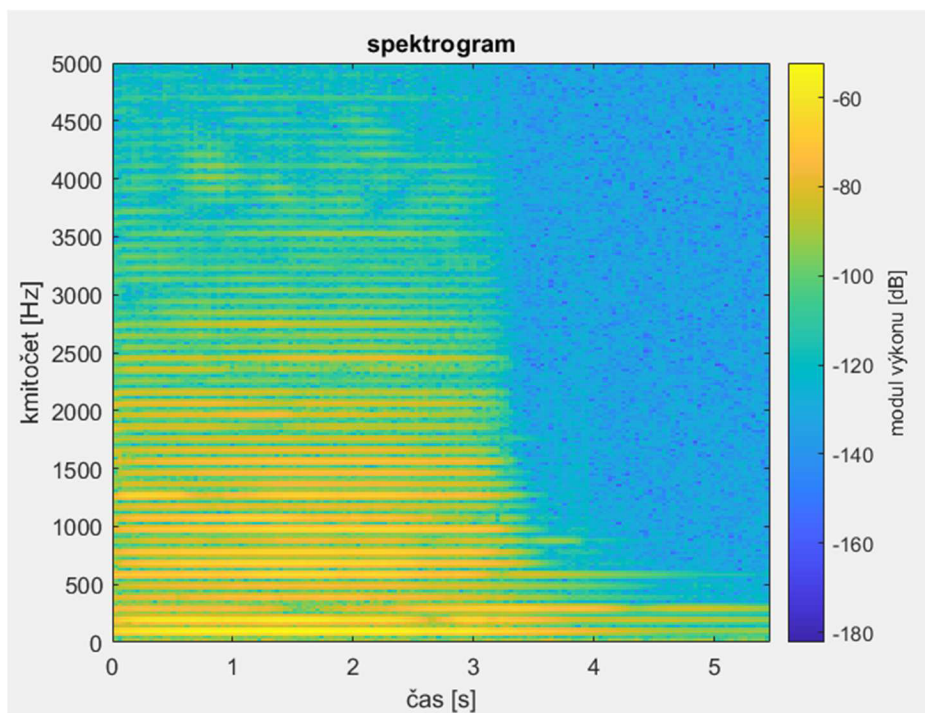
Vzorek nahrávky s dusítkem vykazuje velkou hodnotu modulu první složky, což lze pozorovat i u vzorku bez dusítka, avšak ten má o něco výraznější i vyšší harmonické.

Inovované violoncello má opět poněkud slabou úroveň základní složky a výrazně se projevuje 6. a 7., které doznívají i po zastavení smyčce.

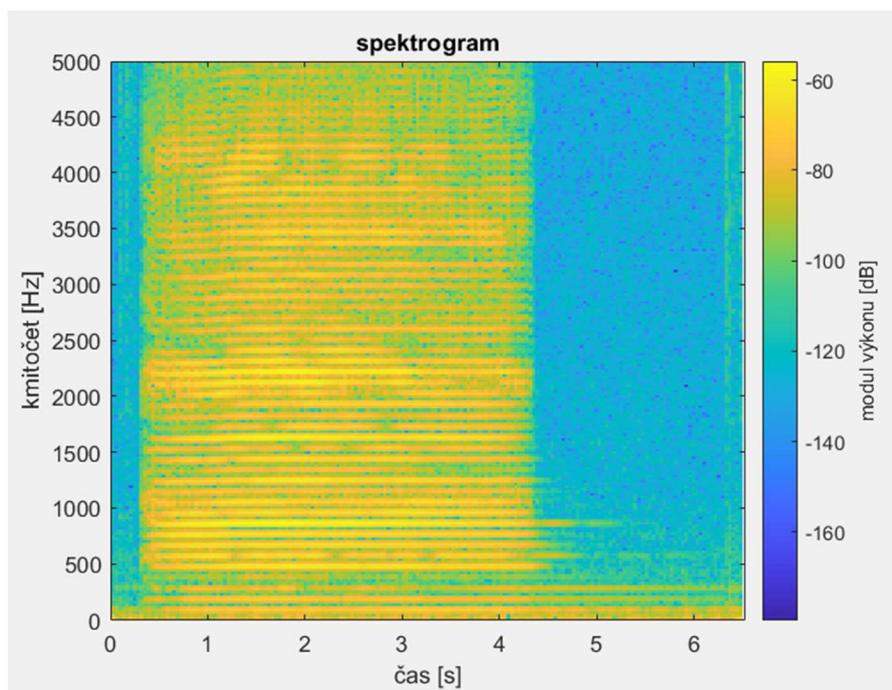
Poslední vzorek při nahrávání linkou se dá srovnat se všemi ostatními – tedy postupně snižující se modul s každou další harmonickou složkou.



Obrázek 6.9 *Spektrogram prázdné struny G na tradičním violoncelle s dusítkem*

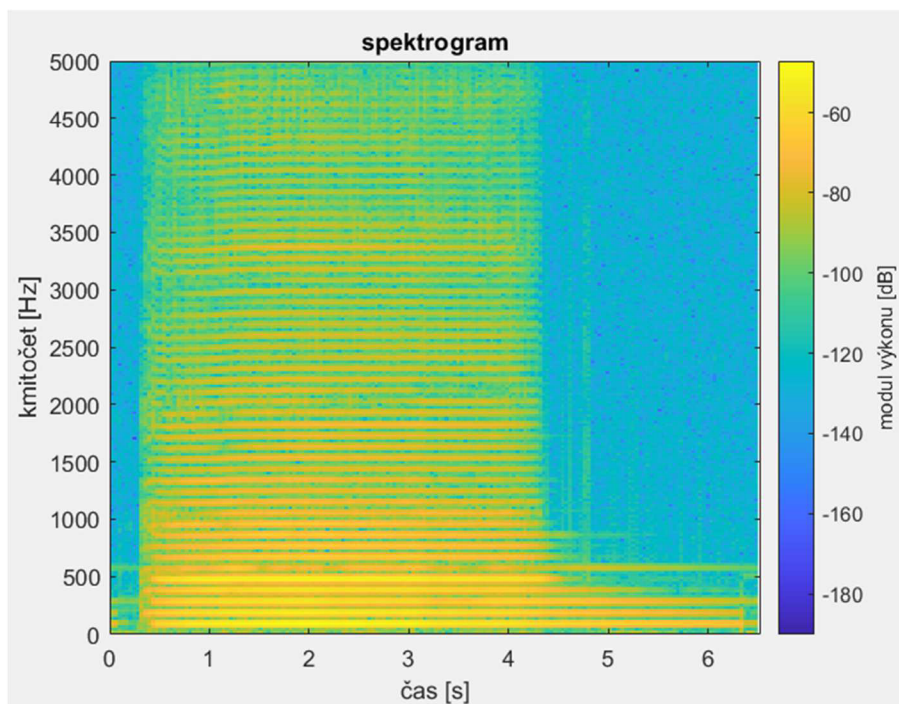


Obrázek 6.10 *Spektrogram prázdné struny G na tradičním violoncelle*



Obrázek 6.11 *Spektrogram prázdné struny G na violoncelle z kompozitních materiálů nahrané akusticky*





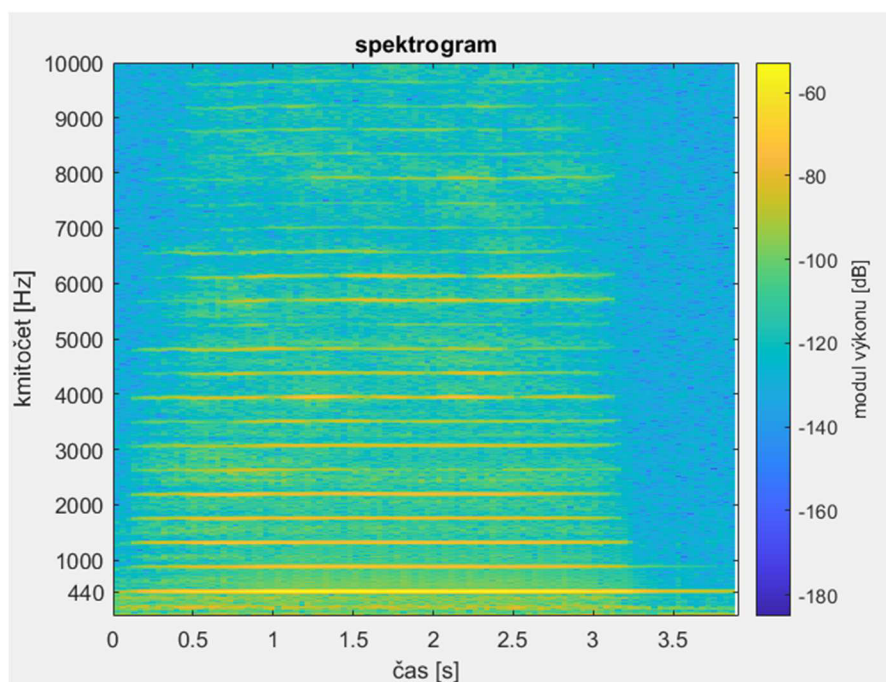
Obrázek 6.12 *Spektrogram prázdné struny G na violoncelle z kompozitních materiálů nahrané linkou*

Na spektrogramu nahrávky struny G s dusítkem lze zřetelně rozeznat první harmonickou složku na 98 Hz a další harmonické na 196 a 392 jsou také výrazné, na dalších násobcích už výkon složek začíná klesat.

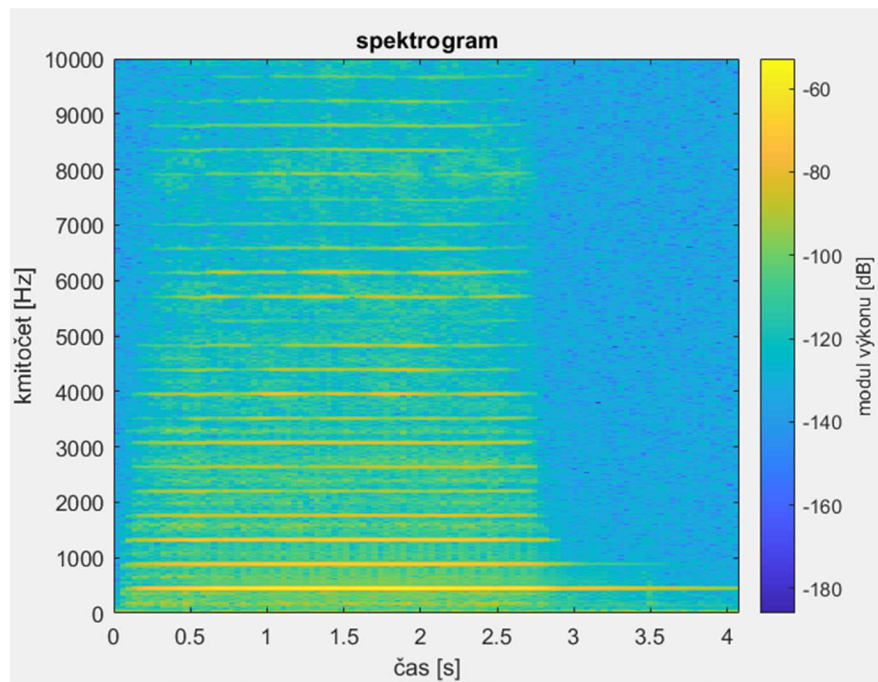
U nahrávky bez dusítka pozorujeme obdobný průběh, avšak intenzita harmonických složek klesá mnohem pomaleji a zároveň pozorujeme slabší 3. harmonickou.

Graf spektrálních složek na plastovém violoncelle vykazuje zajímavé hodnoty, podle něj první 3 složky mají poměrně nízkou hodnotu a 4. není téměř vůbec slyšitelná. Naopak např. 9. složka vykazuje vysokou hodnotu modulu výkonu. Navzdory tomu však nejdéle znějící složky jsou právě první 3 a následně 6. a 9. složka. Právě tyto složky budou z větší vzdálenosti zachytitelné.

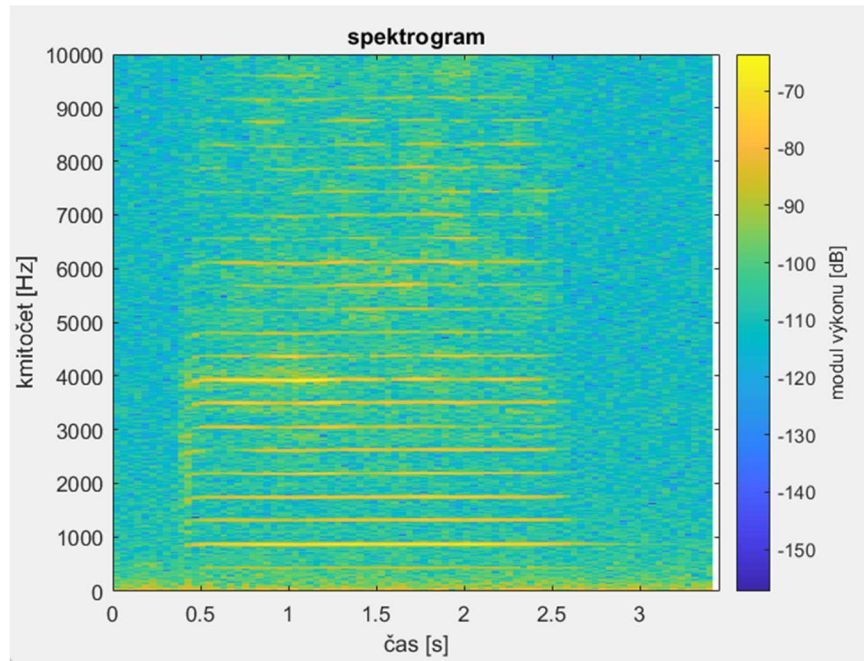
U nahrávání nástroje linkou je spektrum nejvíce plné a intenzita harmonických klesá pomalu. Spektrum také nemá harmonické složky tak definované, naopak se mezi nimi objevují slabé náznaky dalších, pravděpodobně šumových složek.



