

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Pavel Hoffman



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

INOVACE ŽEBROVÍ KYTARY DREADNOUGHT

THE DREADNOUGHT RIB GUITAR INNOVATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Hoffman

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

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

Student: Bc. Pavel Hoffman

ID: 195762

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Inovace žebroví kytary Dreadnought

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte analýzu nástroje určeného k inovaci s nástroji konkurenčními, zaměřte se na srovnání spekter a Chladniho obrazců a určete slabiny inovované kytary. Podle metod La Grange, Von Mises a Hoffmanových kritérií sestavte virtuální matici, pomocí které nasimulujete korpus nástroje, jeho nulové a maximální rezonanční body vzhledem k výšce signálu. Navrhněte způsob, jakým výkon v čase posílit, aby i déle držel – v úvahu vezme vlastnosti horní a spodní rezonanční desky, žebroví, impedanci kobylky, případně další kritéria.

Ve spolupráci s výrobcem nejprve sestavte nejméně jednu inovovanou horní desku s krkem, na které změřte potřebné parametry – rychlost zvuku v rámci rezonančních módů, velikost odporu žebroví, impedanci kobylky ad. Případně navrhněte, jak tuto část nástroje optimalizovat. Následně ve spolupráci s výrobcem sestavte nejméně jeden celý nástroj a znovu provede jeho mechanické a i akustické měření a srovnání s konkurenčním referenčním nástrojem. Zhodnoťte klady a zápory inovované kytary.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

[2] Požgaj, A. – Chovanec, D. – Kurjatko, S. – Babiak, M: Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 1997. 485 s. ISBN 80-07-00960-4

[3] Miláček, S. (2001): Modální analýza mechanických kmitů, Praha, Vydavatelství

ČVUT, ISBN: 80-01-02333-8 (brož.)

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

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

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Diplomová práce se zabývá analýzou spektra, frekvenční charakteristiky, Chladniho obrazců a simulací modální a harmonické analýzy v prostředí programu ANSYS akustické kytary. Při analýze akustické kytary jsou rozebrány různé detaily, které by mohly mít vliv na spektrum nástroje, především na jeho výkon v čase, počtu vygenerovaných harmonických složek a jejich výkonu.

Ze změřených, simulovaných a vypočítaných dat byla vytvořena inovace žebroví akustické kytary typu dreadnought. Následně byly vytvořeny čtyři akustické kytary s inovací. Inovované nástroje byly dále analyzovány a porovnány s akustikou kytarou před inovací a s konkurenční kytarou. Dále práce popisuje části akustické kytary, vlastnosti dřeva, teoretický základ a způsob měření.

Klíčová slova

akustická kytara, analýza spektra, ANSYS, dreadnought, frekvenční analýza, Chladniho obrazce, inovace žebroví, rezonanční módy, vlastnosti dřeva

Abstract

This diploma thesis deals with the spectrum analysis, frequency characteristics, Chladni figures and simulation of modal and harmonic analysis of an acoustic guitar in ANSYS program interface. In the acoustic guitar analysis, various details that can influence the instrument spectrum are discussed. Especially on its performance over time, the number of generated harmonic components and their performance.

Then the guitar bracing innovation of the dreadnought guitar was created from the measured, simulated and calculated data. Four acoustic guitars with the innovation were then made. These innovated instruments were further analyzed and compared with the acoustic guitar before the innovation and with a competitor's guitar. Furthermore, the thesis describes parts of an acoustic guitar, wood properties, theoretical background and measurement methods.

Keywords

acoustic guitar, spectrum analysis, ANSYS, dreadnought, frequency analysis, Chladni figures, guitar bracing innovation, resonant modes, wood properties

Bibliografická citace:

HOFFMAN, Pavel. *Inovace žebrovi kytary Dreadnought* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133467>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Pavel Hoffman
VUT ID studenta:	195762
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2020/21
Téma závěrečné práce:	Inovace žebroví kytary Dreadnought

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval 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 neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 23. května 2021

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph. D. za odborné vedení, konzultace, podnětné návrhy k práci a hlavně za umožnění psát diplomovou práci na toto téma, které mě osobně obohatilo. Dále bych chtěl poděkovat firmě Furch Guitar's a jejím zaměstnancům, zvláště panu Petru Furchovi a panu Radku Celnarovi za umožnění měření v prostorech jejich areálu, vstřícnost, ochotu a především za to, že vyrobili pro účely této diplomové práce inovované akustické kytary. Poděkování také patří mé rodině za podporu, opravu formy, gramatiky a víru.

V Brně dne: 23. května 2021

.....
podpis autora

Obsah

Úvod.....	14
1. Akustická kytara.....	16
1.1 Části a typy akustické kytary.....	17
1.2 Historie akustické kytary.....	18
1.3 Popis kytary určené k inovaci.....	19
2. Dřevo a akustická kytara.....	20
2.1 Dřevo a jeho vlastnosti.....	20
2.1.1 Fyzikální a akustické vlastnosti dřeva.....	21
2.2 Dřevo používané pro výrobu akustických kytar.....	22
3. Teoretický základ.....	24
3.1 Základní hodnocení tónu.....	24
3.2 Harmonická analýza.....	26
3.2.1 LPC analýza.....	27
3.3 Kmity, vlny a vlnová rovnice.....	27
3.4 Metodika programu ANSYS.....	29
3.5 Další metody použité při analýze.....	31
3.5.1 Chladního obrazce.....	31
3.5.2 Helmholtzova rovnice.....	32
4. Postup a popis měření.....	33
4.1 Měření spektra konkurenčních a inovovaných kytar.....	33
4.2 Měření frekvenční odezvy horní desky.....	33
4.3 Měření impedanční charakteristiky kobyly.....	34
4.4 Měření Chladního obrazců.....	35
4.5 Měření parametrů částí akustické kytary.....	35
4.6 Popis použitého zařízení.....	35
5. Modelování a simulace.....	37
5.1 Popis modelování a simulace.....	37
6. Vyhodnocení výsledků.....	40
6.1 Spektrální analýza kytar.....	40
6.1.1 Spektrum konkurenčních kytary.....	40

6.1.2	Porovnání kytar	43
6.1.3	Doplňující měření.....	46
6.2	Frekvenční analýza.....	47
6.3	Tabulky vypočtených hodnot	50
6.4	Simulace v programu ANSYS.....	53
6.4.1	Porovnání rezonančních módů horních desek.....	53
6.4.2	Porovnání frekvenční odezvy horních desek	56
6.4.3	Porovnání vlivu tvaru horní desky	60
6.4.4	Porovnání vlastností materiálu horní desky	61
6.4.5	Inovovaná horní deska s žebrováním	63
6.4.6	Inovace žebrování po zkušební hře	64
6.4.7	Inovace žebrování po simulaci	65
6.4.8	Analýza modelu akustické kytary a její komparace.....	67
6.4.9	Experimentální žebrování	70
7.	VYHODNOCENÍ INOVACE ŽEBROVÁNÍ	73
7.1	Spektrální analýza inovovaných kytar.....	73
7.1.1	Spektrální analýza dreadnought inovace 1.....	75
7.1.2	Spektrální analýza dreadnought inovace2.....	76
7.2	Frekvenční analýza inovovaných kytar	77
7.3	Porovnání inovovaných kytar s konkurenčními kytarami	78
7.4	Porovnání kytar před a po inovaci	79
7.5	Doplňující měření	81
	Závěr	83
	Doporučení.....	85
	Literatura.....	86
	Seznam příloh	88
	A OBSAH CD	89

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:	<i>ff</i>	...	fortissimo
	<i>mf</i>	...	mezzoforte
	<i>p</i>	...	piano
	<i>ppp</i>	...	piano pianissimo
	FFT	...	Fast Fourier Transform
	LPC	...	Linear predict coding
	HD	...	Horní deska
	UHD	...	Zbroušená horní deska
	EP	...	Epiphone dreadnought
	EP2	...	Epiphone dreadnought 2
	CO	...	Cort Earth 70E
	FT	...	For Tuner FG300
	DR	...	Furch dreadnought
	OM	...	Furch orchestral model
	DRMI	...	Dreadnought inovace 1
	DRVI	...	Dreadnought inovace 2

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Možnosti notace akustické kytary	16
Obr. 1.2: Kytara dreadnought [1].....	17
Obr. 1.3 Ukázka pár typů akustických kytar.....	18
Obr. 2.1 Tři typické roviny dřeva [4].....	20
Obr. 3.1 Schéma časové obálky ADSR [14]	25
Obr. 3.2: Harmonická řada [12].....	25
Obr. 3.3 Základní dělení spekter [13]	26
Obr. 3.4 Chladniho obrazce [19].....	32
Obr. 4.1 Schéma zapojení	34
Obr. 4.2 Výsledná frekvenční odezva horní desky	34
Obr. 4.3: Měření šíření rychlosti materiálem.....	36
Obr. 5.1: Model horní desky s žebrováním DR s předlohou	38
Obr. 5.2 Kompletní model akustické kytary	39
Obr. 6.1: Porovnání vlivu strun na spektrum kytary.....	41
Obr. 6.2: Porovnání spektra různých částí kytary	41
Obr. 6.3: Porovnání spektra různých částí kytary 2.....	42
Obr. 6.4: Porovnání spektra 4 konkurenčních kytar	42
Obr. 6.5: LPC – tón a^1 , konkurenční kytara.....	43
Obr. 6.6: LPC – tón E, dreadnought	44
Obr. 6.7: LPC – tón E, orchestral model	44
Obr. 6.8: Porovnání spektra EP a DR	45
Obr. 6.9: Porovnání spektra EP a OM	45
Obr. 6.10: Doba dozvuku na kytáře DR	46
Obr. 6.11: Frekvenční charakteristika horní desky kytary DR.....	47
Obr. 6.12: Frekvenční odezva těla kytary DR	48
Obr. 6.13: Frekvenční charakteristika těla kytary DR.....	48
Obr. 6.14: Frekvenční char v závislosti na tahu strun	49
Obr. 6.15: Impedanční charakteristika kytary EP.....	49
Obr. 6.16: Porovnání rezonančních módů s harmonickou řadou	53
Obr. 6.17: Porovnání rez. módů 2 typů horní desky.....	54