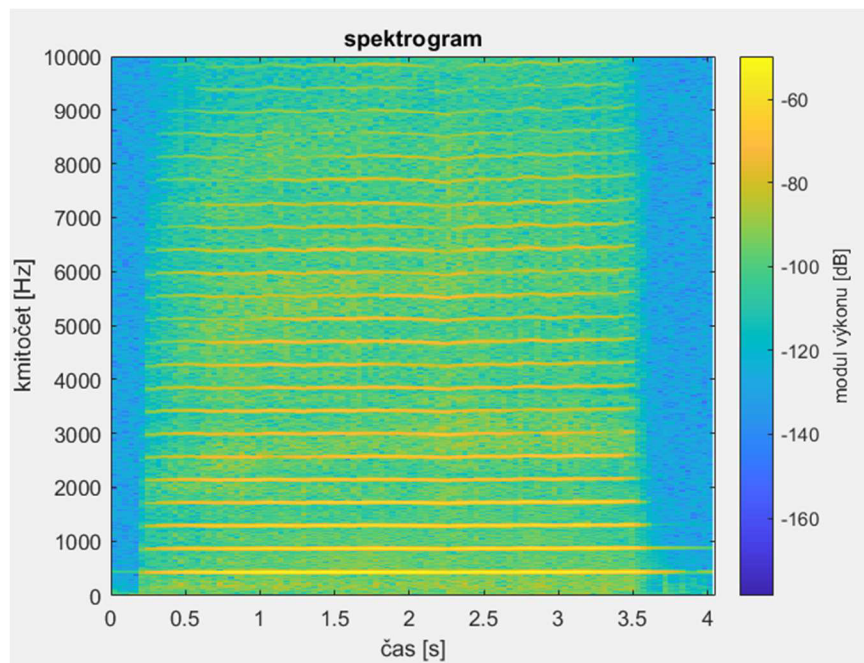
Obrázek 6.13 *Spektrogram flažoletu a" na tradičním violoncelle s dusítkem*



Obrázek 6.14 *Spektrogram flažoletu a" na tradičním violoncelle*



Obrázek 6.15 *Spektrogram flažoletu a'' na violoncelle z kompozitních materiálů nahrané akusticky*



Obrázek 6.16 *Spektrogram flažoletu a'' na violoncelle z kompozitních materiálů nahrané linkou*

Základní složka tónu a<sup>2</sup> je na kmitočtu 440 Hz. Flažolet přirozeně nemá velké množství vyšších harmonických, jelikož se v podstatě jedná o tón s utlumenou nosnou složkou. Proto spektrum je v porovnání např. s prázdnými strunami mnohem chudší.

Také mezi hrou s dusítkem a bez dusítka není tak znatelný rozdíl jako v předchozím měření. Zde dochází k většímu poklesu intenzity na vyšších násobcích a např. k výraznému utlumení 6. harmonické složky. Obecně jsou však spektrogramy podobné, jelikož flažolet sám o sobě nemá velmi bohaté spektrum, což způsobuje jeho ostrý zvuk.

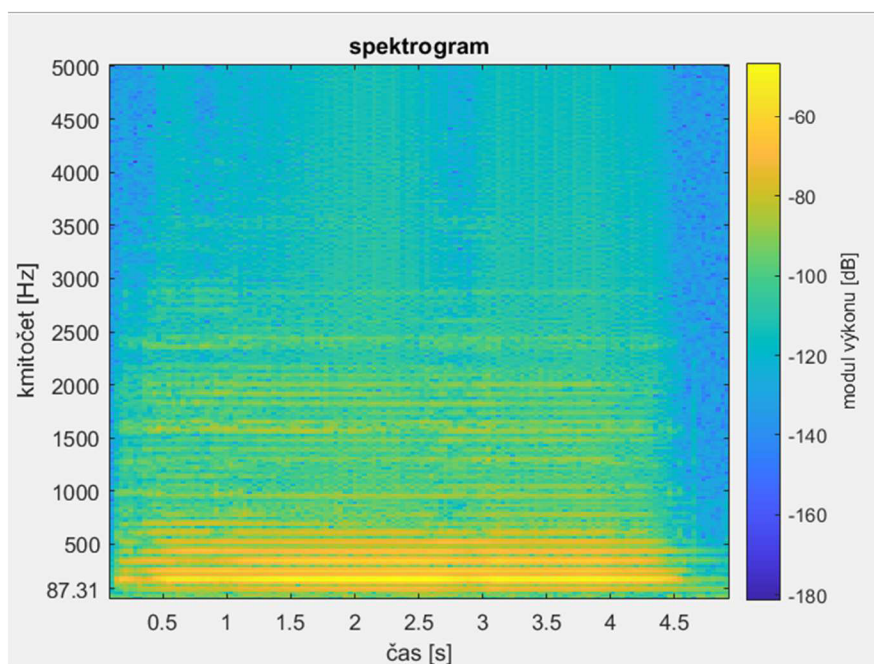
Na obrázku 6.15 lze pozorovat, že při zahrání flažoletu dojde k úplnému utlumení nosné složky. Místo, aby tón byl tedy o oktávu vyšší než prázdná struna, je vyšší o dvě oktávy, a tím ochuzen o další složku, a navíc též slabší ve spektru i v intenzitě zvuku. Tento jev se objevuje v měření víckrát a není nijak překvapivý, jelikož je způsoben absencí rezonanční skříně.

V případě nahrávání linkou se jev utlumení nosné složky již neobjevuje, naopak opět je vidět, že spektrum je velmi plné a intenzita klesá se zvyšujícími složkami relativně pomalu.

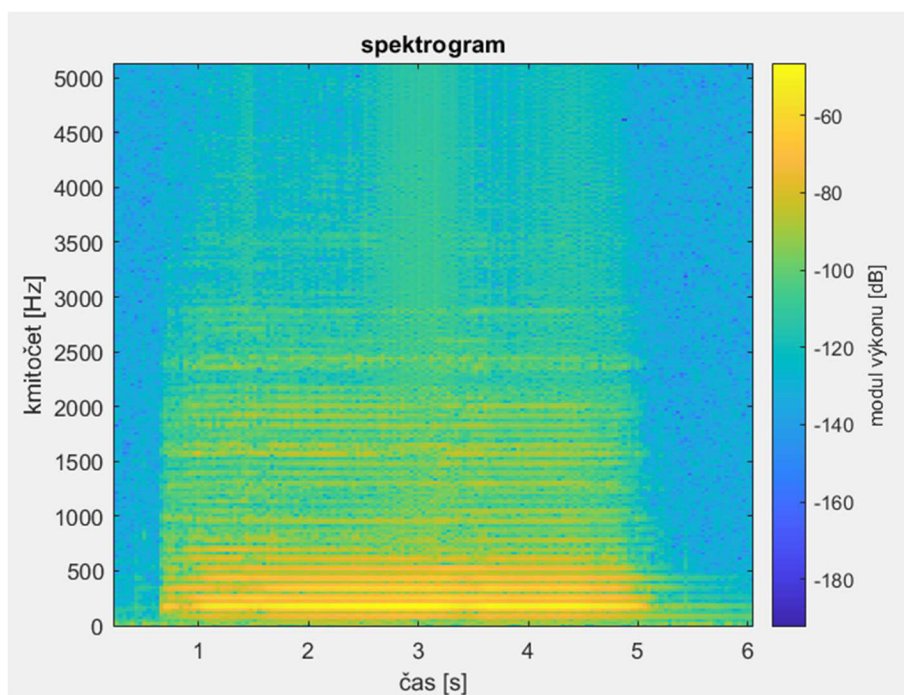
### 6.2.2 Spektrální analýza tónů v různých dynamikách

Během nahrávání linkou se změna barvy při různé dynamice vyskytuje minimálně a projevuje se pouze rychlejším poklesem hustoty tlaku ve spektru. Spektrogramy jsou tedy obsaženy jen pro jeden z tónů jako příklad. Výsledkem tohoto měření je zhodnocení rozdílů při hře v různých dynamikách. Budou se tedy porovnávat vzorky zahrány v piano, mezzoforte a forte.

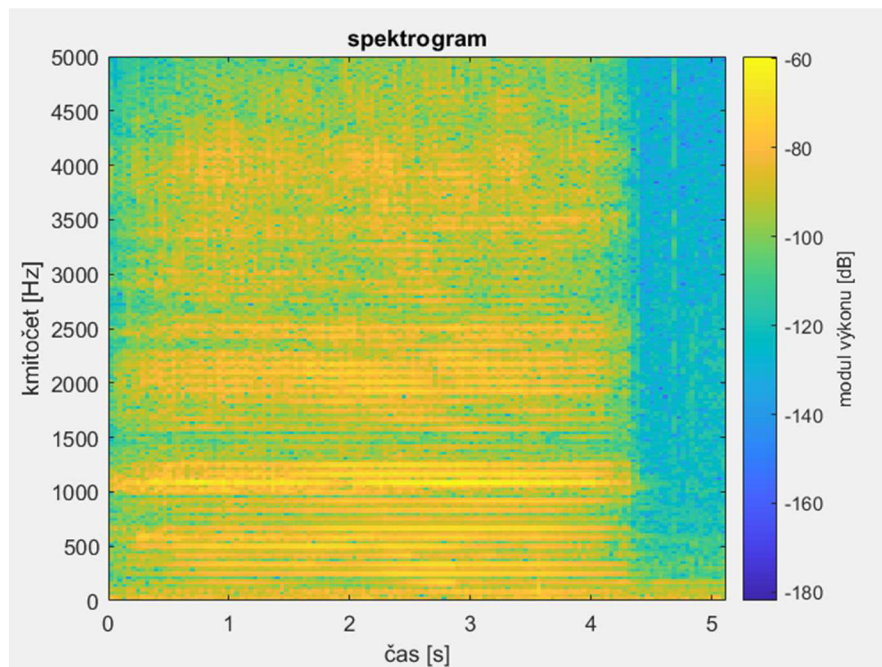
**Tón F:**



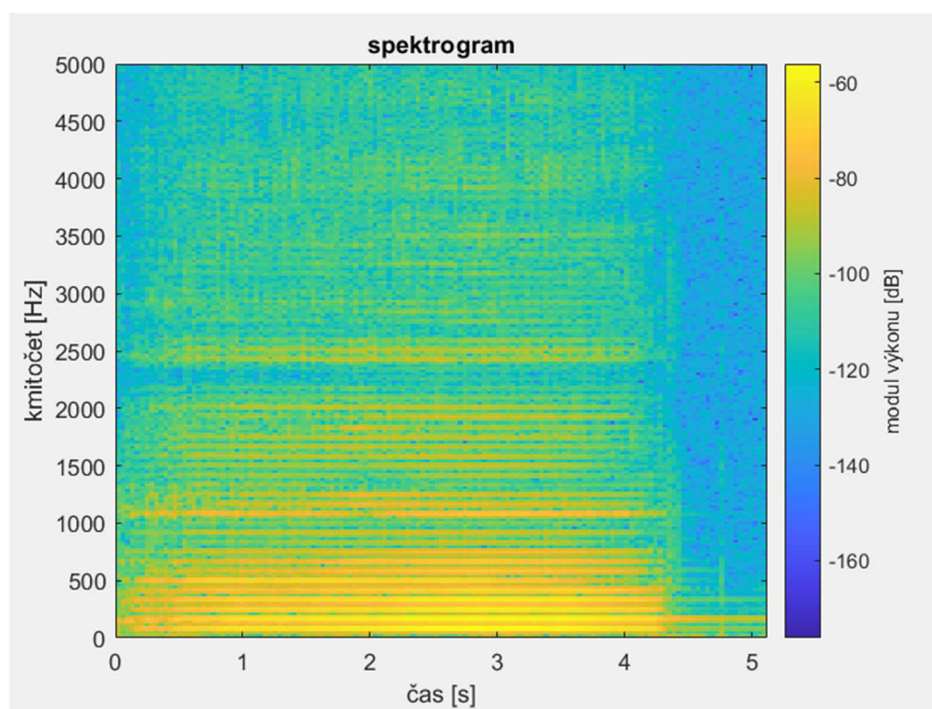
Obrázek 6.17 Spektrogram tónu F na tradičním violoncelle – piano



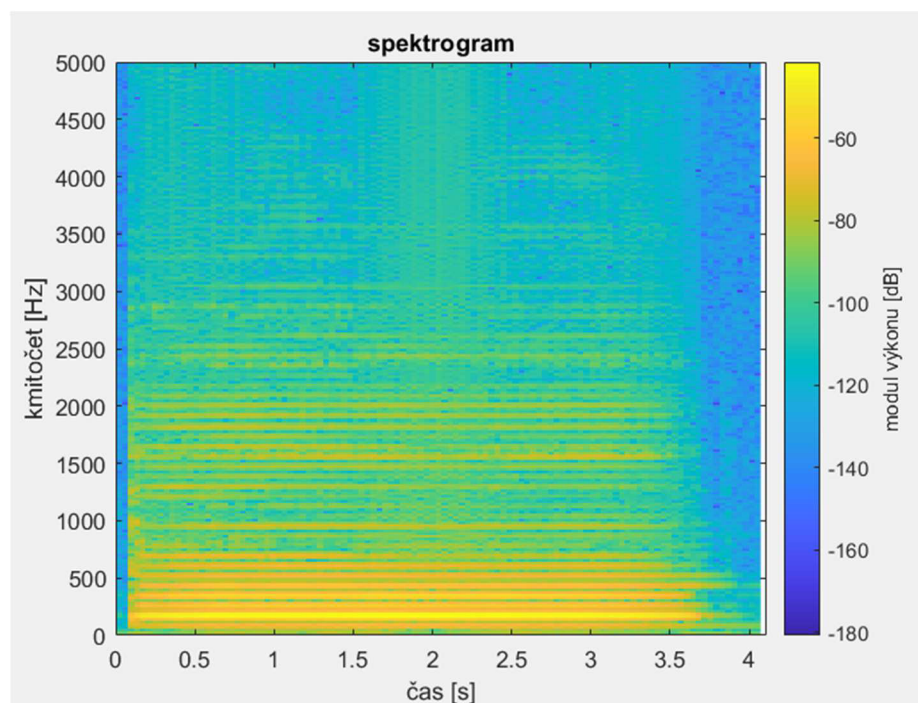
Obrázek 6.18 *Spektrogram tónu F na tradičním violoncelle s dusítkem – piano*



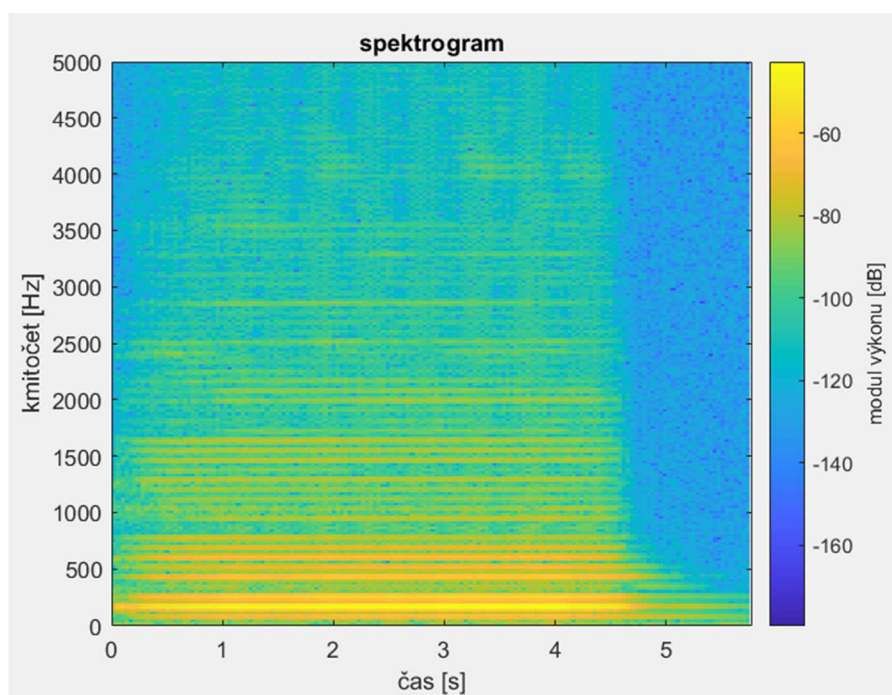
Obrázek 6.19 *Spektrogram tónu F na inovovaném violoncelle – piano*



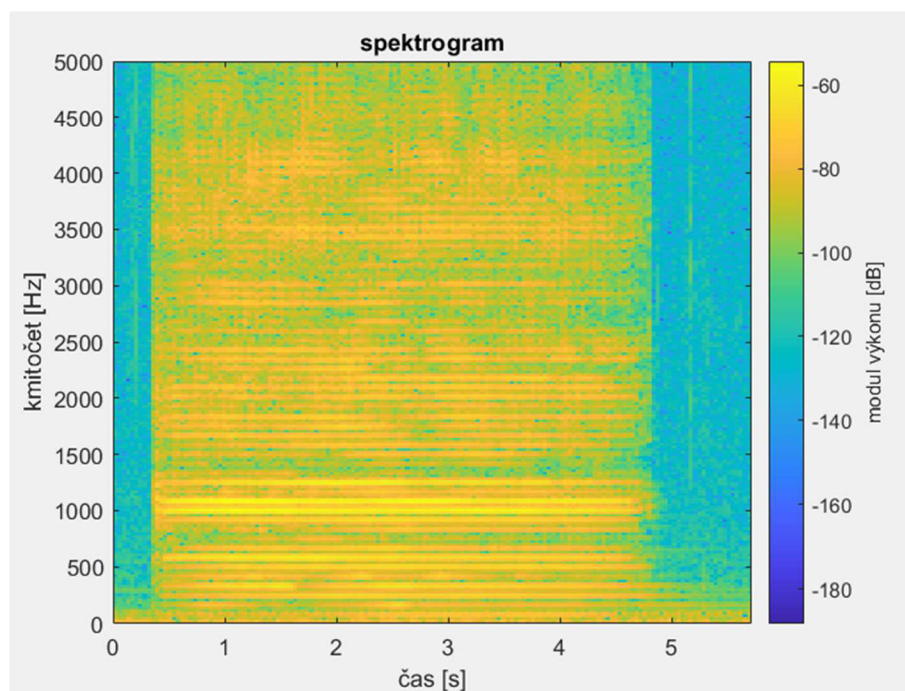
Obrázek 6.20 *Spektrogram tónu F na inovovaném violoncelle nahraného linkou– piano*



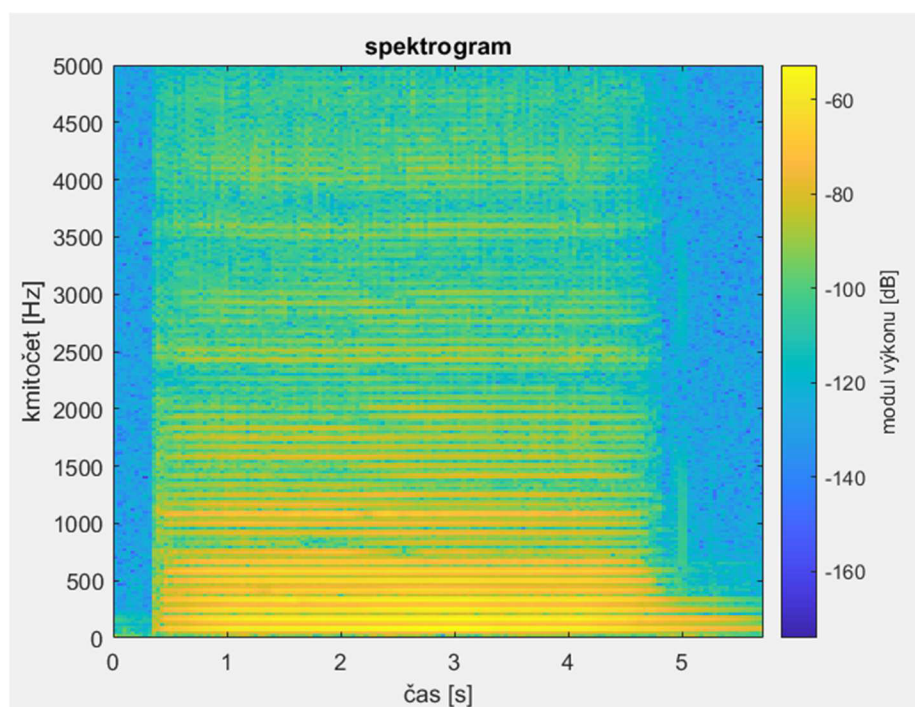
Obrázek 6.21 *Spektrogram tónu F na tradičním violoncelle – mezzo-forte*



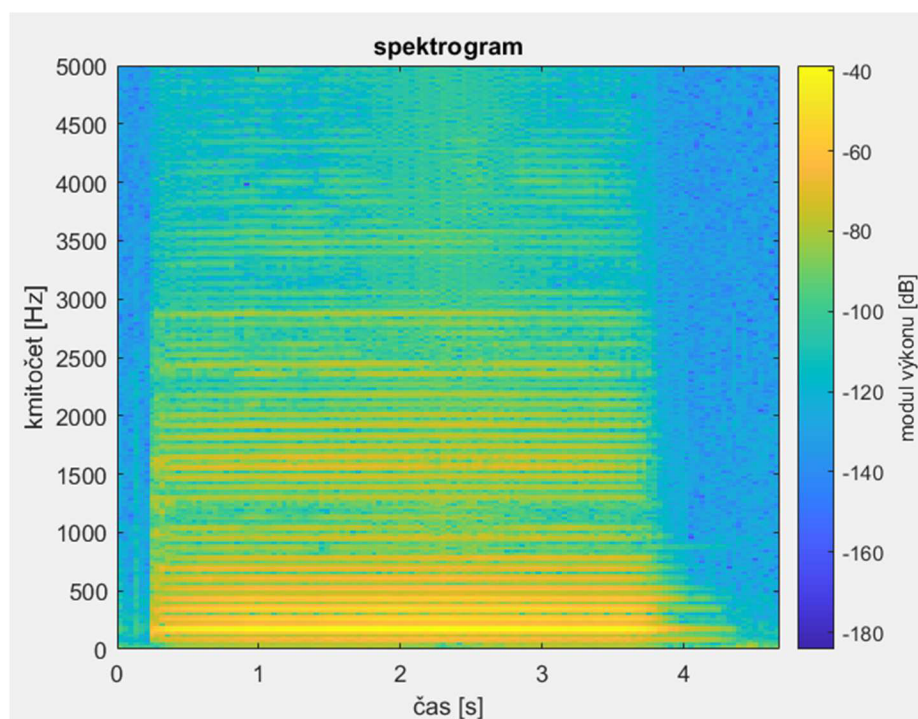
Obrázek 6.22 *Spektrogram tónu F na tradičním violoncelle s dusítkem – mezzoforte*



Obrázek 6.23 *Spektrogram tónu F na inovovaném violoncelle – mezzoforte*

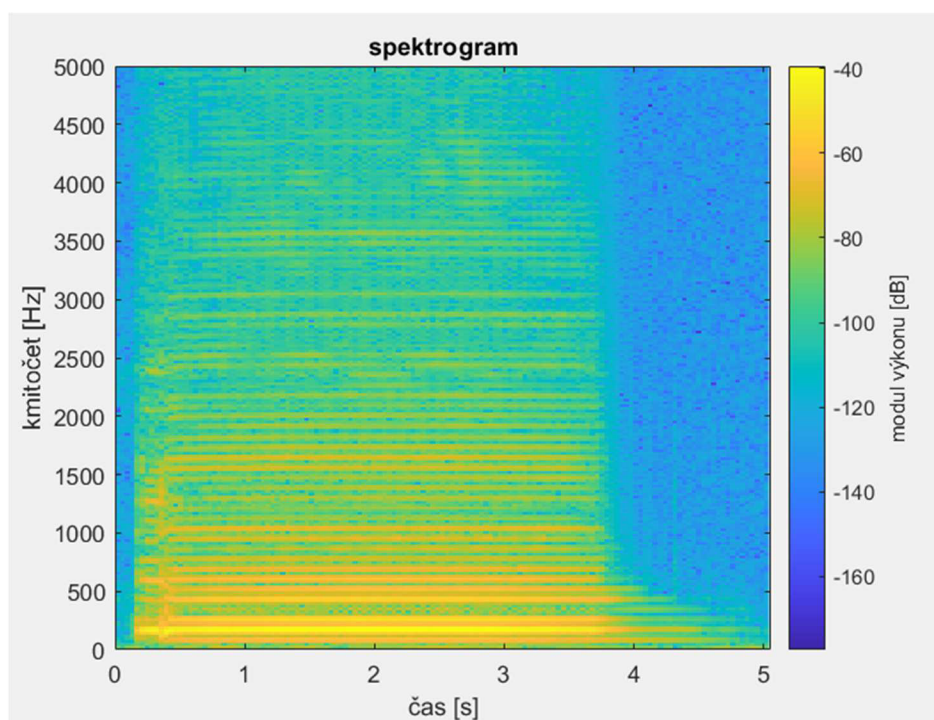


Obrázek 6.24 *Spektrogram tónu F na inovovaném violoncelle nahraného linkou– mezzoforte*