Obr. 6.18: Frekvenční odezva horní desky OM s módy	56
Obr. 6.19: Frekvenční odezva horní desky DR s módy	56
Obr. 6.20: Porovnání frekvenční odezvy horních desek.....	57
Obr. 6.21: Porovnání frekvenční odezvy horních desek s korekcí	57
Obr. 6.22: Korekce tloušťky	58
Obr. 6.23: Frekvenční odezva v závislosti	59
Obr. 6.24: Frekvenční odezva v závislosti na typu materiálu.....	59
Obr. 6.25: Frekvenční odezva v závislosti na tloušťce	59
Obr. 6.26: Vliv tvaru horních desek	60
Obr. 6.27: Vliv tvaru horních desek s žebrováním	61
Obr. 6.28: Porovnání poměru rychlostí.....	62
Obr. 6.29: Porovnání poměru rychlostí 2.....	62
Obr. 6.30: Porovnání poměru rychlostí 3.....	62
Obr. 6.31: Horní deska s žebrováním s pojmenováním žeber	63
Obr. 6.32: Módy u DR a dreadnought inovace1 do 1 kHz	64
Obr. 6.33: Módy u DR a DRMI od 1 kHz – 1,5 kHz	64
Obr. 6.34: Frekvenční odezva DR a DRMI	65
Obr. 6.35: Módy u DR a DRVI do 1 kHz.....	66
Obr. 6.36: Módy u DR a DRVI od 1 kHz do 1,5 kHz	66
Obr. 6.37: Frekvenční odezva DR a DRVI.....	66
Obr. 6.38: Frekvenční odezva kytary dreadnought inovace1 ANSYS	67
Obr. 6.39: Frekvenční charakteristika kytary DRMI.....	68
Obr. 6.40: 1. rezonanční mód [74 Hz] bez žebrování	68
Obr. 6.41: 1. rezonanční mód [96 Hz] s žebrováním.....	68
Obr. 6.42: 2. rezonanční mód bez žebrování	69
Obr. 6.43: 2. rezonanční mód s žebrováním	69
Obr. 6.44: 3. rezonanční mód kytary s žebrováním ANSYS.....	70
Obr. 6.45: 3. rezonanční mód kytary DRMI.....	70
Obr. 6.46: 7. mód při běžném a experimentálním žebrování	71
Obr. 6.47: 9. mód při běžném a experimentálním žebrování	71
Obr. 6.48: Módy do 1 kHz při běžném a experimentální žebrování	72
Obr. 6.49: Porovnání frekvenční odezvy při běžném a experimentálním žebrování ...	72

Obr. 7.1: Porovnání DRMI1 a DRMI2	73
Obr. 7.2 Porovnání spektra kytar DRVI	74
Obr. 7.3: Porovnání spektra DRMI a DRVI kytar	74
Obr. 7.4: Porovnání dynamiky kytary DRMI	75
Obr. 7.5: Porovnání vzdálených tónů na kytáře DRMI	76
Obr. 7.6: Porovnání dynamiky kytary DRVI.....	76
Obr. 7.7: Porovnání vzdálených tónů na kytáře DRVI.....	77
Obr. 7.8: Porovnání Frekvenční charakteristika kytar DRMI a DRVI.....	77
Obr. 7.9: Porovnání Frekvenční odezvy kytar DRMI a DRVI.....	78
Obr. 7.10: Porovnání spektra kytar EP a DRMI	78
Obr. 7.11: Porovnání spektra kytary EP2 a DRVI.....	79
Obr. 7.12: Porovnání kytar před a po inovaci	80
Obr. 7.13: Porovnání frekvenční char. horních desek před a po inovaci.....	81
Obr. 7.14: Porovnání 3. módu na inovovaných kytarách	82

Seznam tabulek

Tab. 6.1: Pozice rezonančních módů částí kytary.....	45
Tab. 6.2 Naměřené hodnoty rezonančních smrků	50
Tab. 6.3: Naměřené hodnoty.....	50
Tab. 6.4: Vypočítané vlastnosti pružnosti rezonančních smrků	51
Tab. 6.5: Vypočítané vlastnosti pružnosti.....	51
Tab. 6.6: Vypočítané akustické vlastnosti	52
Tab. 6.7: Rezonanční módy: Rez_smrk_1	54
Tab. 6.8: Rezonanční módy: Rez_smrk_tab_4mm.....	54
Tab. 6.9: Rezonanční módy: Rez_smrk_tab_3mm.....	55
Tab. 6.10: Porovnání pozic rezonančních módů.....	67
Tab. 7.1: Tabulka rychlostí v rámci rezonančních módů.....	82

ÚVOD

Cílem diplomové práce je zobrazení spektrální analýzy konkurenční kytary a porovnání výsledků s bakalářskou prací paní Bc. Hany Trávníčkové. Dále vytvoření virtuálního modelu horní desky, žebrování a celého korpusu akustické kytary za pomoci programu ANSYS a simulace rezonančních módů, v poslední řadě měření akustických a mechanických vlastností inovované akustické kytary a porovnat je s vlastní domněnkou, akustickou kytarou před inovací a s konkurenční kytarou, popsání jejich slabin či zhodnocení v čem se dané kytary zlepšily. Před zahájením samotného měření bylo předpokládáno, že je horní deska tenká, a že by bylo zapotřebí ji udělat tlustší. Jinými slovy je horní deska podladěná a může podporovat pouze nižší kmitočty.

Diplomová práce se zabývá spektrální analýzou akustických kytar, především pak analýzou horní desky akustické kytary s žebrováním a bez žebrování. V diplomové práci jsou pomocí naměřených zvukových vzorků popsány rozdíly spektra, dohromady deseti akustické kytary a ve výkonu jejich vyšších harmonických složek v čase a bohatosti spektra. Dále byly z naměřených hodnot vypočteny důležité konstanty pro vytvoření ortotropní matice tuhosti, která sloužila k simulovanému výpočtu rezonančních módů a frekvenční odezvě horní desky s žebrováním, bez žebrování a celého korpusu akustické kytary za pomoci programu ANSYS.

První 3 kapitoly v diplomové práci se zabývají popisem akustické kytary, především pak jejími částmi. Další kapitola věnuje pozornost dřevu jako takovému a zaměřuje se na popis jeho fyzikálních a akustických vlastností s přispěním několika důležitých vzorců. Poslední kapitolou těchto 3 kapitol, které se zabývají převážně teorií je kapitola, které se zabývá přiblížením teoretického základu pro lepší pochopení měření a analýz.

Ve čtvrté kapitole je pak popsán postup, jakým způsobem se získávaly zvukové vzorky, jakým způsobem byla měřena rychlost šíření zvuku na neopracovaných horních deskách, spodních deskách, lubech a kobylce. Jsou zde vypsány tóny, které byly nahrávány, a to, v jakých pozicích byla měřena rychlost šíření zvuku. Také je zde popsán způsob jakým způsobem probíhalo měření jednotlivých analýz. V poslední řadě potom použité vybavení.

Modelování a simulace v programu ANSYS jsou popsány v páté kapitole. Zabývá se stručným představením programu, modelováním horní desky, celého korpusu akustické kytary a objasněním toho, jakým způsobem probíhala simulace od vstupních dat přes vytváření modelu po zobrazení vypočítaných dat.

V šesté kapitole je popsáno vyhodnocení měření, tato část je v diplomové práci nejdůležitější a je jejím jádrem. Jsou zde uvedeny poznatky vycházející z porovnání. V kapitole porovnávám a popisuji rozdíly spektra a frekvenční charakteristiky akustických kytar, rezonančních módů a frekvenční odezvy horních desek a žebrování. Rozdíly jsou zde popsány a porovnány za pomoci tabulek, grafů a výstižných komentářů. Součástí kapitoly je podkapitola, která se zabývá různými výpočty od výpočtu Youngova modulu pružnosti po akustický vlnový odpor.

Poslední kapitola se zaměřuje na komparaci inovovaných kytar mezi sebou, konkurenčními kytarami, kytarou před inovací a kytarou, které se měla inovace přiblížit.

Pro účel diplomové práce byly zvoleny 3 typy akustických kytar. Akustická kytara typu orchestral model má vlastnosti, které chceme určit a tyto vlastnosti přenést na akustickou kytaru typu dreadnought. Třetí typ kytary slouží k porovnání samotných

dreadnoughtů mezi sebou. Porovnáván je zde čas, po který se generují vyšší harmonické složky dle druhu kytary, počet vygenerovaných harmonických složek a jejich výkon. K vytvoření správné inovace sloužila simulace v prostředí ANSYS a také samotná hra a měření na akustických kytarách. Pro pochopení mechanického obvodu akustické kytary byla porovnávána frekvenční odezva horních desek dle typu desky, tloušťky, tvaru a zvoleného materiálu a jeho poměru rychlostí v daných směrech a samozřejmě také žebrování před a po inovaci na samotné horní desce a posléze celém korpusu akustické kytary.

Diplomová práce je určena pro výrobce akustických kytar či domácí kutily a pro lepší pochopení, které z parametrů mají vliv na horní desku akustické kytary a zvlášť potom jaký vliv. Podle této práce se mohou řídit výrobci při výrobě horní desky tohoto nejrozšířenějšího a nejpoblárnějšího hudebního nástroje.

1. AKUSTICKÁ KYTARA

Akustická kytara patří mezi nejoblíbenější hudební nástroje dnešní doby. Velice často ji lze slyšet v populární hudbě jako rytmický či sólový nástroj. Je také jedním z nástrojů, který bývá vyhledáván i méně zkušenými muzikanty. Ve své podstatě jde o poměrně skladný hudební nástroj. Z tohoto důvodu bývá častým společníkem muzikantů či trampů na dlouhých čundrech, u ohniště, u táboráku, na horské chatě či při pikniku v přírodě.

Akustická kytara patří do skupiny drnkacích chordofonů. Chordofon je hudební nástroj, který vytváří zvuk za pomoci vibrační struny, rozděluje se dále na drnkací, smyčcové a klávesové strunné hudební nástroje. Akustická kytara má spousty podobných strunných nástrojů například banjo, ukulele a sitaru. Mezi její předchůdce můžeme zařadit luky s rezonátory z tykve či kokosu, kitharinu, lyru, vihuelu, rezonanční či barokní loutnu.