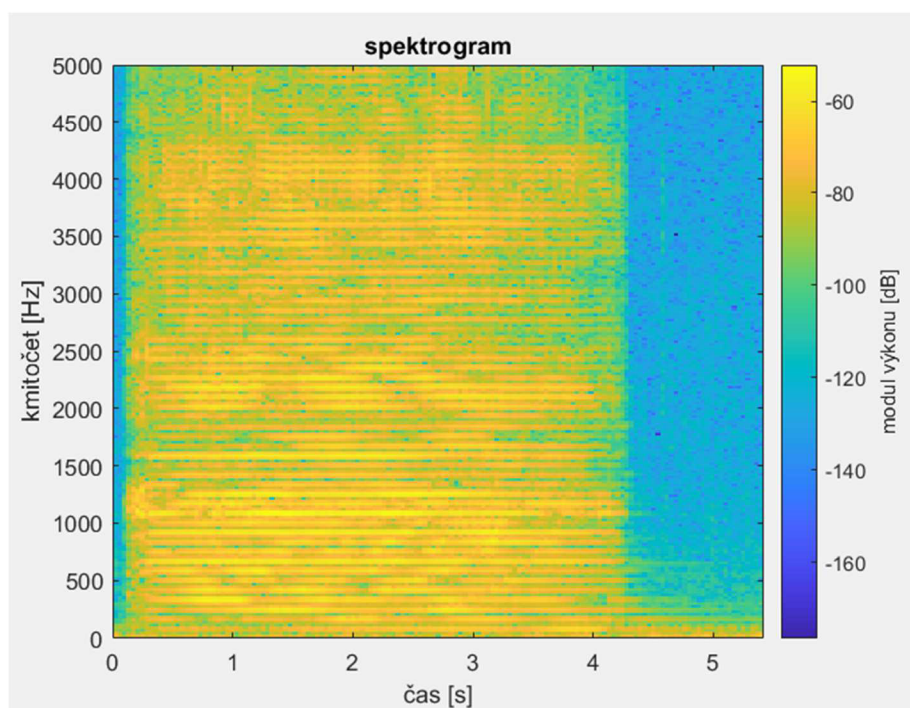


Obrázek 6.25 *Spektrogram tónu F na tradičním violoncelle – forte*

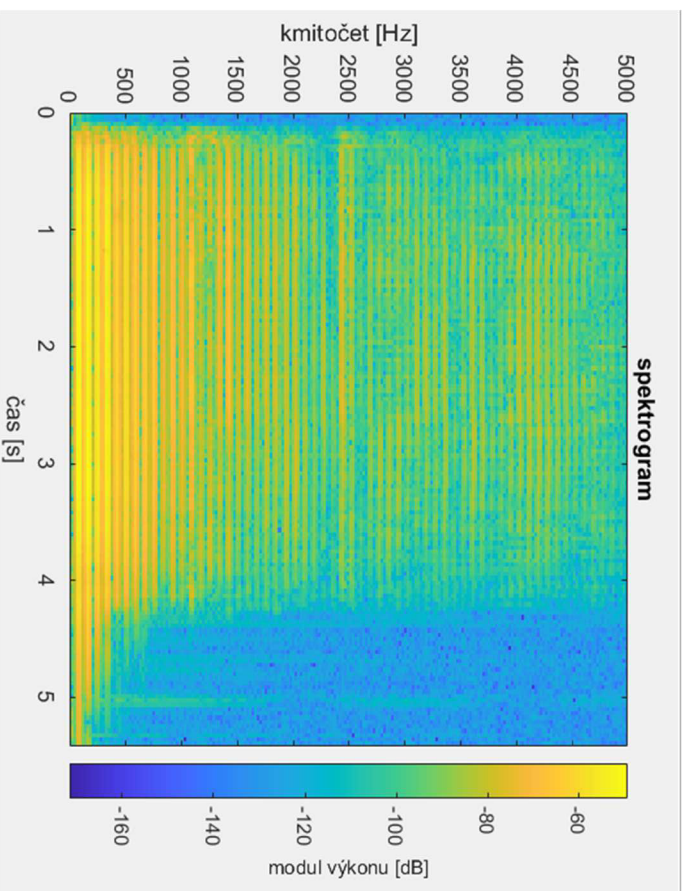




Obrázek 6.26 *Spektrogram tónu F na tradičním violoncelle s dusítkem – forte*

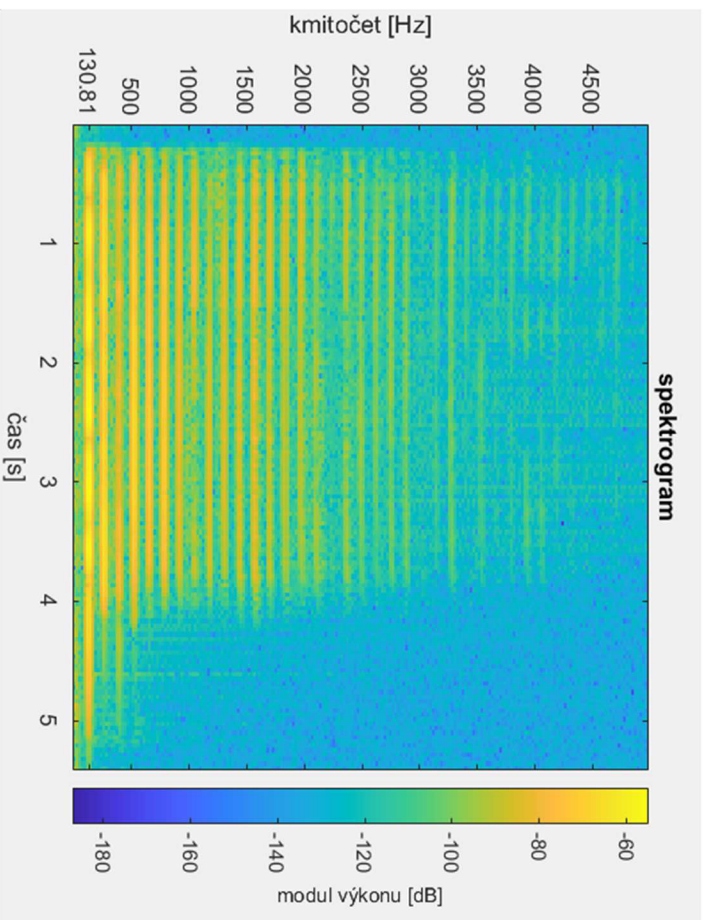


Obrázek 6.27 *Spektrogram tónu F na inovovaném violoncelle – forte*

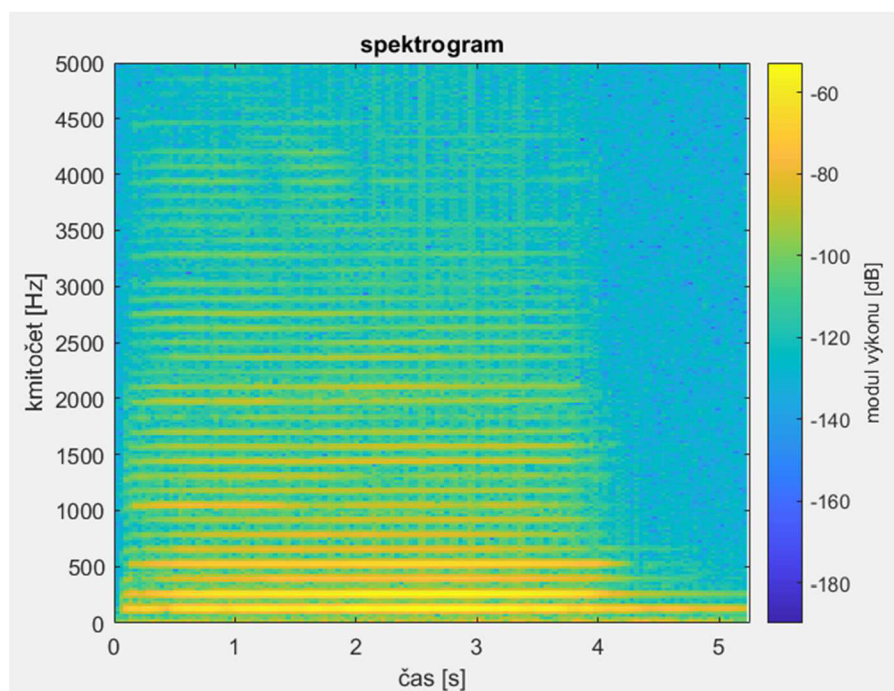


Obrázek 6.28 Spektrogram tónu F na inovovaném violoncelle nahraného linkou—*forte*

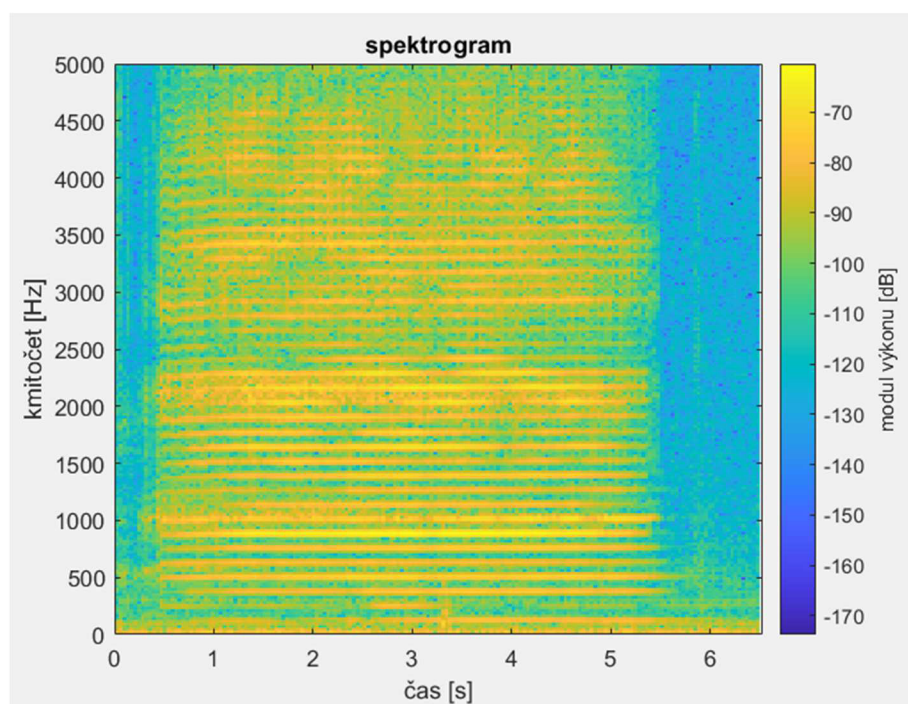
## Tón c



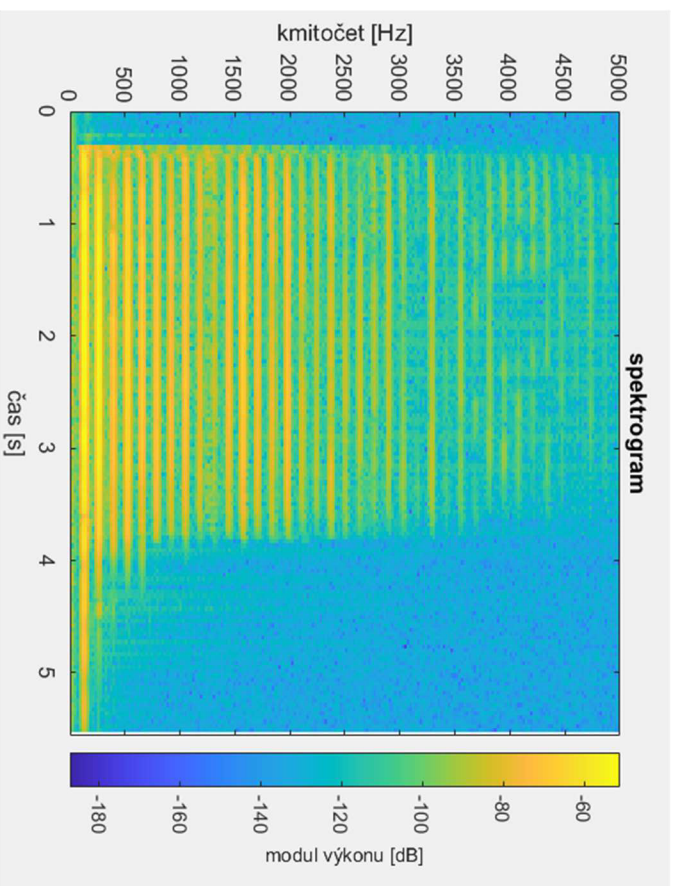
Obrázek 6.29 Spektrogram tónu c na tradičním violoncelle – *piano*



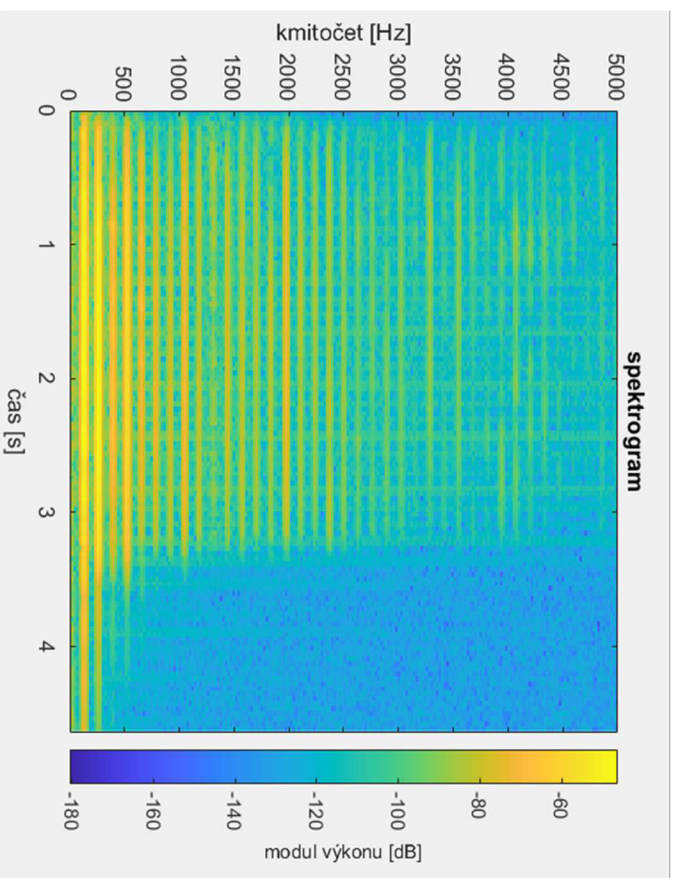
Obrázek 6.30 *Spektrogram tónu c na tradičním violoncelle s dusítkem – piano*



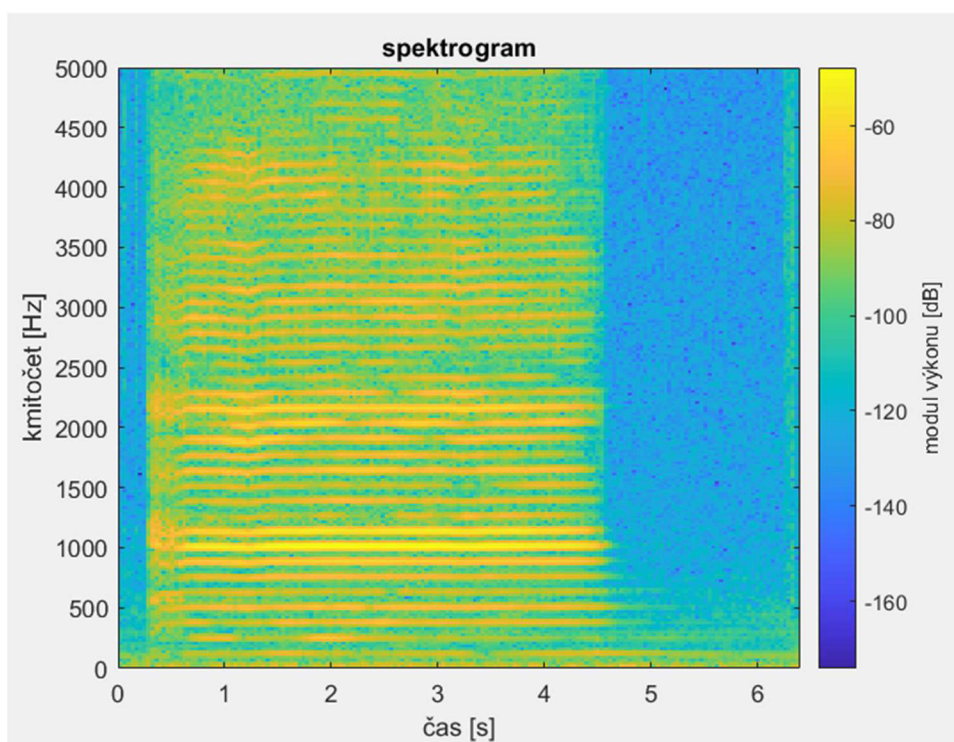
Obrázek 6.31 *Spektrogram tónu c na inovovaném violoncelle – piano*



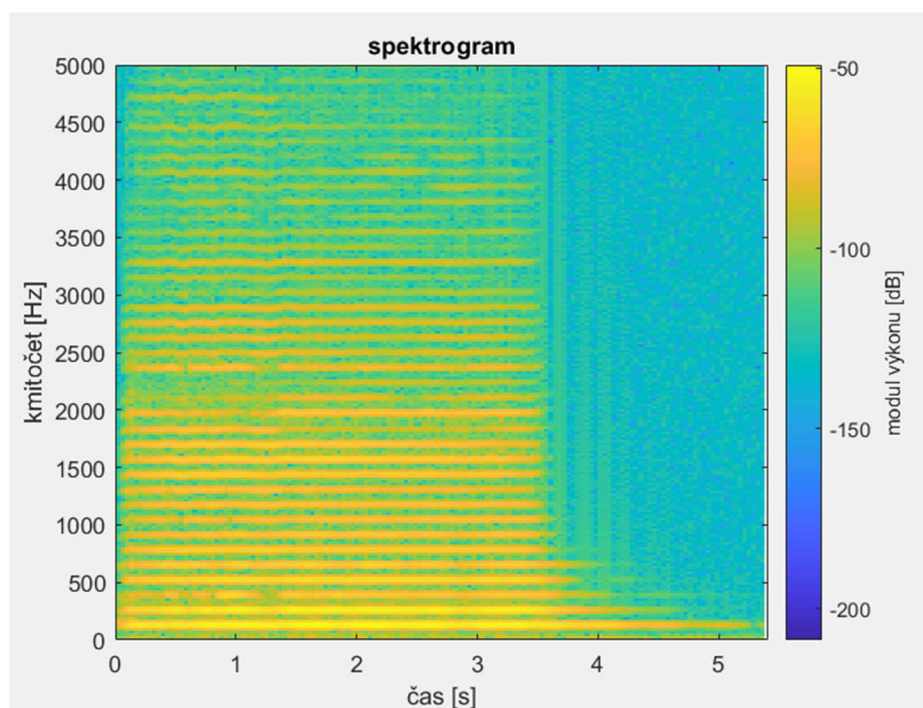
Obrázek 6.32 Spektrogram tónu c na tradičním violoncelle – mezzoforte



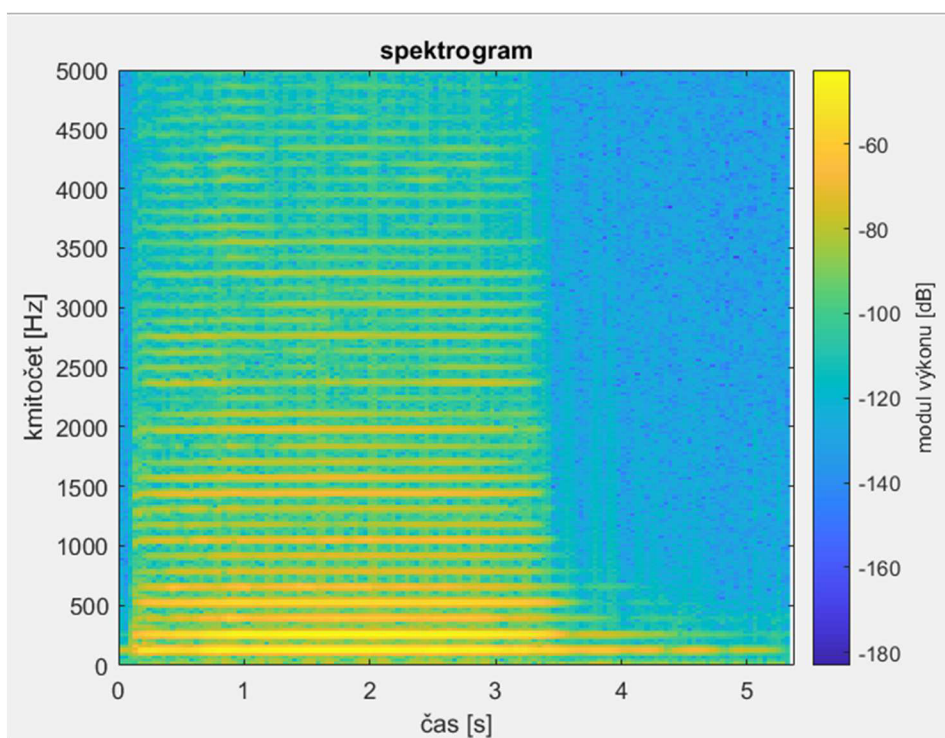
Obrázek 6.33 Spektrogram tónu c na tradičním violoncelle s dusítkem – mezzoforte



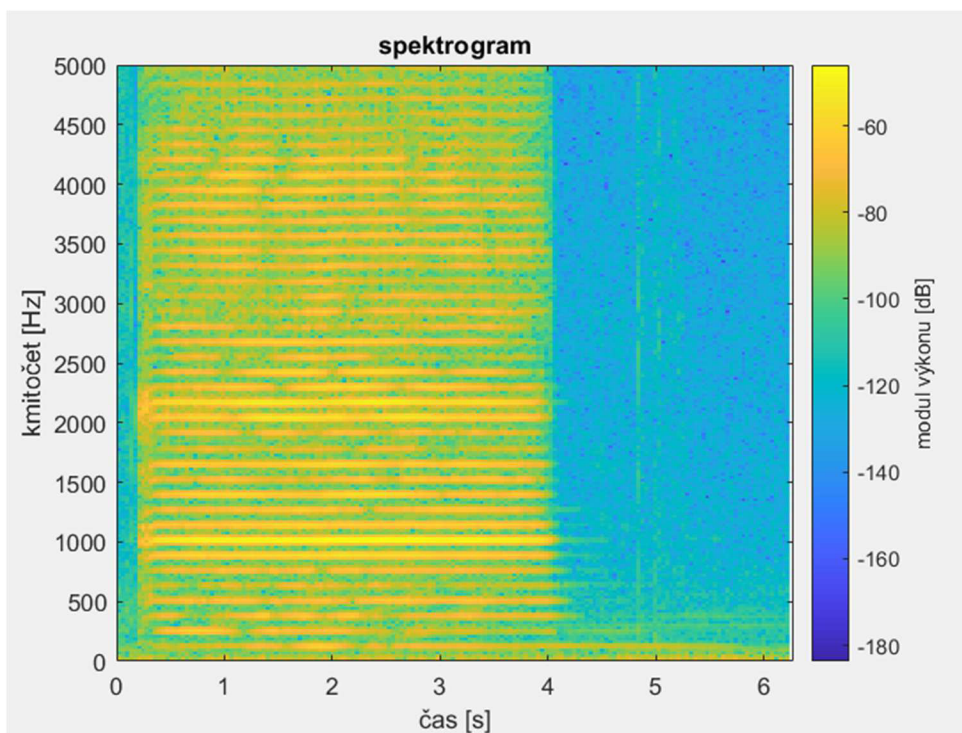
Obrázek 6.34 *Spektrogram tónu c na inovovaném violoncelle – mezzo-forte*



Obrázek 6.35 *Spektrogram tónu c na tradičním violoncelle – forte*

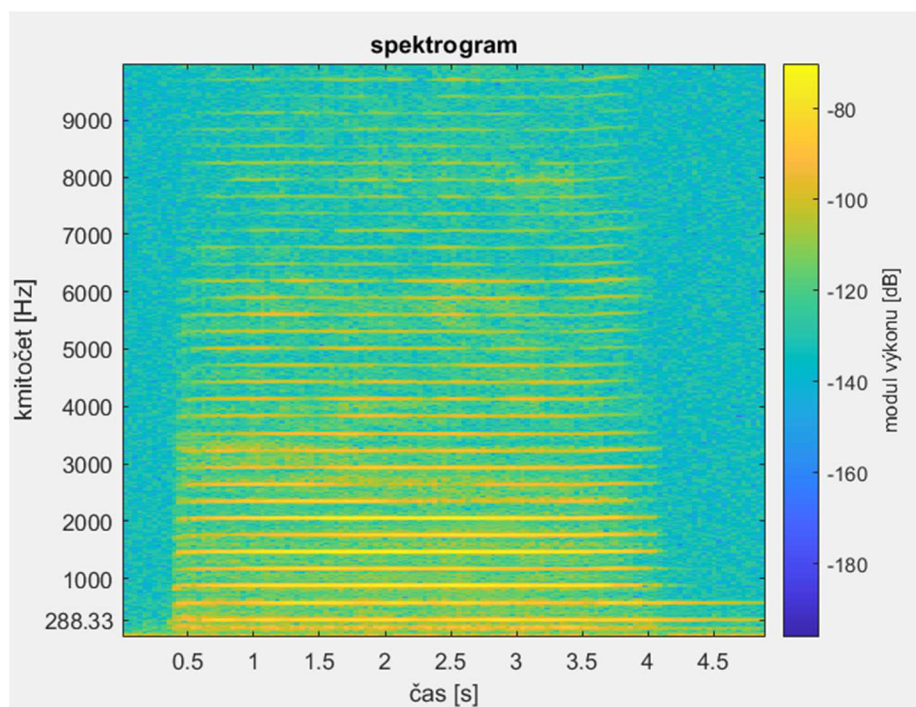


Obrázek 6.36 *Spektrogram tónu c na tradičním violoncelle s dusítkem – forte*

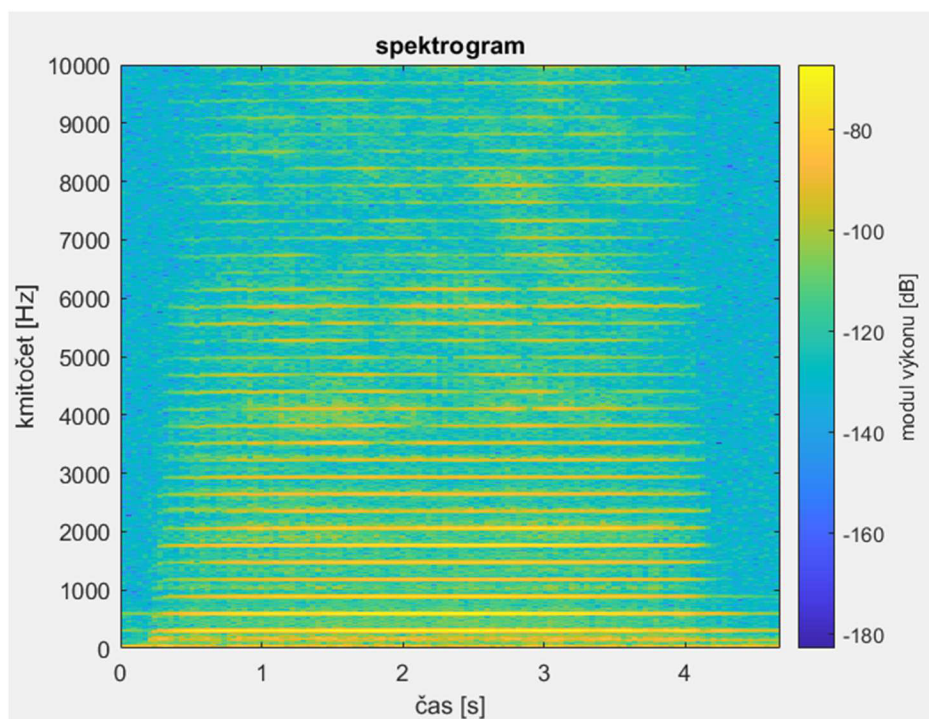


Obrázek 6.37 *Spektrogram tónu c na inovovaném violoncelle – forte*

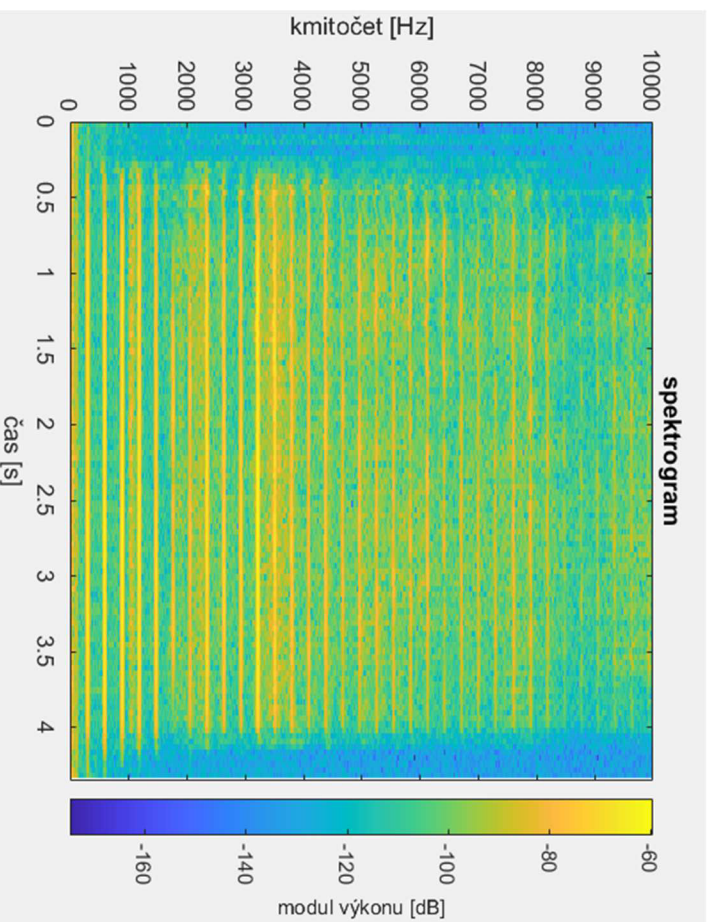
## Tón d'



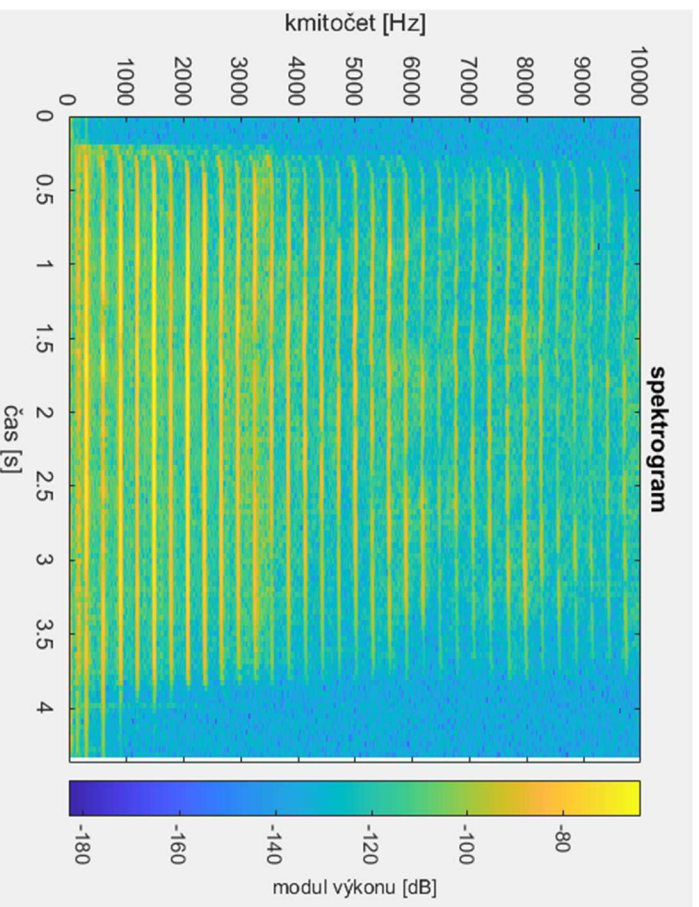
Obrázek 6.38 Spektrogram tónu d' na tradičním violoncelle – piano