Akustická kytara má více druhů, které se liší velikostí (3/4 a celá), tvarem ozvučné/rezonanční skříně (Jumbo, Dreadnought, Orchestral model a klasická kytara), může být pražcová, bez pražcová a mohou se používat struny nylonové nebo kovové. Akustickou kytaru lze amplifikovat pomocí piezoelektrických snímačů s předzesilovači, amplifikací vzniká elektroakustická kytara.

Kytara mívá obvykle 6 strun laděných v E standard (E, A, d, g, h, e¹). Ladění a počet strun se liší v závislosti na hraném žánru instrumentalisty. Některá ladění mohou hráči napomoci k pohodlnější a rychlejší hře určitých stupnic či akordů v nich.

Možnost jak zapsat, „notovat“ akustickou kytaru je jedna z nejrozšířenějších. Skladby lze zapsat do „klasického“ notového zápisu, také pomocí zapsání názvu samotného akordů nebo rozšířeněji s akordovou značkou. Další notace je psaná do tzv. tabulatury (angl. tablature). Tato notace je velmi oblíbená především v kruzích „nemuzikantů“ lidí, kteří neumějí číst klasický notový zápis. Tabulatura je složená z linek podle počtu strun nástroje, čísla je potom na jednotlivých linkách označen pražec, na kterém se má hrát (viz obr. 1.1).

The diagram illustrates three methods of notation for an acoustic guitar chord, specifically the G major chord. At the top, four chord diagrams are shown for G, C, D, and E. Each diagram shows a 6-string guitar fretboard with dots indicating finger positions and 'x' marks for muted strings. Below these are three rows of notation:

- Akordová značka:** Shows the chord symbols G, C, D, and E.
- Akord:** Shows the standard musical notation for the G, C, D, and E chords in a treble clef, G-clef, 4/4 time signature.
- Tabulatura:** Shows the guitar tablature for the G, C, D, and E chords. The strings are labeled T (Treble), A, B, and B (Bass). The fret numbers are: G (3, 0, 0, 0, 2, 3), C (1, 0, 2, 3, 0, 0), D (2, 0, 2, 2, 0, 0), and E (1, 2, 2, 0, 0, 0).

Obr. 1.1 Možnosti notace akustické kytary

1.1 Části a typy akustické kytary

Části akustické kytary se dají rozdělit na stavební a funkční části. Stavební části popisují jednotlivé části kytary například krk, tělo, ladící mechanika a kobylka, všechny části lze vidět na obr. (1.2).



Obr. 1.2: Kytara dreadnought [1]

Stavební části mají vliv na formování formantových oblastí, barvu, intenzitu, dobu trvání a výšku tónu. Tyto parametry nám v převážné většině mění materiál, ze kterého jsou dané části vyrobeny. Dalším faktorem budou velikost a hmotnost dané části. Bude-li příliš těžká nemusí materiál rezonovat. Například hlavní funkcí žebrování je výtluha horní desky před poškozením od tahu strun. Vedlejší funkcí žebrování je jeho rozložení, se kterým je možné a je třeba s ním pracovat. Uspořádání žebrování má totiž vliv na impedanci horní desky a tvorbu uzlů na horní desce čímž mění její vlastnosti.

Rozdělení na funkční díly kytary, popisuje části, jako takové které mají i svou určitou vlastnost. Základními funkčními částmi jsou excitátor, oscilátor, rezonátor a radiátor. Excitátor je vstupní budicí prvek (prvek kterým budíme oscilátor), u akustické kytary může být excitátorem prst, náprstek, trsátko (různé tloušťky) a experimentálně smyčec a jiné. Typ excitátoru má vliv na výslednou barvu, výšku, intenzitu a délku tónu. Hra trsátkem přinese rychlejší attack a ostřejší spektrum, tón bude konkrétnější, hra prsty bude mít pomalejší attack a měkké spektrum. Při výrobě kytary je vhodné vědět k jakému typu hry bude primárně určena. Lze upravit některé vlastnosti akustické kytary, tak aby lépe vyhovovaly danému stylu hry.

Oscilátor je buzen excitátorem a jeho vlastností je kmitání. Na akustické kytare je možné měnit typ oscilátoru, kterými jsou struny. Ty mohou být z různých slitin kovů, mohou být plastové, motané nebo nemotané. Každý z oscilátorů bude mít jiné spektrum a především odlišnou tvorbu vyšších harmonických složek. Ve spektru bude také docházet inharmonickým poměrům těchto složek, dále se může objevovat Fantom Partialis. Spolu oscilující části jsou nazývány rezonátor. Tyto části spolu nejen oscilují ale také zesilují a vyzářují zvuk. Ve spektru bude vytvářet formantové oblasti pro každý díl systému. Oscilace jsou u akustické kytary přeneseny na rezonátor přes kobylku. Dále rezonuje dolní deska, luby, krk a vzduch uvnitř kytary, dutina (tělo) s otvorem se chová jako Helmholtzův rezonátor. Typ strun, ladění, tuhost kobylky a horní deska představují pro přenos kmitání z oscilátoru na rezonátor impedanci (měrný odpor). Při změně těchto parametrů bude docházet ke změnám poloh formantových oblastí ve spektru. Také bude mít vliv na sustain a release tónu. Formantové oblasti mohou být buď pevně dané (např.

tělo kytary), či pohyblivé neboli volné. Pokud je v případě pohyblivých formantových oblastí rezonátor zvětšován či zmenšován, mění se rezonanční mód tělesa (např. lidská ústa). Poslední funkční částí je radiátor, který vyzařuje energii kmitání – zvuk, může ho posílit či směřovat vyzařování do místa v prostoru u akustické kytary to je rezonanční otvor/výřez.

Typy akustické kytary se rozlišují podle jejich tvaru a podle stylu, ke kterému je kytara určená. Pro určený styl má potom kytara vyhovující vlastnosti. Dále bude představeno pár vybraných druhů. Klasická kytary (tzv. španělka) má barevnější, měkčí a kulatější zvuk, struny jsou na této kytaře nylonové a má tlustý krk a menší počet pražců. Na klasickou kytaru se hraje prsty, pro ostřejší barvu pomocí nehtů. Využívá se v klasické hudbě či flamencu. Jumbo kytara má díky jejímu silnému a velkému tělu robustnější a basovější zvuk. Na jumbo kytaru se používají kovové struny. Má užší krk než španělka a větší počet pražců. Vyniká hlavně v popu, country, folku, jazzu a v blues. Vhodná je pro prstovou a drnkací hru trsátkem. Kytara typu orchestral model má ostřejší zvuk a díky menšímu tělu vyniknou vyšší frekvence. Stejně jako kytara jumbo má úzký krk a lze na ni hrát jak prsty, tak drnkát trsátkem. Použit lze ve stejných žánrech. Kytarou, která je předmětem inovace v této diplomové práci je kytara dreadnought (westernová), svou velikostí a barvou se pohybuje mezi jumbem a orchestral modelem. Má též úzký krk a je užívána např. v rocku či metalu. Všechny kytary je možné vidět na obr. (1.3).



Obr. 1.3 Ukázka pár typů akustických kytar

1.2 Historie akustické kytary

Akustická kytara má velice dlouhou a komplikovanou historii a mnoho teorií o svém evolučním procesu. Často je zmiňováno, že kytara je výsledkem vývoje loutny. Některé články uvádějí její počátky už kolem roku 2500 př. n. l. . Tento letopočet je podložen reliéfem ze sumerského Nippuru, na kterém je vyobrazen hudebník s drnkacím nástrojem podobajícím se hranaté kytaře. Není také známo, jak vznikl její nynější název, a existuje hned několik hypotéz. První hypotéza tvrdí, že název vznikl z perského názvu „sehtar“, kde „seh“ má význam číslovky 3 a „tar“ se překládá jako

struna. Tento název je blízký pro indický strunný nástroj „sitara“. Dříve byl ale rozšířenější a pojmul do sebe všechny strunné nástroje. Podle další hypotézy pochází z arabského „kitára“ a řeckého „kithara“ oba názvy jsou si velice podobné (konkrétně s českým názvem). Podobnost se ale připisuje španělskému názvu „guitarra“.

Do dnešní podoby se tedy kytara vyvíjela několik století a její vývoj je zaznamenán v reliéfech a starodávné či církevní literatuře. Na počátku byl luk s napnutou tětivou, ke které se začaly přidávat další struny a různé typy korpusů rozdílných velikostí a tvarů sloužících jako rezonátor. Vznikaly lyry a harfy. První lyra se nazývala právě „kithara“. Do podoby loutny se dostala okolo roku 700 n. l. [2].

Španěl Antonio Torres Jurado se podílel na vývoji „španělské“ kytary v polovině 19. století. Optimalizována byla velikost kytary oproti kytarám té doby, přesněji šířka těla a výška lubů. Torres také přišel s novým žebrováním vějířovitého typu. Dříve bylo používáno pouze příčné žebrování, které se zachovalo na dolních deskách.

Pro kytaru bylo dalším významným momentem založení firmy Martin & Company roku 1833 Christianem Frederickem Martinem, kterému se podařilo kytaru díky hojnější výrobě (manufaktura) zviditelnit na trhu a tím ji zpopularizovat. Kolem roku 1929 společnost Martin & Company přišla na trh se dvěma novými tvary akustické kytary, a to s typem orchestral model a dreadnought. V roce 1950 si nechal patentovat žebrování typu „X“, které je používáno dodnes. Většina firem zabývajících se výrobou akustických kytar se drží navrženého standardu s žebrováním „X“, pouze jej modifikují [3].

1.3 Popis kytary určené k inovaci

Části kytary, typu dreadnought od značky Furch, jež je určená k inovaci jsou popsány na obr. (6.5). Kytara má menzuru (vzdálenost mezi nultým pražcem a kobyolkou) 650 mm. Šířka nultého pražce je 45 mm. Tělo měří na výšku 510 mm a v nejširší části 420 mm. Tloušťka těla se u dreadnoughtu mírně liší, kytara má tloušťku 127 mm, tloušťka se zmenšuje směrem ke krku kde má 97 mm.