Obrázek 6.39 Spektrogram tónu d' na tradičním violoncelle s dusítkem – piano

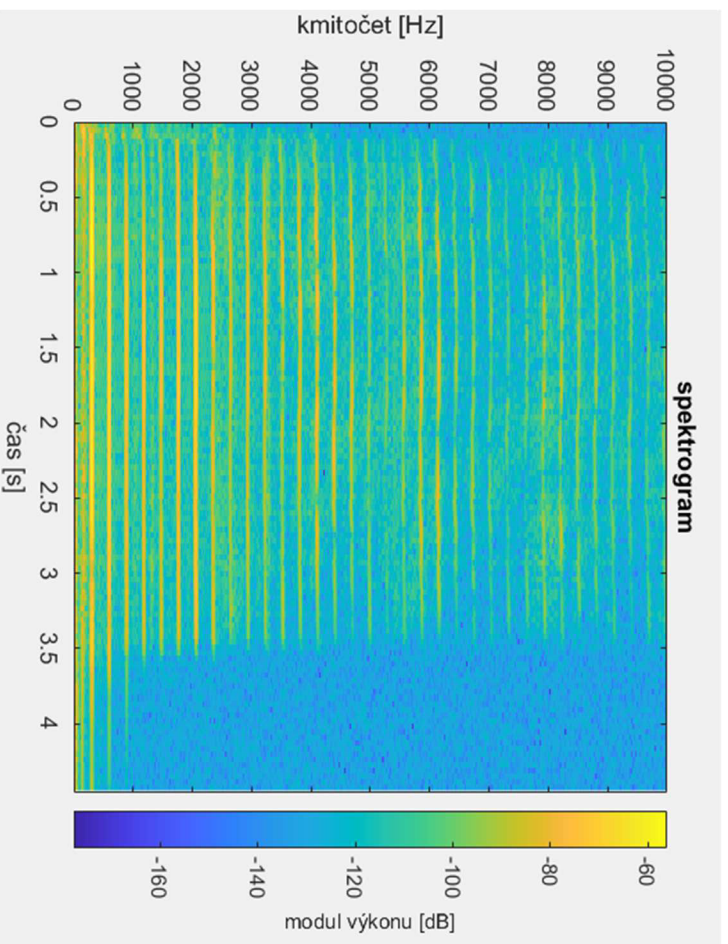


Obrázek 6.40 Spektrogram tónu *d'* na inovovaném violoncelle – piano

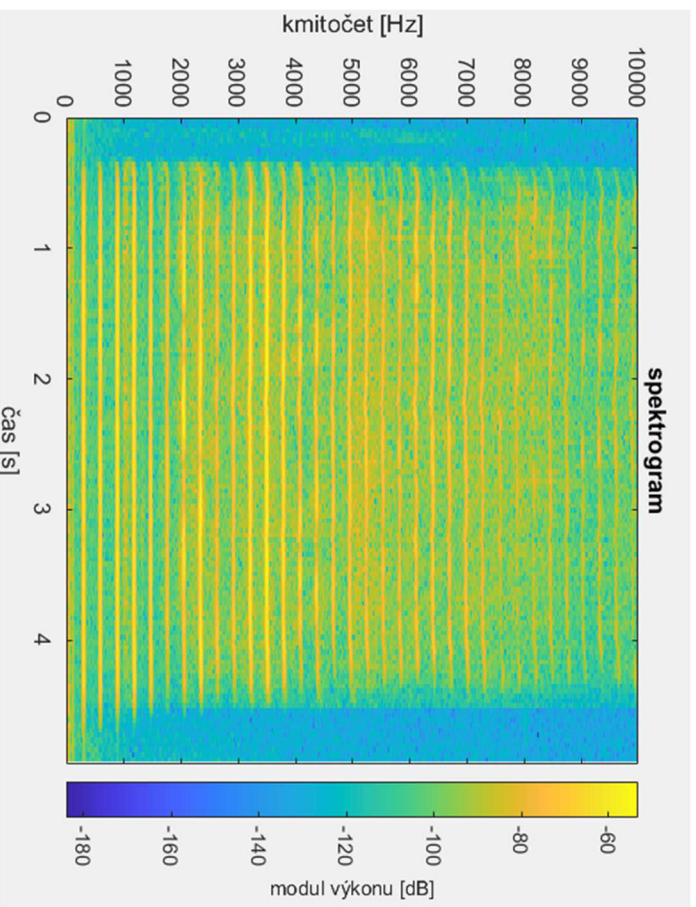


Obrázek 6.41 Spektrogram tónu *d'* na tradičním violoncelle – mezzoforte

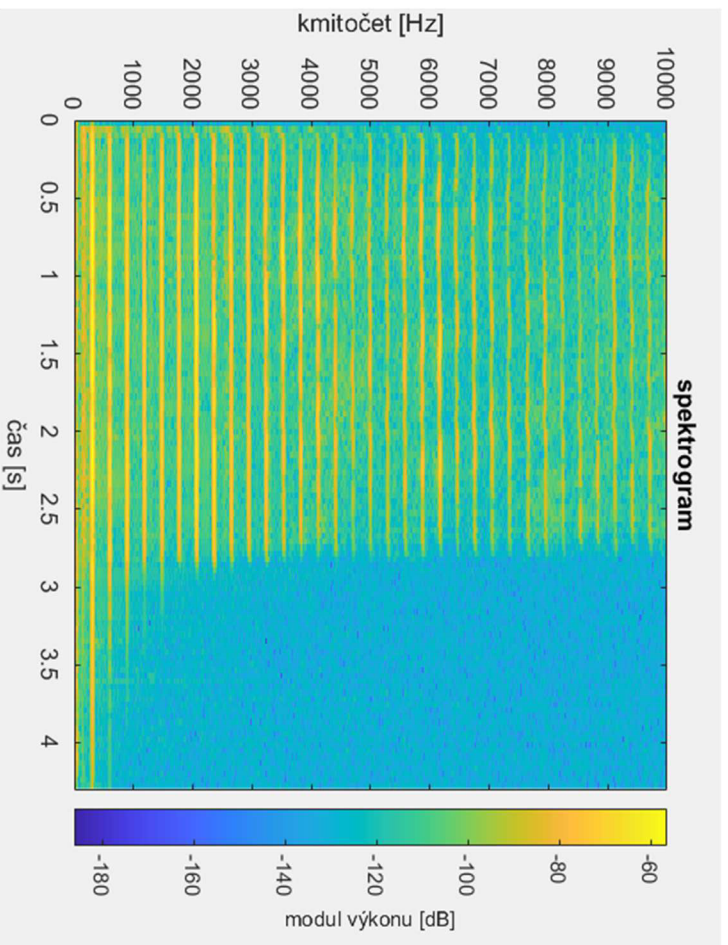




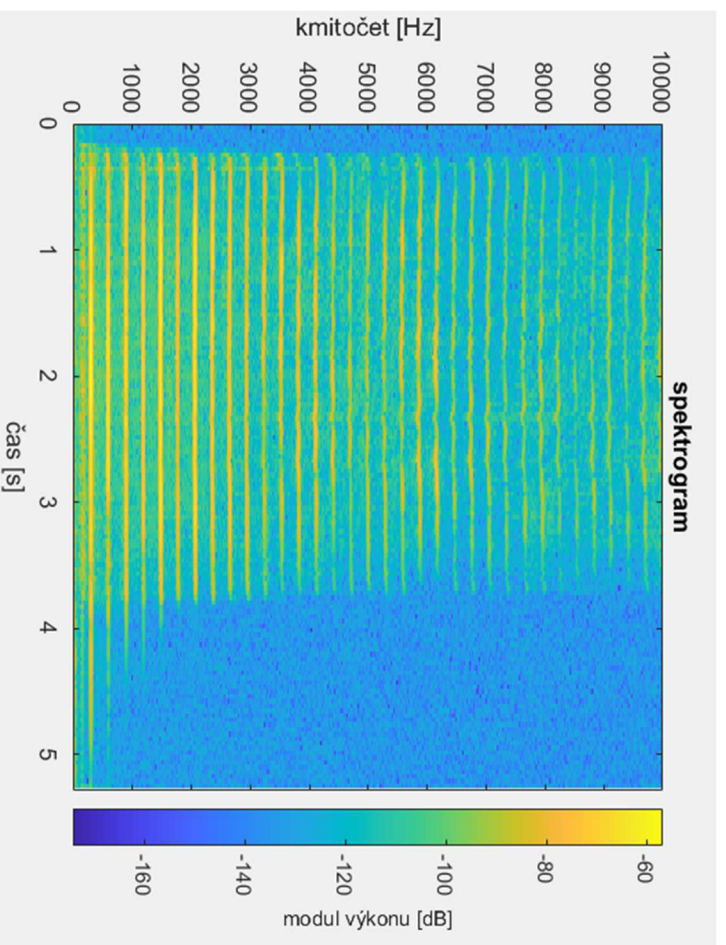
Obrázek 6.42 Spektrogram tónu *d'* na tradičním violoncelle s dusítkem – *mezzo-forte*



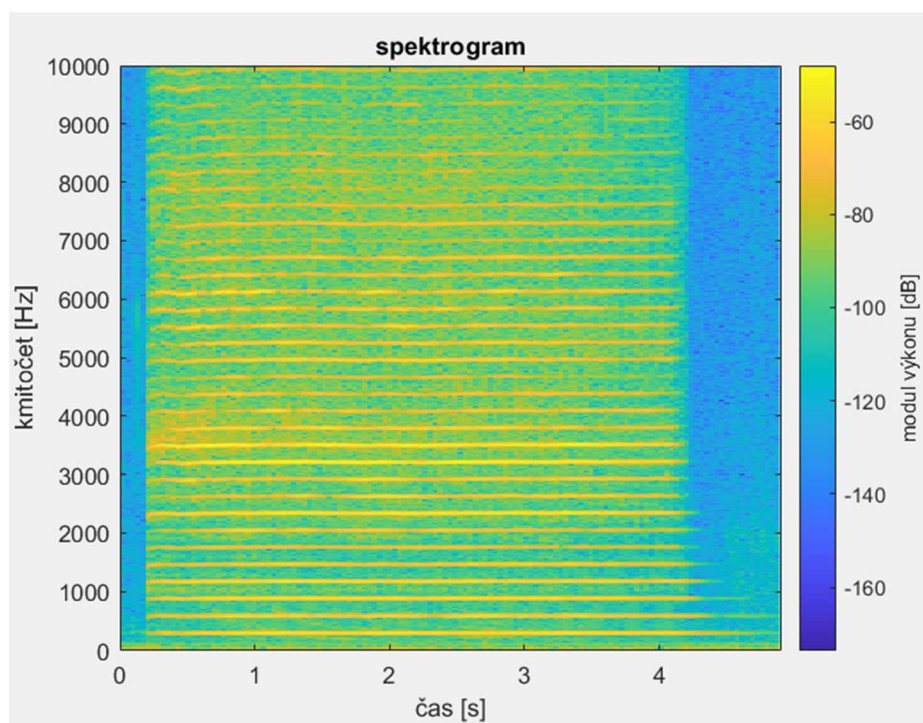
Obrázek 6.43 Spektrogram tónu *d'* na inovovaném violoncelle – *mezzo-forte*



Obrázek 6.44 Spektrogram tónu 'd' na tradičnom violoncelle – forte



Obrázek 6.45 Spektrogram tónu 'd' na tradičnom violoncelle s dusítkem – forte



Obrázek 6.46 *Spektrogram tónu d' na inovovaném violoncelle – forte*

Z výše zobrazených vzorků lze vyčíst rozdíly v barvě mezi jednotlivými dynamikami a jaký má na ně vliv stavba nástroje. Je např. viditelné, že při hraní v piano někdy může být slabší nosná složka, než některé vyšší harmonické a u inovovaného violoncella se tento jev projevuje ještě více. U tónu c ku příkladu v dynamice piano jsou téměř neznatelné dokonce první dvě složky tónu. Se zvyšující se dynamikou se zlepšuje slyšitelnost nosné. Při hře forte je nosná většinou na spektru vidět, ovšem často dochází k tomu, že jedna z vyšších složek se projeví výjimečně silně a zamaskuje tak nosnou složku.

### 6.3 Formantové oblasti

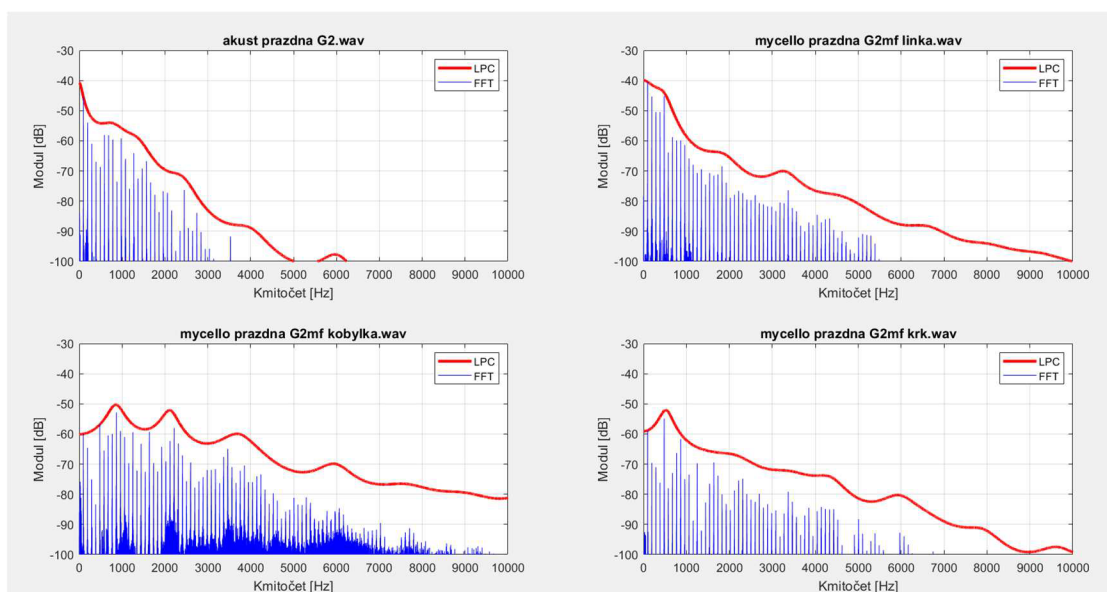
Formanty tónu jsou určeny především rezonancí skříně nástroje, proto můžeme při porovnání grafů vykreslených v MATLABu vidět značné rozdíly u violoncella, které nemá duté tělo.

Grafy byly vykresleny pomocí LPC (Linear Predictive Coding), k tomu byl použit MATLAB. Kód byl vytvořen podle zdroje [12] a upraven pro účely této práce. LPC je typ kódování, kterým se pomocí spektrální obálky zjišťují formantové oblasti tónu. Nejčastěji je využíván pro analýzu lidského hlasu. [8]

V MATLABu byly zanalyzovány jednotlivé zvukové stopy a popsány viditelné formantové oblasti. Je porovnáno několik vybraných tónů nahraných na klasickém violoncelle a na plastovém violoncelle nahraného linkou a mikrofony u kobyly a zezadu

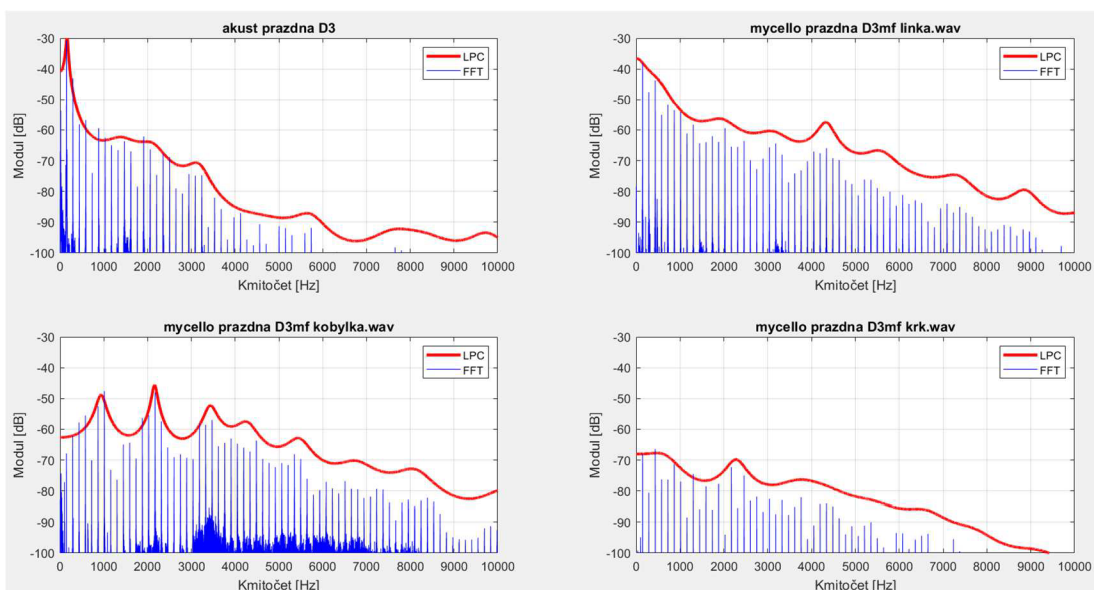
u krku nástroje. Nahrávání dvěma různými způsoby bylo provedeno pro analýzu vlastní rezonance krku nástroje. Právě krk je část, která při hře rezonuje nejvíce, což se projevuje na výsledné barvě zvuku. Dále byly porovnány formanty tónu e na klasickém a na inovovaném violoncelle pouze při nahrání mikrofonom. Tyto vzorky jsou zkoumány pro demonstraci vlivu tzv. „vlčího tónu“ na zvuk tradičního violoncella.

U všech tónů lze pozorovat, že formanty tradičního violoncella v intenzitě hlasitosti více klesají na vyšších kmitočtech, zatímco u inovovaného violoncella, především nahraného akusticky, je křivka více vyrovnaná v rámci spektra. U tónu e je možné také pozorovat ve vyšších harmonických složkách značnou nepravidelnost spektra a velmi výrazný první formant.



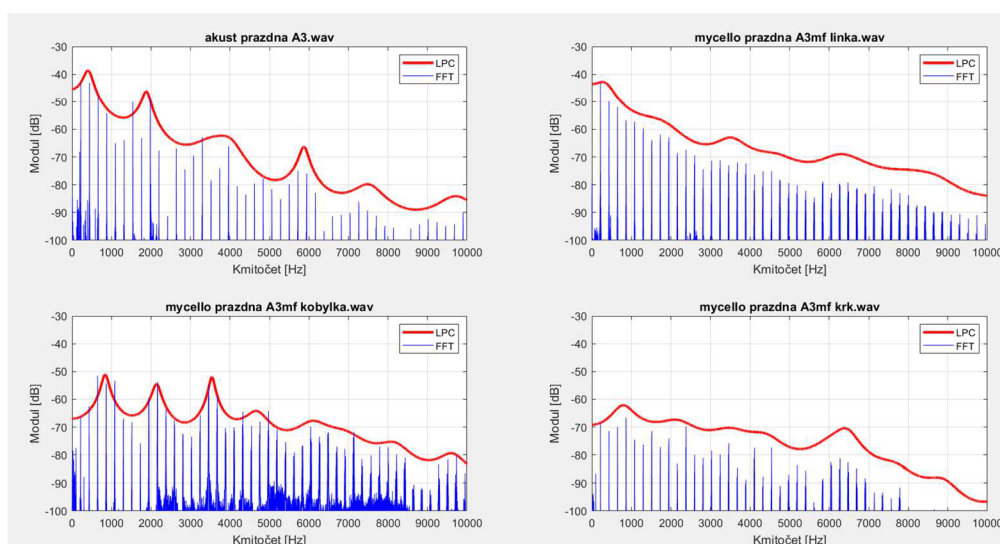
Obrázek 6.47 Formantové oblasti prázdné struny G

Na prázdné struně G lze u MyCella vidět první formant v oblasti okolo 500 Hz a z grafů lze odvodit, že zdrojem je rezonance krku, kde je to nejvýraznější složka. U klasického violoncella naopak v této oblasti dochází k mírnému poklesu a formant je zřetelný až na zhruba 600 Hz.



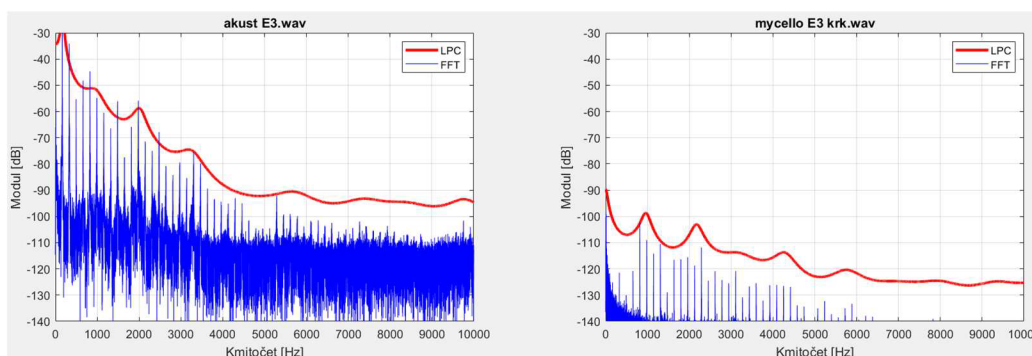
Obrázek 6.48 Formantové oblasti prázdné struny d

U tradičního violoncella lze pozorovat první formant už v kolem 150 Hz a další potom v okolí 1300 Hz, 2000 Hz a 3000 Hz. Formant ve 2000 je jediný, který mají všechny čtyři nahrávky společný a u inovovaného violoncella je podle LPC analýzy pravděpodobně způsoben rezonancí krku, jelikož je to u grafu vpravo dole nejvýraznější formant ve spektru. Dále pravděpodobně rezonancí kobylky je možno z charakteristiky vlevo dole vyčíst první výrazný formant okolo 1000 Hz.



Obrázek 6.49 Formantové oblasti prázdné struny a

U nahrávání mikrofonem je první formant posunutý a má maximum až na kmitočtu 800 Hz oproti klasickému violoncellu, které ho má už na přibližně 350 Hz a při nahrávání linkou, kde je na 300 Hz. Druhý formant se přibližně shoduje pro všechny vzorky s hodnotou maxima okolo 2000 Hz, stejně tak třetí na 3500 Hz. Další formanty už vykazují další nepravidelnosti. Např. kolem 6300 Hz se objevuje rezonance krku, která se projeví i na ostatních dvou vzorcích inovovaného violoncella, přičemž klasické violoncello má v této oblasti naopak pokles.



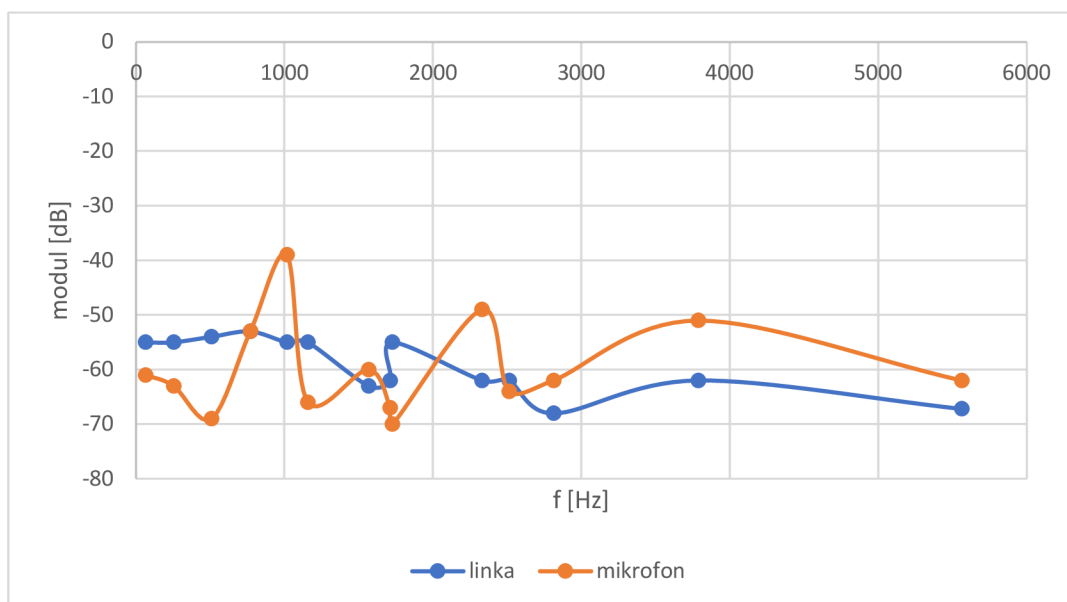
Obrázek 6.50 Formantové oblasti tónu *e* na tradičním violoncelle

Tyto vzorky jsou názorným příkladem vlivu vzniku zánějů na vlčím tónu. Na tradičním violoncelle došlo k zdvojnásobení první harmonické složky, čímž se vytvořila velmi silná první formantová oblast okolo 200 Hz. Ve stejné oblasti na inovovaném violoncelle je naopak pokles v intenzitě složek. Další čitelné složky jsou více méně podobné pro obě violoncella jen se liší v intenzitě, což je typické i pro ostatní naměřené vzorky.

## 6.4 Kmitočtová charakteristika snímače

Každý snímač je svým způsobem nepřesný v převodu mechanických vibrací na elektrický signál a tyto nepřesnosti se projevují útlumem na některých frekvencích. Jelikož výroba snímačů na MyCello nástrojích neudává přesné parametry, byla podle měření vybraných tónů a jejich kmitočtové analýzy experimentálně zjištěna přibližná kmitočtová charakteristika. Při měření byly nahrávány stejné tóny zároveň na mikrofon a přes DI box, proto je možné tyto výsledky porovnat a zhodnotit, ve kterých kmitočtech přibližně snímač na violoncelle ubírá a kde přidává. Z každého tónu bylo vybráno několik prvních složek a z nich byla vytvořena charakteristika, v níž jsou vloženy hodnoty z obou způsobů nahrávání. Zároveň bylo přihlédnuto k tomu, že se zvyšujícími se složkami klesá intenzita, a proto byly vždy analyzovány zvlášť – tedy v jedné charakteristice jsou první harmonické, v druhé charakteristice druhé harmonické atd. Pro srozumitelnost byly charakteristiky následně vloženy do jedné, přičemž, aby nedocházelo k přeskokům, bylo

vždy ke všem hodnotám stejné harmonické přičteno stejné číslo tak, aby se vždy na sebe navazující hodnoty co nejvíce shodovaly. Výsledné charakteristiky následně byly srovnány s kmitočtovou charakteristikou běžnou pro kytarový snímač. [7] Většina snímačů snímá pouze do frekvence kolem 5000 Hz a složky s vyšší frekvencí už nejsou tolik slyšitelné, proto charakteristika je vykreslena po přibližně 5500 Hz.



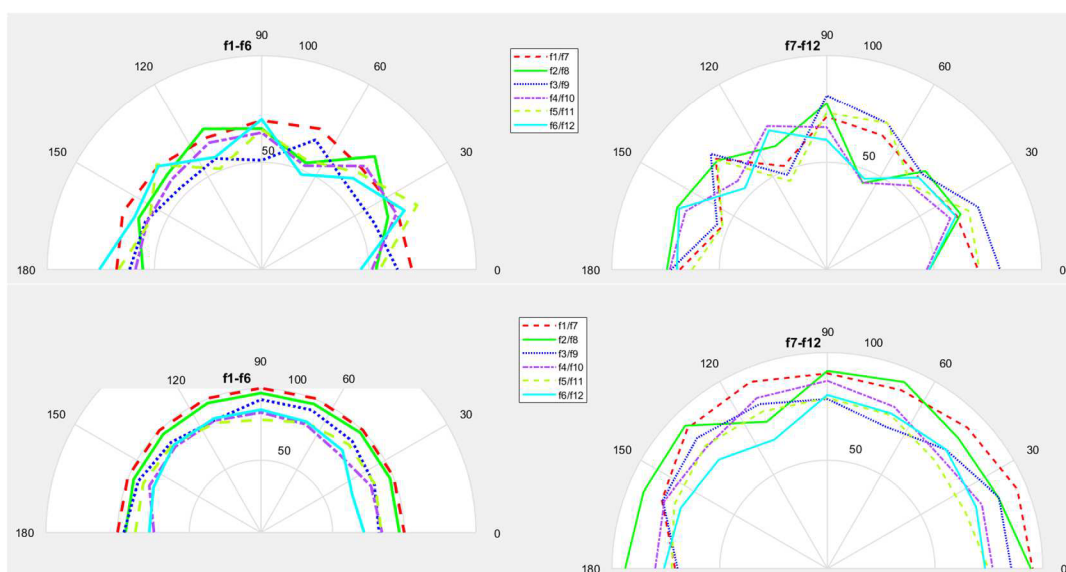
Obrázek 6.51 Experimentálně zjištěná frekvenční charakteristika

Při nahrávání mikrofonem jsou vidět na určitých frekvencích velké výkyvy, to jsou pravděpodobně frekvence podpořeny rezonancí materiálu. Až na tyto oblasti je modul většinou větší pro nahrávání linkou, ovšem za hodnotou 2500 Hz dochází ke zlomu, kde křivka začíná klesat. Nedochozí zatím k úplnému poklesu, který by znamenal, že za touto oblastí již snímač nesnímá a zároveň křivky opisují podobný tvar, což vylučuje, že by se opět jednalo o vlastní rezonanci nástroje. Dá se tedy předpokládat, že snímač částečně utlumuje všechny frekvence nad 2500 Hz. Dále jde vidět výraznější útlum v okolí 1500 Hz, kde snímač pravděpodobně také nemá přesný přenos.

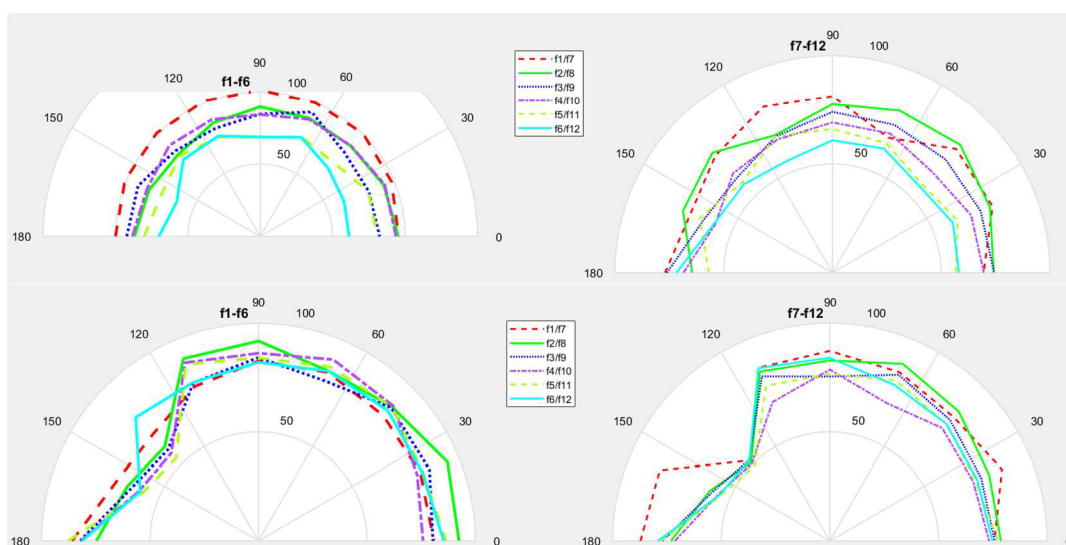
## 6.5 Směrovost

Směrovost violoncell byla měřena pomocí soustavy devíti mikrofonů rozestavených do půlkruhu. Zvukové stopy byly opět analyzovány pomocí programu MATLAB. Z něj byly exportovány grafy směrovosti zvolených tónů. Tónů pro měření směrovosti bylo vybráno menší množství než u ostatních měření, jelikož hlavním cílem tohoto měření je zhodnotit základní rozdíly ve směru vyzařování nástroje s a bez ozvučné skříně.

Na grafech jsou vyznačeny úhly směřování od 0 do 180 a vzdálenosti v cm od středu k okraji obvodu půlkružnice, který je vymezen mikrofony.



Obrázek 6.52 Směrnost tónu G2 na tradičním violoncelle (nahore) a violoncelle z kompozitních materiálů (dole)



Obrázek 6.53 Směrnost tónu A4 na tradičním violoncelle (nahore) a violoncelle z kompozitních materiálů (dole)

U obou výše zobrazených grafů směrnosti lze pozorovat podobné výsledky. Violoncello z kompozitních materiálů vyzařuje prvních několik harmonických srovnatelně s tradičním, avšak se zvyšujícími se násobky základní složky ubývá na intenzitě vyzářených prvků a dochází k výskytu „hluchých“ míst, do kterých vyšší frekvence nebudou vyzářeny.