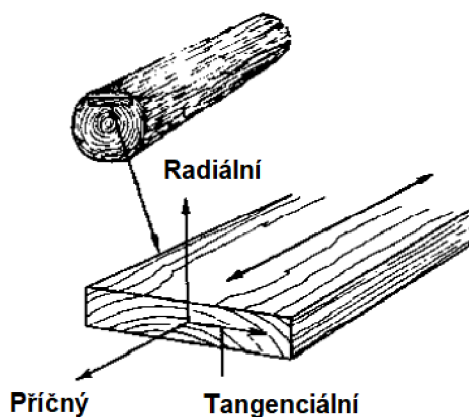
Konkurenční kytara též typu dreadnought má stejné rozměry liší se pouze tloušťkou těla, která je zkosená od 115 mm po 95 mm. Kytara typu orchestral model (značky Furch) má oproti výše uvedeným kytarám menší rozměry a jiné zakřivení těla. Tělo měří 490 mm na výšku a 385 mm na šířku. Tloušťka těla je na jejím začátku 102 mm, zatím co u krku má 82 mm.

2. DŘEVO A AKUSTICKÁ KYTARA

Kapitola se bude zabývat vlastnostmi dřeva a jeho použitím k výrobě akustických kytar. Vlastnosti dřeva mají velký vliv na výslednou barvu, intenzitu, výšku rezonančního kmitočtu různých částí kytary a na dobu trvání tónu. Vliv mají také na mechanické vlastnosti, aby např. nedocházelo k deformacím nástroje při tahové síle strun.

2.1 Dřevo a jeho vlastnosti

Dřevo je nehomogenní, anizotropní i ortotropní materiál. Ortotropní materiál je takový materiál, který má stejné vlastnosti v určitých kolmých směrech. Anizotropní materiál má v každém směru odlišné vlastnosti. Některá dřeva jsou ortotropní a jiná anizotropní. Vlastnosti dřeva jsou zkoumány ve třech řezech, protože v každém směru jsou jeho vlastnosti různé (anizotropie). Řezy se dělí na tři základní a to na příčný, radiální (podélný) a tangenciální (podélný) viz obr.(2.1).



Obr. 2.1 Tři typické roviny dřeva [4]

Dřevo lze také popsat jako tvrdé a pórovité rostlinné pletivo. Toto rostlinné pletivo se skládá z celulózových vláken, přesněji z celulózy (40-50 %) a hemicelulózy (20 až 30 %), dále se skládá z ligninu se zastoupením (20-30 %) a ostatních prvků (1-2 %), jako jsou například minerály.

Celulózová vlákna jsou příčinou anizotropních vlastností dřeva (jak mechanických tak fyzikálních). Tato vlákna jsou odolná proti tahovým silám a určují pevnost dřeva. Lignin je rozložený mezi celulózovými fibrilami. Lignin je tedy pevně spjatý s celulózovými vlákny, lze si představit jako opakující se vlnu, na počátku je zastoupen z většího podílu lignin, poté dochází ke spletní ligninu a celulóza a následuje část, kterou zastupuje především celulóza. Lignin tlumí vliv vlhkosti. Vychází tak z experimentu, který potvrdil, že když odstraníme z dřeva lignin, tak mokré dřevo ztratí svou pevnost. Lignin je pojivovou vazbou mezi celulóza – celulóza viz opakující se vlna. Pevnost v tlaku a pružnost ligninu udává vlastnosti dřeva. Dřevo s větším zastoupením ligninu a s větší pružností bude považováno za dřevo s vhodnými rezonančními vlastnostmi. Jehličnaté stromy mají o 10-15 % více ligninu než listnaté stromy. Smrk má největší zastoupení ligninu mezi jehličnany. Z tohoto důvodu (a

samozejmě nejen z tohoto důvodu) má smrk vhodné akustické vlastnosti pro stavbu hudebních nástrojů.

Dřevo se dělí na dvě základní skupiny a to na jehličnaté dřeviny a listnaté dřeviny. Tyto skupiny se dále dělí na tvrdá (těžká) a měkká (lehká) dřeva. Hustota a tvrdost dřeva také může napovědět jaké zvolit dřevo pro výrobu hudebních nástrojů. Porovnání hustoty dřeva jednotlivých druhů je vidět v tab. (6.5). Další parametry pro vyhodnocení fyzikálních a akustických vlastností dřeva budou popsány v podkapitole 2.1.1.

Stavba či struktura dřeva se rozlišuje podle metody zkoumání na makroskopickou, mikroskopickou a submikroskopickou stavbu. Makroskopická stavba dřeva zkoumá všechny znaky, které lze vidět pouhým okem nebo zvětšovací lupou. Mezi takové znaky patří například letokruhy, dřevné paprsky, barva, lesk, hustota a tvrdost. Mikroskopická stavba je zkoumána na úrovni buněk, je tedy zapotřebí využití mikroskopu. Submikroskopická metoda hledá odlišnosti v každé konkrétní stavbě buněčné stěny a jejím chemickém složení [5].

2.1.1 Fyzikální a akustické vlastnosti dřeva

V této kapitole budou stručně představeny měřené veličiny a jejich význam. Budou zde vypsány vzorce potřebné pro jejich výpočet. Uvedené veličiny mají význam pro hodnocení fyzikálních a akustických vlastností materiálu, v případě této diplomové práce právě dřeva. Pro vytvoření modelu materiálu v programu ANSYS bylo nutné některé veličiny znát nebo je dopočítat.

Youngův model pružnosti v tahu E [MPa] je definován jako poměr napětí a deformace jím vyvolané, lze tedy vyjádřit vztahem:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

kde σ je napětí v tahu [MPa] a ε je poměrná deformace [-], tu lze vyjádřit vztahem:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}; \Delta l = l - l_0 \quad (2.2)$$

kde l_0 je původní délka tělesa [m] a l je délka tělesa po prodloužení [m].

Youngův model pružnosti vypovídá o pevnosti látky a její možné deformaci, čím bude jeho hodnota vyšší, tím bude zapotřebí většího napětí na vytvoření stejné deformace.

Z Youngova modulu pružnosti lze vypočítat rychlost šíření zvuku c [m.s⁻¹] vztahem:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.3)$$

kde ρ je objemová hustota [kg.m⁻³] [6].

Youngův modul pružnosti ve smyku G [MPa] je definován jako poměr smykového napětí a deformací jím způsobenou, u ortotropního materiálu lze například vypočítat pomocí vztahu:

$$G_{ii} = G_{xy} = \frac{\sqrt{E_x E_y}}{2(1 + \sqrt{\mu_{xy} \mu_{yx}})} \quad (2.4)$$

kde μ je Poissonovo číslo [-] [7]. Udává pevnost materiálu ve směru rotace (zkroucení) a její možnost deformace obdobně jako u Youngova modulu pružnosti v tahu.

Poissonovo číslo udává poměr mezi přetvořením tělesa ve směru kolmém na působící sílu a ve směru rovnoběžném na působící sílu. Určuje tedy schopnost materiálu se deformovat. Poissonovo číslo pro izotropní materiál, lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_p} \quad (2.5)$$

kde ε_z je poměrné zkrácení [-] a ε_p je poměrné prodloužení [-] [8].

Akustická konstanta K [$\text{m}^4 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$], často udávaná jako bezrozměrná, vyjadřuje schopnost materiálu zvuku vyzařovat zvuk bez zkrácení, čím vyšší bude akustická konstanta, tím lepší bude mít materiál akustické schopnosti.

Tlumení zvuku způsobené radiací γ [$\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$] je jednou z možností přeměny působící energie. Materiál (tedy část energie) se přemění na vnitřní tření, část se přemění na teplo a část energie je materiálem vyzářena. Tyto dvě konstanty vyjadřují rovnice (2.6).

Vnitřní tření, také nazývané jako akustická impedance Z [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] je popsán rovnicí (2.7).

$$K = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} = \gamma = \frac{c}{p} = p^{-1} \sqrt{\frac{E}{p}} \quad (2.6)$$

$$Z = \rho c = \rho \sqrt{\frac{E}{p}} \quad (2.7)$$

Logaritmický dekrement útlumu δ [-] hodnotí ztrátu, která je způsobena tlumeným kmitáním. To nastává v případě, kdy na rezonanční či kmitací systém přestane působit budící síla a vlivem vnitřních třecích sil začne působit proti pohybu mechanické soustavy. Energie se z části vyzáří do okolí a z části přemění na teplo. Logaritmický dekrement útlumu lze vypočítat ze vztahu:

$$\delta = \frac{A_1}{A_2} \quad (2.8)$$

kde A_n jsou amplitudy po sobě jdoucích vln [6].

2.2 Dřevo používané pro výrobu akustických kytar

Výběr dřeviny pro výrobu akustické kytary ale nejen akustické kytary ale dalších hudebních nástrojů je velice důležitý podílí se totiž na výsledné barvě a výšce tónu nástroje. Je nutné poznamenat, že vliv na barvu a jiné parametry má také samotný tvar nástroje, protože tvar například horní desky bude určovat počáteční pozice uzlů vzniklých stojatým vlněním. Tvar, pozice, velikost a plocha přilepeného žebrování budou určovat tvorbu dalších uzlů. Těmito parametry je možné si předpřipravit barvu a

další vlastnosti nástroje. Volbou vhodného dřeva budou tyto parametry podpořeny. Pro různé části akustické kytary se používají odlišné dřeviny a další materiály. Každá z dřevin přidá do výsledné barvy svůj podíl. Ve spektru hraného tónu lze potom zachytit tyto oblasti jinak zvané formantové oblasti. Pozorovat lze rezonance horní desky, dolní desky, krku s hmatníkem, lubů a vzduchové sloupce v dutině nástroje.

Vlastnosti, které by měly mít dřeviny použité pro výrobu jsou velká pružnost, kterou mají bezesporu měkká dřeva, maximální hodnotu akustické konstanty, minimální hodnotu vnitřního tření, tedy minimální hodnotu logaritmického dekrementu útlumu a akustické impedance. Těmito vlastnostmi bude dosaženo maximálního přenosu energie do prostoru kolem (vzduchu)[9].

Na výrobu horních desek se nejčastěji používá cedrové dřevo a rezonanční smrk. Červený cedr (nejčastěji těžený v Kanadě) je měkkčí než většina smrků. Díky měkkosti dosahuje lepších dynamických vlastností, ale jeho barva bude z důvodu menší rychlosti šíření zvuku potměnější. Rezonanční smrk má o něco jasnější a průraznější barvu, rychlost se v něm šíří rychleji a je o něco tvrdší než cedrové dřevo. Akustická konstanta smrkového dřeva se pohybuje na hodnotách v rozmezí od 11 do 13, takže má velice dobré vyzařovací vlastnosti. U rezonančního smrku je důležité aby rostl po dlouhou dobu uprostřed hustého lesa – v oblastech, kde nejsou vysoké teplotní výkyvy. To zajistí rovnoměrný růst letokruhů (rovnoměrný nárůst celulózy a ligninu). Za rezonanční smrk se označují dvě odrůdy, a to smrk sitka a adirondack ze Severní Ameriky. K výrobě žebrování se používají obvyklejší smrky.

Pro výrobu dolní desky, lubů a krku se používá vícero materiálů, mezi ty nejpoužívanější patří mahagon a palisandr. Dále je možné používat dřeviny s krásnou kresbou dřeva jako jsou ořechy a vzácnější dřeviny. Mahagon se používá africký a hondurský má vysokou hustotu a poměrně vysokou rychlost šíření zvuk, tím bude docíleno kulatějších výšek. Palisandr podpoří ještě vyšší frekvence, které budou ostřejší díky ještě větší hustotě, než jakou má mahagon. Palisandr se používá buď indický nebo madagaskarský. Palisandr se navíc používá jako hmatník nebo sedlo pro uchycení kobylinky.

Kobylika a hmatník se dále mohou vyrábět například z ebenového dřeva, který má ze všech zjmenovaných dřevin největší hustotu a to dvojnásobnou oproti palisandru. Nejčastěji se využívá africký eben. Díky své tvrdosti je vhodný pro přenos vibrace struny na horní desku. Přehled o vlastnostech používaných dřevin je znázorněn v tab. (6.5) [10].

3. TEORETICKÝ ZÁKLAD

Tato kapitola se zabývá seznámením se se základní teorií hodnocení tónu, harmonické analýzy, vlnové rovnice, metodikou programu ANSYS a popisem metod použitých k analýze akustické kytary.

3.1 Základní hodnocení tónu

V této diplomové práci je možné se často setkat s pojmy barva, intenzita, výška a doba trvání tónu. Tyto pojmy slouží k základní analýze tónu, lze je hodnotit pouhým poslechem. Jedná se o poměrně rychlou a přesnou prvotní analýzu, avšak je dobré poznamenat, že se jedná o subjektivní hodnocení. Při hodnocení více subjekty se mohou výsledky hodnocení lišit. V takovém případě je vhodné výsledky porovnat s objektivní metodou například s vyobrazením spektra nebo spektrogramu. Při hodnocení tónu je příkladně vždy využívat subjektivního i objektivního hodnocení. Menší příklad proč používat obě metody. Objektivní metoda – ve spektru hraného tónu je vidět, že tón je bohatý na vyšší harmonické složky v ideálním harmonickém poměru a že výkonová hustota spektra je rovnoměrná. Subjektivní metoda – barva tónu je až příliš ostrá, poslouchá se nepříjemně.

Intenzita tónu je jeho výsledná amplituda ve spektru, případně je možné jej brát jako akustický výkon na jednotku plochy a je dán následujícím vztahem:

$$I = \frac{P}{4\pi \cdot r^2} = \frac{W}{S \cdot t} \quad (3.1)$$

kde I je intenzita, P je akustický tlak, W se rovná zvukové energii, která dopadá na jednotku plochy S za jednotku času t . Ze vztahu tedy vyplývá, že čím více energie bude kmitacímu systému dodáno, tím bude vyšší jeho amplituda a tedy bude mít větší intenzitu [11]. Intenzitu je možné hodnotit na libovolně zvolené škále například na 5 stupňové škále (ticho, tichý, středně hlasitý, hlasitý, nepříjemně hlasitý).

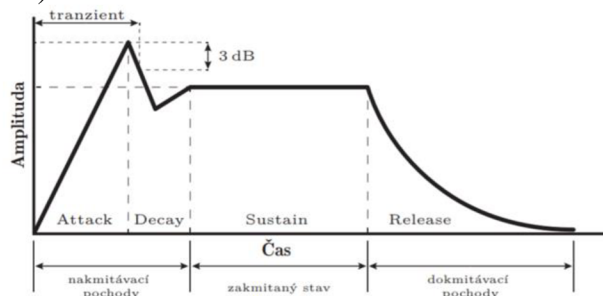
Výškou tónu se rozumí právě jeho vlastní frekvence. Může být hodnocena pouze rozdělením tónu na vysoký (vyšší frekvence) a nízký (nižší frekvence). Opět je možné hodnotit na různě zvolené škále. Lidské ucho vnímá zvuk přibližně od 16 Hz do 16 kHz. Hodnocením výšky tónu lze odhalit i vady (poruchy) sluchového aparátu. Jednotlivě se tedy rozsah může lišit a může nastat i propad slyšení na některých frekvencích v rozsahu.

Doba trvání neboli časový průběh hudebního signálu. V časovém průběhu tónu nebo zvuku se promítají změny amplitudy a dynamiky. Vizualizací časového průběhu je možné pozorovat tvarové změny signálu, které vyobrazují jeho vznik, trvání a zánik. Je možné odhadnout zda se jedná o signál tónový, nebo hlukový (šumový). Základní časové vlastnosti nám může přiblížit časová či amplitudová obálka. Podle této obálky je možné klasifikovat signál perkusivního nebo neperkusivního charakteru. Časová obálka je modulační funkce $A(t)$, která mění maximální hodnotu signálu a lze ji vyjádřit vztahem:

$$f(t) = A(t) \cdot g(t) \quad (3.2)$$

kde $A(t)$ je obálka reálného signálu a $g(t)$ je nemodulovaný signál ($\sin(\omega t + \varphi)$). Podle druhu signálu lze určit základní topologické stavy, které se nazývají „attack“ (A),

„decay“ (D), „sustain“ (S) a „release“ (R), jejich název se ustálil z angličtiny. U neperkusivního signálu můžeme pozorovat všechny topologické stavy, avšak perkusivní signál má pouze nakmitávací (A) a dokmitávací (R) stav [12, 13]. Časovou obálku je možné vidět na obr. (3.1).



Obr. 3.1 Schéma časové obálky ADSR [14]

Barva tónu je specifická pro každý možný zdroj zvuku. Pomocí rozdílnosti barvy je možné rozpoznávat hudební nástroje hrající stejný tón, ruchy (tekoucí voda, ohňostrož apod.) nebo přímo interpreta. Barvu tónu určují jeho harmonické složky, jejich poměr, rozestup, amplituda, doba trvání a také to, jaké harmonické složky jsou v tónu zastoupeny, mohou být například pouze liché (přidávají tónu ostrost a nazálnost), sudé (vytvářejí hebký a dutější tón) nebo mohou některé úplně chybět. S barvou tónu je spjatá harmonická řada. Výslednou barvu tónu tedy určuje vzniklá harmonická řada, která určuje průraznost, ostrost, mohutnost a nosnost tónu. Harmonická řada je posloupností celočíselných násobků základní frekvence (fundamentu), avšak u většiny nástrojů jsou vlivem tvaru a anizotropie tyto násobky neceločíselné a dochází k inharmonicitě. Harmonickou řadu lze rozložit na 4 pásma. Každé z těchto pásem lze hodnotit zvlášť, protože každé nese zodpovědnost za výslednou barvu tónu [15].

První pásmo harmonické řady nese prvních osm harmonických složek. Barvu složenou z prvního pásma lze vnímat jako intervaly tónů. Druhé pásmo harmonické řady zastupuje 9. až 16. harmonickou složku, toto pásmo přidává tónu ostrost, sytost a průraznost. Toto pásmo vnímáme jako klastry. Harmonické složky po 16. spadají do třetího pásma, od 33. harmonické složky jej vnímáme jako šum. Třetí pásmo přispívá tónu cinkavou, kovovou, průraznou a velmi ostrou barvu [12]. Rozdělení pásem je vyobrazeno na obr. (3.2).



Obr. 3.2: Harmonická řada [12]

3.2 Harmonická analýza

Signál je možné rozdělit na harmonické složky, které obsahuje a to signálu periodického, ale i neperiodického. Signál je možné rozdělit, protože známe jeho základní kmitočet, přičemž ostatní vyšší harmonické složky jsou dány převážně celočíselnými násobky, tj. f , $2f$ a $(n+1)f$. Amplituda dílčích částí je dána spektrem amplitud [16].

Harmonickou řadu jako první popsal francouzský fyzik a matematik Jean Baptista Fourier již v roce 1823 jako součet dílčích harmonických složek. Vzorec Fourierovy řady je možné vyjádřit následovně:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t) \quad (3.3)$$

kde proměnná $n = 1, 2, 3, \dots$ je pořadové číslo harmonické složky. Ostatní koeficienty Fourierovy řady se dopočítají z těchto dalších vzorců:

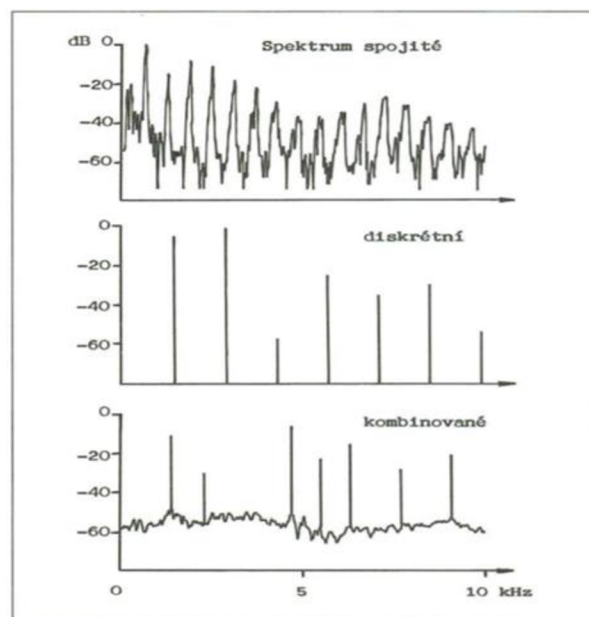
$$a_0 = \frac{2}{T_1} \int_0^T s(t) dt \quad (3.4)$$

$$a_n = \frac{2}{T_1} \int_0^T s(t) \cos(n\omega_1 t) dt \quad (3.5)$$

$$b_n = \frac{2}{T_1} \int_0^T s(t) \sin(n\omega_1 t) dt \quad (3.6)$$

kde T je perioda signálu, t je čas a $s(t)$ je signál [14, 16].