## 6.6 Celkové porovnání

V této podkapitole bude uveden příklad celkového srovnání spektra a formantů. U spektrální analýzy bude zhodnoceno prvních 8 harmonických složek, které jsou primární pro základní barvu tónu, u LPC analýzy prvních 5 formantů. Hodnoty jednotlivých frekvencí a modulů intenzity jsou vypsány do tabulky. Porovnány budou tóny g a d'

### Porovnání spektra:

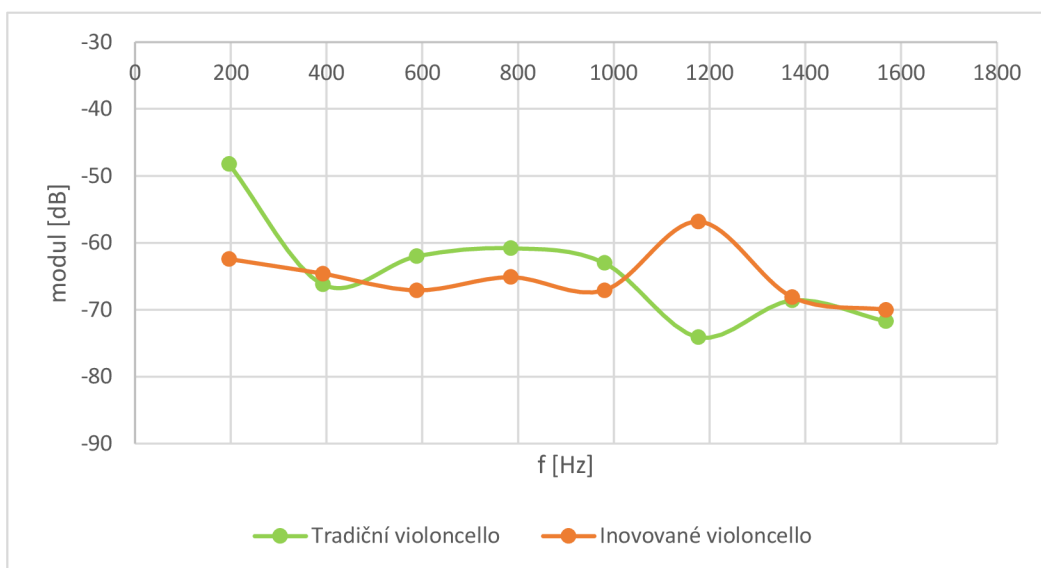
Tabulka 6.1 porovnání spektra tónu g

Tón g	Cello s dusítkem		Cello bez dusítka		MyCello mikrofonem		MyCello linkou	
	pořadí harmonické	f [Hz]	modul [dB]	f [Hz]	modul [dB]	f [Hz]	modul [dB]	f [Hz]
1.	197	-38,6	196	-48,2	196	-62,4	193	-42,4
2.	393	-61,6	393	-66,2	391	-64,6	386	-47,4
3.	589	-60,9	590	-62,0	587	-67,1	580	-56,5
4.	788	-70,9	786	-60,8	783	-65,1	772	-58,8
5.	983	-75,8	982	-63,0	978	-67,1	966	-60,9
6.	1182	-87,2	1179	-74,1	1174	-56,8	1159	-63,1
7.	1379	-75,3	1371	-68,6	1369	-68,1	1353	-68,1
8.	1576	-76,5	1567	-71,7	1565	-70,0	1546	-72,7

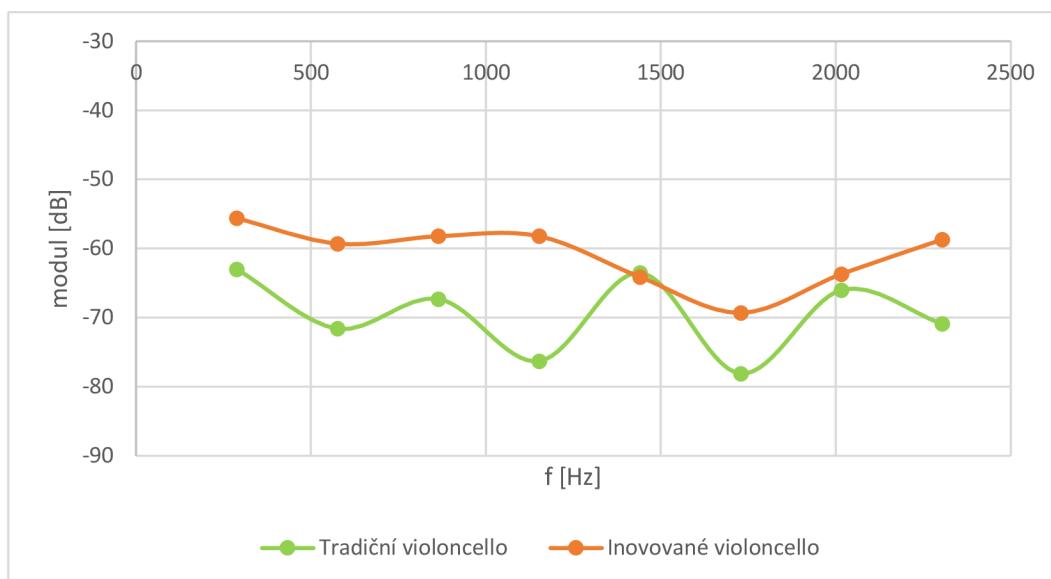
Tabulka 6.2 porovnání spektra tónu d'

Tón d'	Cello s dusítkem		Cello bez dusítka		MyCello mikrofonem		MyCello linkou	
	pořadí harmonické	f [Hz]	modul [dB]	f [Hz]	modul [dB]	f [Hz]	modul [dB]	f [Hz]
1.	292	-58,3	294	-63,0	291	-55,6	291	-47,5
2.	586	-64,1	589	-71,6	582	-59,3	582	-53,9
3.	880	-70,8	883	-67,3	873	-58,2	873	-56,8
4.	1173	-74,8	1177	-76,3	1164	-58,2	1164	-61,0
5.	1466	-75,5	1471	-63,5	1455	-64,1	1455	-64,3
6.	1760	-70,9	1764	-78,1	1746	-69,3	1746	-63,3
7.	2053	-68,5	2058	-66,0	2039	-63,7	2039	-66,0
8.	2348	-81,1	2352	-70,9	2330	-58,7	2330	-71,7

Pro lepší představu byly vytvořeny grafy s frekvenční charakteristikou. Samozřejmě samotné grafy spektra jsou přesnější, tento graf byl však vykreslen pro účel porovnání průběhů klasického a inovovaného violoncella.



Obrázek 6.54 Kmitočtová charakteristika 1.-8. harmonické složky tónu g



Obrázek 6.55 Kmitočtová charakteristika 1.-8. harmonické složky tónu d'

U obou tónů je viditelný rozdíl v poměru intenzity první harmonické složky oproti ostatním u tradičního violoncella. Inovované violoncello má charakteristiku více vyrovnanou a nedochází k takovým výkyvům, ovšem občas se na nějaké frekvenci objeví silný nárůst či pokles. Někdy jsou poklesy v souladu s tradičním violoncellem (např. na 6. harmonické složce tónu d'), ale u tónu g se projevil jev, kdy jsou charakteristiky v jednom místě přímo proti sobě, což může být způsobeno vlastní rezonancí materiálu inovovaného violoncella.

## Porovnání formantů:

Tabulka 6.3 porovnání spektra tónu g

Tón g	Cello s dusítkem		Cello bez dusítka		MyCello mikrofonem		MyCello linkou		
	pořadí formantu	f v maximu [Hz]	modul [dB]	f v maximu [Hz]	modul [dB]	f v maximu [Hz]	modul [dB]	f v maximu [Hz]	modul [dB]
1.		210	-33,7	197	-44,4	1146	-47,7	280	-37,2
2.		1387	-67,2	1341	-57,1	2223	-51,4	1305	-53,9
3.		2360	-69,7	2418	-67,5	3427	52,0	3161	-63,8
4.		4051	-76,4	4042	-71,0	4170	-51,1	4374	-60,6
5.		5802	-85,8	5748	-80,1	5776	59,3	5722	-67,0

Tabulka 6.4 porovnání spektra tónu d'

Tón d'	Cello s dusítkem		Cello bez dusítka		MyCello mikrofonem		MyCello linkou		
	pořadí formantu	f v maximu [Hz]	modul [dB]	f v maximu [Hz]	modul [dB]	f v maximu [Hz]	modul [dB]	f v maximu [Hz]	modul [dB]
1.		383	-54,2	429	-58,6	890	-47,1	501	-43,1
2.		1964	-61,8	1428	-55,7	2237	-48,6	1766	-51,5
3.		4196	-74,4	2230	-57,5	3483	-42,1	3345	-58,7
4.		6030	-75,4	3441	-68,6	4663	-56,4	6437	-64,1
5.		8148	-84,8	5580	-72,0	6487	-57,3	8639	-70,1

Z hodnot v tabulkách i z ostatních dat zjištěných pomocí LPC lze říct, že u inovovaného violoncella se často vůbec neprojeví první formant na stejném místě jako u klasického. Shodují se někdy až na druhém formantu. Občas se objeví formant v oblasti, ve které jej klasické violoncello nemá, tyto hodnoty jsou nejspíš způsobené vlastní rezonancí materiálu inovovaného violoncella. Moduly formantů také většinou u klasického violoncella výrazně klesají se zvyšujícím se kmitočtem, avšak u inovovaného klesají mnohem pomaleji.

**Srovnání v celém rozsahu spektra:**

Ze všech naměřených výsledků lze zhodnotit, že inovované violoncello obecně ubírá na prvních harmonických složkách a přidává především na středních kmitočtech. V dynamice forte je tento jev ještě výraznější a přidávají se u velké oktávy frekvence okolo 1000 Hz, i vyšší frekvence, např. u malé oktávy kolem 2000 Hz a u jednočárkované oktávy okolo 3000 až 5000 Hz. Když porovnáme nahrávky s dusítkem, je stále vidět značný rozdíl. Dusítko utlumuje vibrace kobyly, mění tedy barvu nástroje a zdánlivě tak ztlumuje formanty. Ovšem nosná složka a někdy i několik prvních harmonických složek, jsou srovnatelně hlasité s klasickým violoncellem. Barva zvuku se však nedá přirovnat k inovovanému violoncellu. Inovované violoncello při nahrávání linkou vykazovalo úplně jiné výsledky než zbytek měření. Modul výkonu klesal postupně s vyššími harmonickými složkami, a to i při hraní různými dynamikami, což znamená, že na rozdíl od ostatních měření se při změně dynamiky tolik nemění barva zvuku.

## 7. ZÁVĚR

V práci jsme se nejprve zaměřili na teoretické informace o violoncellech a jejich snímání pro porozumění dané problematice. V teoretickém obsahu je zahrnuta stručná historie, anatomie a akustika jak tradičního, tak inovovaného violoncella a informace o parametrech, které práce na violoncellech analyzuje. Také jsou shrnuty teoretické rozdíly mezi nástroji v ohledu hry a konstrukce. Subjektivně jsme je též porovnali ze zvukového hlediska. V praktické části jsme podrobně vysvětlili způsob měření a vyhodnocování výsledků získaných z MATLABu

Klasické violoncello bylo nahráno v bezodrazové komoře, stejně tak inovované, které se však nahrávalo i v nahrávacím studiu v budově fakulty s použitím mikrofonu i zapojené přes DI box.

U všech typů měření jsme provedli porovnání spektrogramů a formantových oblastí vybraných tónů. Pro měření v bezodrazové místnosti byla také vyhodnocena směrovost vyzařování.

Nahrávání klasického violoncella bylo provedeno i s dusítkem, které nejlépe simuluje ofiltrování rezonancí z těla nástroje. Inovované violoncello bylo změřeno také dvěma mikrofony, z toho jeden byl stejně jako v ostatních měřeních namířen na kobylku a druhý namířen na krk, jako snaha o zjištění vlivu rezonance materiálu na zvuk nástroje. Některé nahrávky jsou také provedeny pro různé dynamiky.

V práci je obsaženo několik zanalyzovaných tónů, které mohou poskytnout náhled na problematiku.

Výsledky z měření se zdají být pro tuto práci dostačující, avšak problémovou oblastí je hra smyčcem. Při měření je téměř nemožné vyvíjet na smyčec konstantní tlak a projevuje se i únava hráče.

Výstupem práce je tedy porovnání obou nástrojů, zde budou uvedeny nejdůležitější závěry z tohoto porovnání. Bylo zjištěno, že inovované violoncello má často velmi malou intenzitu základní složky, a může tedy místo hraného tónu zdánlivě znít jiný tón – jedna z vyšších harmonických složek, která má zrovna vyšší intenzitu. U nahrávání přes DI box bylo zjištěno, že amplitudy harmonických složek klesají téměř vždycky postupně, tedy amplituda je nepřímo úměrná pořadí harmonické složky, což samozřejmě také tvoří jinou barvu.

Dalo by se říct, že tyto výsledky jsou předpokládáné a inovované violoncello se pravděpodobně nesnaží napodobit zvukovou barvu klasického violoncella a je vyrobeno spíše pro jiné účely a hudební žánry. Umožňuje tak hudebníkům za přijatelnou cenu vyzkoušet jinou alternativu.

## LITERATURA

- [1] BADIAROV, Dmitry. The Violoncello, Viola da Spalla and Viola Pomposa in Theory and Practice. The Galpin Society Journal. Galpin Society, 2007, 60, 121-145. ISSN 00720127. Dostupné z: <http://www.jstor.org/stable/25163896>
- [2] VANSCHEEUWIJCK, Marc. *The Baroque cello and its performance*. Performance Practice Review, 1996, DOI: 10.5642. Dostupné z: <https://scholarship.claremont.edu/ppr/vol9/iss1/7>
- [3] VINCENT, Liu. *The cello: An amazing musical instrument*. Journal of Music and Dance. Citeseer 2011, 1, 6-15.
- [4] GUETTLER, Knut. *On the creation of the Helmholtz motion in bowed strings*. Acta Acustica united with Acustica 2002, 88, ISBN: 1610-1928.
- [5] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-297-8
- [6] FLETCHER, Neville H., ROSSING, Thomas D. *The Physics of Musical Instruments*, Second Edition, Springer, ©1998 Springer Science+ Business Media New York Originally published by Springer Science+ Business Media, Inc. in 1998 Softcover reprint of the hardcover 2nd edition 1998, ISBN: 978-1-4419-3120-7
- [7] LEMME, Helmuth EW. *The secrets of electric guitar pickups*. Electronic Musician, 2009.
- [8] SNELL, Roy C.; MILINAZZO, Fausto. *Formant location from LPC analysis data*. IEEE transactions on Speech and Audio Processing, 1993, 1.2, 129-134. ISBN: 1063-6676.
- [9] WALACH, Jan. *Aplikace Fourierovy analýzy na rozpoznávání kvality samohlásek podle jejich formantů*. Olomouc, 2013, 46 s. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra matematické analýzy a aplikací matematiky. Vedoucí práce RNDr. Tomáš Fürst, Ph.D.
- [10] DOYLE, James F. *Wave propagation in structures: an FFT-based spectral analysis methodology*. Springer Science & Business Media, 2012, ISBN: 1-4684-0344-3
- [11] STEFANOV, Pavel. *General acoustic features of string instruments*. 56th Science Conference of Ruse University, 2017
- [12] HOLBA, Stanislav. *Analýza spektra a směrovosti lesního rohu s různými nátrubky i různě pružnými rezonátory*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/125863>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
LPC	Linear predictive coding
FFT	Fast Fourier transform

# SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy z MATLABu jsou uloženy zvlášť.