Vyobrazení Fourierovy transformace se provádí pomocí programů s grafickým prostředím, které harmonickou řadu vypočítají. Využit lze spektrálního analyzátoru osciloskopu nebo v prostředí programu Matlab. Pomocí 2D grafů se nejčastěji vykreslují vypočtené hodnoty ve dvou základních osách x a y , kde na ose x je frekvence [Hz] a na ose y je amplituda [dB]. Možné je použít zobrazení 3D, kde se k těmto osám přidá ještě osa z , která představuje čas [t]. Podoby možných spekter (diskrétního, spojitého a kombinovaného) jsou vidět na obr. (3.3).



Obr. 3.3 Základní dělení spekter [13]

3.2.1 LPC analýza

LPC je zkratka lineárního prediktivního kódování. Tato metoda se nejčastěji používá pro zpracování signálu a to řečového traktu, kde nám pomáhá stanovit jeho formantové oblasti. Lze ji tedy využít pro hledání formantových oblastí hudebních nástrojů. Základním principem této metody je odhad vzorku z předchozích p vzorků signálu. Vztah lze vyjádřit následovně:

$$\hat{s}(n) = \sum_{k=1}^p \alpha_k s(n-k) \quad (3.7)$$

kde $\hat{s}(n)$ je odhadem n -tého členu v posloupnosti, ten je vypočtený lineární kombinací předešlých vzorků p . Řád predikce p je určen hodnotou členu (počtem koeficientů). α_k označuje predikční koeficienty, ty jsou voleny tak, aby se co nejvíce přiblížily kombinaci předchozích vzorků. Spektrální charakteristika signálu je dána právě těmito koeficienty, které mají podobu spektrální obálky.

3.3 Kmity, vlny a vlnová rovnice

Kmitání je mechanický (kmitavý) pohyb, také oscilační děj. Hmotný bod, který vykonává kmitavý pohyb se nazývá mechanický oscilátor. Nejčastěji se kmitání popisuje na struně, kdy je struna vychýlena a následně se vrací do své rovnovážné polohy až do ustálení. Podle časového průběhu výchylky rozdělujeme kmitavý pohyb na neperiodický, periodický a kvaziperiodický, jejichž výchylka je popsána periodickou funkcí času, a která se po uplynutí periody T přesně opakuje. Periodický pohyb je popsán periodou T [s], frekvencí f [Hz] a úhlovou frekvencí ω [s⁻¹], přičemž platí následující:

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.8)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (3.9)$$

Harmonické kmity jsou speciálním případem periodických kmitů. U takových to kmitů je časová závislost okamžité výchylky oscilátoru $u(t)$ vyjádřena harmonickými funkcemi sinus a kosinus.

$$u = u_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.10)$$

kde u_m je amplituda kmitavého pohybu a φ_0 je počáteční fáze určená počáteční podmínkou v čase $t = 0$.

Mechanické vlnění vzniká šířením kmitavého pohybu rozruchu v látkovém prostředí (například pružného tělesa). Zdrojem bývá nějaký oscilátor, kmitající s určitou frekvencí a amplitudou. Vlnění tedy přenáší energii prostorem a vlny se přenáší konečnou rychlostí, která se nazývá rychlost šíření c [m.s⁻¹]. Vlnění má dále vlnovou délku λ [m], která odpovídá vzdálenosti, kterou vlnění urazí za jednu periodu T , platí vztah:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (3.11)$$

Výpočet frekvence vlnění pro strunu vyplývá z následujícího vztahu:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho}} \quad (3.12)$$

kde F [N] je napětí na struně, ρ [kg.m-3] je hustota struny a l [m] je délka struny.

Vlnění se rozděluje na dva základní typy, na příčné vlnění a podélné vlnění. Příčné vlnění se děje kolmo ve směru šíření vlny a podélné vlnění se děje ve směru šíření.

Harmonické vlnění je popsáno rovnicí:

$$u(x, t) = A \sin[\omega t - kx + \varphi_0] \quad (3.13)$$

kde k [rad.m-1] představuje vlnové číslo, který vyplývá ze vztahu:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.14)$$

Stojaté vlnění vzniká na struně interferencí dvou postupných vlnění šířících se proti sobě. Interferencí se nazývá superpozice, tzn. sčítání harmonických vln se stejnou frekvencí. Vzdálenost uzlů a kmíten je $\lambda/2$. Stojaté vlnění nemůže mít libovolnou vlnovou délku, protože na struně délky l se musí vytvořit celistvý počet půlvln, což lze vyjádřit vztahem:

$$l = \frac{\lambda}{2} n, n \in \mathbf{Z}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.15)$$

Vlnová rovnice je parciální diferenciální rovnice 2. řádu. Libovolná funkce, která je řešením této rovnice je vlna. Vlnovou rovnici můžeme zapsat ve tvaru:

$$\Delta u - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (3.16)$$

Zápis v kartézském souřadnicovém systému pro jednorozměrný případ bude ve tvaru:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (3.17)$$

a pro 3D systém [17]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (3.18)$$

3.4 Metodika programu ANSYS

V podkapitole bude stručně popsána metodika programu ANSYS. Proces výpočtu programem lze bodově rozdělit a shrnout na dílčí části, které zde budou zobrazeny. Podrobnější proces je potom popsán v následující podkapitole.

Dílčí části procesu simulace [18]:

- Vstupní data ~ vytvoření materiálu a jeho vlastností
- Geometrie ~ vytvoření modelu, přiřazení typu materiálu a jeho orientace
- Kontakt ~ určení místa spojení částí modelu
- Síť ~ vytvoření konečně prvkové sítě
- Metoda výpočtu ~ volba analýzy (např. modální či harmonická)
- Počáteční podmínky ~ zadání počátečních podmínek
- Výpočet
- Řešení
- Zobrazení ~ volba zobrazení řešení (např. graf či simulace)

Z již naměřených, vypočítaných a tabulkových dat bylo možné vytvořit vstupní data. Byla zde vytvořena ortotropní matice elasticity materiálu (3.19).

$$[D] = \begin{bmatrix} E_x & \frac{E_y}{-\mu_{xy}} & \frac{E_z}{-\mu_{xz}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_x}{-\mu_{yx}} & E_y & \frac{E_z}{-\mu_{yz}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_x}{-\mu_{zx}} & \frac{E_y}{-\mu_{zy}} & E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{yz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{xz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

kde $[D]$ je ortotropní matice elasticity, matice poddajnosti je potom $[C] = [D]^{-1}$. E je Youngův model pružnosti v tahu, G je Youngův model pružnosti ve smyku a μ je Poissonovo číslo to vše v závislosti ve směru (x, y a z)..

Pomocí matice poddajnosti $[C]$ je dále možné vypočítat poměrnou deformaci tělesa nebo po úpravě napětí v tahu. Vztah je popsán rovnicí (3.20) [8].

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{zx} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-\mu_{xy}}{E_y} & \frac{-\mu_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\mu_{yx}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & \frac{-\mu_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\mu_{zx}}{E_x} & \frac{-\mu_{zy}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

kde ε je poměrná deformace tělesa a σ je napětí v tahu v závislosti na směru (x, y a z)

Výpočet modální a harmonické analýzy je podmnožinou výpočtu strukturální analýzy. Po vytvoření konečně prvkové sítě uživatelem či programem je možné aplikovat diferenciální rovnice na každý element zvlášť. Každá matice je zde rozdělena na konečný počet lineárních rovnic. Deformace těchto elementů se následně aproximuje a vytvoří souvislou deformaci. Pro výpočet deformací se ve strukturální analýze obecně používá vzorec:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{\dot{u}\} + [C]\{u\} = \{F\} \quad (3.21)$$

kde $[M]$ je matice hmotnosti, $[K]$ je matice tlumení, $[C]$ je matice elasticity, $\{\ddot{u}\}$ je vektor uzlového zrychlení, $\{\dot{u}\}$ je vektor uzlové rychlosti, $\{u\}$ je vektor polohy a $\{F\}$ je výsledný vektor deformace. Stejný vzorec se používá i v případě použití harmonické analýzy.

Pro výpočet modální analýzy se vychází z vzorce (3.21). Výpočet je určen pouze pro vyhledání rezonančních módů tělesa, tedy nepočítá s deformací tělesa, a je dán vztahem:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{u\} = \{0\} \quad (3.22)$$

Vektor polohy lze vyjádřit vztahem:

$$\{u\} = \{a\}_n \cos(\omega_n t) \quad (3.23)$$

kde $\{a\}$ vyjadřuje n-tou amplitudu n-té uhlové frekvence ω v čase t .

Všechny vzorce zde uvedené se mohou dále měnit podle počátečních podmínek a zvoleného typu zobrazeného řešení.

Po vytvoření a spojení materiálu je nutné vytvořit konečně prvkovou síť vyšetřovaného tělesa. Program ANSYS využívá pro své výpočty metodu konečných prvků. Je to metoda pro řešení diferenciálních rovnic. Těleso je nejprve rozděleno na konečný počet prvků, které jsou nejčastěji ve tvaru trojúhelníku či různých kvadratur. Po této triangulaci se minimalizuje odpovídající potenciální energie na množině spojených a po částech polynomických funkcí nad vytvořenou triangulací.

J. L. Lagrange se ve svých výzkumech zabýval právě statickou rovnováhou těles. Díky Lagrangeově metodě variačního principu je možné vyhledat minimum celkové potenciální energie soustavy. Ze všech možných aproximací pole deformací, které splňují geometrické podmínky uvnitř vyšetřované oblasti a na jejích hranicích, nastane právě ta, která vyhovuje okrajovým podmínkám a její potenciální energie nabývá minimální hodnoty.

Z tohoto předpokladu metoda konečných prvků sestaví algebraické rovnice, které následně vyřeší a ze všech výsledků vybere výsledek zadaný uživatelem.

Pro určení energetického kritéria porušení se používá několik metod v závislosti na rozměru určení a materiálu. Nejznámějším a základním je Von Misesovo energetické kritérium.

Nejprve je nutné vypočítat ekvivalentní napětí σ_{eq} , to lze vypočítat ze vztahu popsáným rovnicí (3.24). Von Misesovo energetické kritérium říká, že pokud bude ekvivalentní napětí σ_{eq} větší než napětí odpovídající mezi pevnosti σ_{mp} dojde k porušení zkoumané oblasti.

$$\sigma_{eq} = E \cdot \varepsilon_{eq} \quad (3.24)$$

kde E je Youngův modul pružnosti v tahu a ε_{eq} je ekvivalentní deformace, tu lze spočítat z následujícího vztahu:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{2}{3}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{xz}^2)} \quad (3.25)$$

kde μ je Poissonovo číslo, ε je příslušná deformace a γ příslušná smyková deformace pro směry (x, y a z).

Von Misesovo energetické kritérium je plnohodnotně použitelné pouze pro izotropní materiál. Dalším kritériem je tedy Hoffmanovo 3D energetické kritérium, které je uzpůsobeno pro výpočet 3D ortotropního materiálu. Hoffmanovo 3D energetické kritérium vychází ze zobecnění Hillova a Tsai-Wu energetických kritérií a lze analyticky vyjádřit vztahem:

$$A(\sigma_y - \sigma_z)^2 + B(\sigma_z - \sigma_x)^2 + C(\sigma_x - \sigma_y)^2 + D\sigma_x^2 + E\sigma_y^2 + F\sigma_z^2 + 2G\sigma_{yz}^2 + 2H\sigma_{zx}^2 + 2I\sigma_{xy}^2 \quad (3.26)$$

kde σ je napětí v tahu pro směry (x, y a z) a jejich kombinace. A, B, ..., I lze definovat následovně.

$$A, B, \dots, I = f(\sigma_x^c, \sigma_x^T, \sigma_y^c, \sigma_y^T, \sigma_z^c, \sigma_z^T, \sigma_{xz}^P, \sigma_{zy}^P, \sigma_{xy}^P) \quad (3.27)$$

kde σ^c je maximální možné napětí v tlaku, σ^T je maximální možné napětí v tahu a σ^P je mez pevnosti. Hoffmanovo 3D energetické kritérium vyjadřuje energii, která musí být dodána celému systému, aby došlo k porušení. Bude-li výsledný normovaný skalár větší než 1, dojde k porušení. [18].

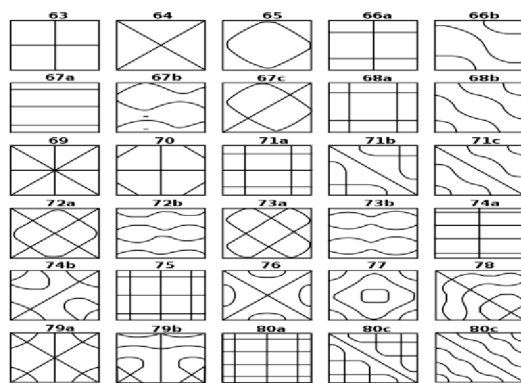
3.5 Další metody použité při analýze

3.5.1 Chladního obrazce

Chladního obrazce jsou obrazce, které vznikají na tenké chvějící se desce. Vznikají a mění se v závislosti na velikosti, rozměrech, tvaru, materiálu a frekvenci vibrací. Vibrace můžeme vyvolat vnějším generátorem například reproduktorem o dostatečném akustickém výkonu nebo jednoduše hrát smyčcem o hranu desky.

Deska je zároveň posypána jemným pískem, který odskakuje na místa kde se nevyskytují žádné kmity či vibrace tzv. uzly. Takto se znázorní hranice linii stojatých vln. Obrazce objevil a zkoumal německý fyzik E. F. F. Chladni. Pomocí Chladního obrazců můžeme posuzovat akustické vlastnosti rezonanční desky pro určitý nástroj, hodí se k posuzování desky ze dřeva pouhým pohledem a k porovnání dvou různých materiálů, protože je v oblibě vyrábět nástroje z různých materiálů ale chtěli bychom zachovat rezonanční vlastnosti původního zdroje.

Chladního obrazce jsou sčítance (součtové a rozdílové složky) sinusovek a kosinusovek jež představují příčné, podélné a tangenciální (torzní) vlnění. Ukázku Chladního obrazů je možné vidět na obr. (3.4) [19].



Obr. 3.4 Chladního obrazce [19]

3.5.2 Helmholtzova rovnice

Helmholtzovu rovnici lze použít pro výpočet rezonanční frekvence ozvučné skříně nebo absorbátoru. U akustické kytary se pohybuje tato frekvence v rozmezí 80–250 Hz. Tuto rovnici lze stavit podle vzorce:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{2r}{V}} \quad (3.24)$$

kde c je rychlost vzduchu při dané teplotě, r je poloměr otvoru a V je objem ozvučné skříně.

4. POSTUP A POPIS MĚŘENÍ

V této kapitole je stručně popsán způsob jakým postupem a jaké parametry byly měřené. Také jsou zde představeny měřicí přístroje užití pro měření. Správnost měření je jedním z důležitých parametrů pro správnost výsledku a vyhodnocení, proto je jejich popis důležitý, aby bylo možné v případě jakýchkoliv nejasností do této kapitoly nahlédnout, případně objevit nevhodný způsob měření nebo nevhodně zvolené zařízení pro měření.

4.1 Měření spektra konkurenčních a inovovaných kytar

Měření spektra konkurenčních kytar probíhalo v akusticky upravené zkušebně. Měřeny byly konkurenční kytary značek Epiphone Hummingbird Pro, Epiphone DR-100, For Tuner FG300 a Cort Earth 70E typu dreadnought. Analýza spektra byla taktéž provedena na inovovaných kytarách dreadnought inovace1 (s menší změnou žebrování) a dreadnought inovace2 (s větší změnou žebrování). Na kytary byly nataženy nové, bronzové struny tloušťky 12-53 a kytary byly naladěny do ladění standard E. Skrze velkou škálu tónů byly vybrány tóny prázdných strun E, A, d, g, h, e¹, tóny na páté pozici pražce A, d, g, c¹, e¹, a¹ a na dvanáctém pražci. Tóny byly hrány ve čtyřech dynamikách fortissimo, mezzoforte, piano a piano pianissimo. Struny byly rozeznívány středně tvrdým trsátkem 1,8 mm. Mikrofon byl nasměrován do 4 poloh vždy 10 cm od snímané oblasti např. struny, jako první poloha byla zvolena poloha u dvanáctého pražce na kytaře, druhá poloha pak u rezonančního otvoru, třetí poloha u kobyly a jako poslední poloha byla zvolena oblast nejširší části těla kytary. Mikrofon byl nastaven vždy v nulové ose ke snímané části.

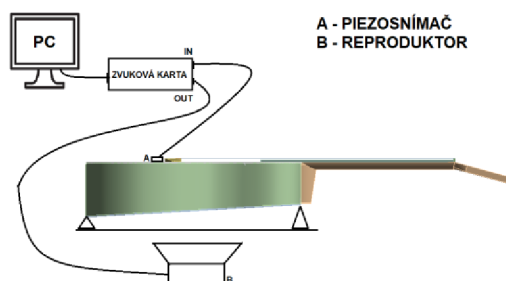
Před měřením byl hráč na nástroj seznámen s pravidly a požadavky. Hráč se měl co nejméně dotýkat nástroje samotného, aby nedocházelo k rušivým útlumům na těle kytary, v tom to případě by bylo vhodné uvažovat o stojanu, který bude kytaru držet ve stabilní poloze, přičemž bude kytaru fixovat v malém počtu bodů. Hráči bylo sděleno, aby se při drnknutí do struny snažil co nepřesněji dodržet dynamiku hraných tónů a trsy provázel vždy do stejného místa, pro účely drnknutí by bylo vhodné využít mechanické rameno.

Celý obvod měření se tedy skládal z hráče, kytary, mikrofonu přivedeného xlr kabelem do zvukové karty připojené k počítači, kde byl spuštěn DAW (digital audio workstation). Do kterého se všechny měřené tóny nahrávaly. V DAW se následně zvukový záznam exportoval do souboru .wav typu mono s příslušným názvem tónu, dynamiky a polohy. Pro vyhodnocení výsledků byly tyto soubory načteny do programu Matlab, kde byl v prostředí editoru napsán kód pro zobrazení spektrogramu a FFT spektra. Kód byl vytvořen za pomoci zdroje [12].

4.2 Měření frekvenční odezvy horní desky

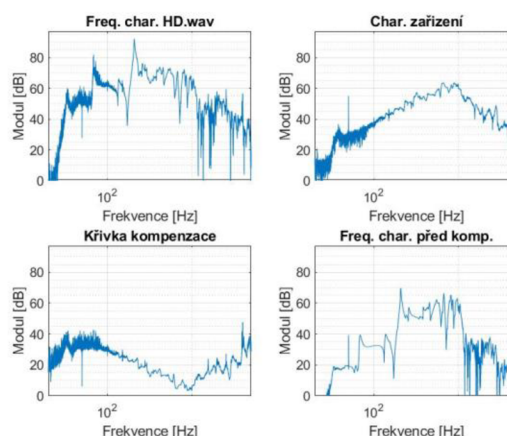
Frekvenční odezva horní desky akustické kytary byla měřena za pomoci piezoelektrického snímače a reproduktoru, jako generátoru přeladovaného harmonického signálu a bílého šumu. Měřena byla, jak samotná horní deska před inovací a po inovaci, tak horní deska na kompletní akustické kytaře bez napětí způsobeného tahem strun a s tímto napětím. Výstup piezoelektrického byl připojen do

zvukové karty a zaznamenán v DAW programu. Na výstup zvukové karty byl zapojen reproduktor, do kterého byl z prostředí softwarového programu pouštěn přeladovaný harmonický signál a šum. Akustická kytara byla zavěšena nad reproduktorem a na horní desku byl připevněn piezoelektrický snímač. Schéma obvodu je viditelné na obr.(4.1).



Obr. 4.1 Schéma zapojení

Zvukový soubor .wav byl dále zpracováván v prostředí programu Matlab. Pro přesné zobrazení frekvenční odezvy horní desky bylo zásadní znát frekvenční charakteristiku generátoru, ta byla v oblasti Z-transformace odečtena od zaznamenané frekvenční odezvy. Výsledná frekvenční odezva byla dále vyobrazena. Celý proces je zobrazen na obr.(4.2).



Obr. 4.2 Výsledná frekvenční odezva horní desky

4.3 Měření impedanční charakteristiky kobyly

Potřebným zařízením pro měření impedanční charakteristiky kobyly je piezoelektrický snímač, DAW program a program Matlab. Piezoelektrický snímač byl připevněn na kobytku akustické kytary. Dále byly zahrány všechny tóny z rozsahu kytary od E (82,41 Hz) po c³ (1054 Hz), dohromady tedy 45 tónů. Při tomto měření bylo nutné, aby byly všechny tóny zahrány stejnou silou a aby drnknutí bylo provedeno na stejném místě struny. Pro tyto účely bylo vytvořeno mechanické rameno, které vytvořilo konstantní sílu drnknutí. V prostředí programu Matlab byl napsán kód, jenž určí fundament a jeho modul [dB], který zapíše do tabulky. Z výsledků je možné vytvořit impedanční charakteristiku. Na výslednou impedanční charakteristiku bude mít vliv tuhost a pružnost kobyly s horní deskou, také tah a typ strun, dále napnutí výztuhy v těle krku. Impedanční charakteristika byla proto měřena při standardním ladění E a také v ladění D standard, tím bylo možné představit vliv tahu strun.

4.4 Měření Chladního obrazců

Pro měření Chladního obrazců je zapotřebí generátor signálu s dostatečným akustickým tlakem a sypký materiál například sůl, káva nebo krupice. Akustická kytara byla zavěšena nad generátorem signálu, kterým byl stejný reproduktor použitý pro měření frekvenční odezvy. Na kytaru byla dále nasypána sůl a byl zapnut generátor signálu, na kytaře se začaly vykreslovat Chladního obrazce (jinými slovy oblasti uzlů). Sypký materiál se vlivem kmitání přesouvá z kmiten do míst uzlů, kde se ustálí. Následně je zaznamenaná frekvence, velikost obrazce a jeho celkový obraz na horní a dolní desce.

4.5 Měření parametrů částí akustické kytary

Měření parametrů částí akustické kytary probíhalo ve Velkých Němčicích ve firmě Furch Guitar's, kde byl pro měření poskytnut bez rušný prostor. Firma poskytla pro měření částí kytary neopracovanou surovinu, která se následně opracuje do hrubého tvaru horní desky, dolní desky, lubů, krku a dalších částí kytary.

Pro měření bylo vybráno 27 kusů neopracovaného materiálu, a to pět horních desek z rezonančního smrku a jedna z cedrového dřeva, 8 dolních desek z mahagonu, palisandru a ořechu, 8 desek lubů z palisandru, 4 kusy českého smrku, který se používá pro výrobu žebrování a 1 kus kvádrů z ebenového dřeva, které se používá k výrobě hmatníku a kobylky. Na neopracovaných deskách byla měřena rychlost šíření zvuku pro 3 směry (x, y a z) a v každém směru ještě ve 3 polohách (10 cm od začátku, ve prostřed a 10 cm od konce) ve směru osy z ještě pro další dvě polohy, to vše pomocí měřicího přístroje Lucchi Meter. K měřicímu přístroji byly nejprve připojeny sondy (vysílač a přijímač) a celý přístroj se nechal zkalibrovat. Zbývalo pouze nastavit délku měřeného objektu.

Měřicí přístroj sondou RX generoval ultrazvukový tón a druhou sondou TX přijímal zpožděný zvuk. Měřicí přístroj potom vypočítal z délky měřeného objektu a zpoždění, se kterým přišel zpožděný tón do TX sondy, vypočítal rychlost šíření zvuku v materiálu.

Na každé neopracované desce byly také zjištěny její rozměry pomocí vysunovacího metru a hmotnost, která byla zjištěna pomocí váhy. Ze získaných dat bylo možné dopočítat hustotu materiálu, Youngův modul pružnosti v tahu, akustickou impedanci, vyzařovací odpor a akustickou konstantu. Tyto hodnoty byly vneseny do tabulky a porovnány. Byly také potřebné pro vytvoření virtuální matice a jejích vstupních hodnot.

4.6 Popis použitého zařízení

V této podkapitole jsou podrobněji popsány přístroje, které byly použity pro měření. Pro snímání vzorků byl využit mikrofon značky RODE M5, jedná se kondenzátorový mikrofon gradientního typu. Podle specifikací výrobce má tento mikrofon frekvenční rozsah 20Hz ~ 20kHz, výstupní impedanci 200Ω, dynamický rozsah 121 dB_{SPL}, odstup od šumu 75 dB(A)_{SPL} a ekvivalentní šum 19 dB(A)_{SPL} podle normy IEC651. Vstupní citlivost mikrofonu je 20 mV/Pa [20].

Jako generátor signálu byl použit 10 palcový reproduktor značky Altec AlNiCo 425-8H, jehož výkon je 100W, frekvenční rozsah 50Hz – 10kHz, citlivostí 97 dB SPL a s impedancí 8 Ohmů [21]. Při měření frekvenční odezvy a impedanční charakteristiky

byl použit piezoelektrický snímač značky Schaller s názvem Oyster S/S, s výstupní impedancí 5 MOhm, výrobce další specifické parametry neuvádí.

Focusrite Scarlett 2i2 je zvuková karta neboli převodník A/D a D/A, která sloužila pro nahrávání vzorků tónů. Specifikace dle výrobce jsou, frekvenční odezva zvukové karty je rovnoměrná 20Hz-20kHz s +/- 0.1 dB, dynamický rozsah je 111 dB(A) a THD+N je <0.0012%[22].

Pro ovládání nahrávání a export zaznamenaných dat byl použit software DAW Reaper v6.03. Rychlost šíření zvuku v materiálu byla měřena pomocí přístroje Fucchi Meter, bližší specifikace o tomto přístroji výrobce neuvádí. Mezi další použité nástroje patří xlr kabel, vysunovací metr, úhломěr, šuplera a kuchyňská váha.



Obr. 4.3: Měření šíření rychlosti materiálem

5. MODELOVÁNÍ A SIMULACE

Modelování a simulace byla prováděná v programovém balíčku ANSYS ACADEMIC 2020. Program se zabývá řešením fyzikálních problémů, které jsou program řešeny pomocí metody konečných prvků. Výpočet se skládá z preprocessingu (engineering data, geometry a mesh), kde se zadávají vstupní data (vlastnosti materiálu), vytváří se geometrie modelu a vytváří se síť konečných prvků. Dalším krokem je solution, kde se volí typ analýzy (například modální, strukturální či harmonická analýza) a určují se počáteční podmínky, jako jsou počáteční síla, tlumení, počáteční napětí, počet a místa uchycení (uzlů).

Dále se určuje například frekvenční rozsah výpočtu nebo počet módů, které má program vypočítat. Samotný výpočet je potom proveden programem Mechanical APDL, který je rozdílný pro jednotlivé typy analýz. Posledním krokem je postprocessing, ve kterém probíhá zpracování vypočítaných dat. Jedná se tedy o grafické či tabulkové vyobrazení výsledků, které je možné si zvětšit, přetočit nebo exportovat do tabulky programu Excel [18].

5.1 Popis modelování a simulace

V diplomové práci byl program využit pro výpočet rezonančních módů na samotné horní desce bez žebrování a s žebrováním, s neopracovanou a opracovanou plochou desky, taktéž pro kompletní model akustické kytary s tahem a bez tahu strun. Byla zde simulována frekvenční odezva horní desky a kompletního těla kytary. Nejprve bylo nutné vytvořit vlastnosti jednotlivých materiálů (jako je hustota a virtuální matice) pro ortotropní materiál, a do matice vložit hodnoty Youngova modelu pružnosti v tahu, smyku a Poissonovo číslo pro každý směr.

To bylo provedeno v části engineering data a bylo vytvořeno 27 materiálů pro různé části akustické kytary, například pro horní desku se vymodelovalo 5 materiálů s vlastnostmi rezonančního smrku a jeden kus materiálu představující cedrové dřevo z naměřených a vypočtených hodnot a 2 rezonanční smrky z tabulkových hodnot. Po zadání vlastností materiálů bylo možné začít vytvářet model horní desky a celého tvaru akustické kytary v části geometry.

Nejprve byla vytvořena horní deska, pomocí konstrukčních bodů byl nahrubo navolen tvar horní desky a následně okótován tak, aby byl dosažen přesný tvar horní desky. Pro vytvoření modelu horní desky bylo použito 40 konstrukčních bodů. Pomocí funkce extrude bylo těleso vytaženo do požadované tloušťky, která byla pro vyhodnocení volena od 2 mm až do 5 mm, následně vyříznout rezonanční otvor a byly vytvořeny nové souřadnice začínající na horní ploše vytažené desky. Poté byla vytvořila kružnice, zakótována do patřičného místa a znovu pomocí funkce extrude vyříznuta oblast rezonančního otvoru. Tímto způsobem byly vymodelovány 3 typy horní desky, a to pro typ kytary dreadnought, orchestral model a konkurenční kytary.

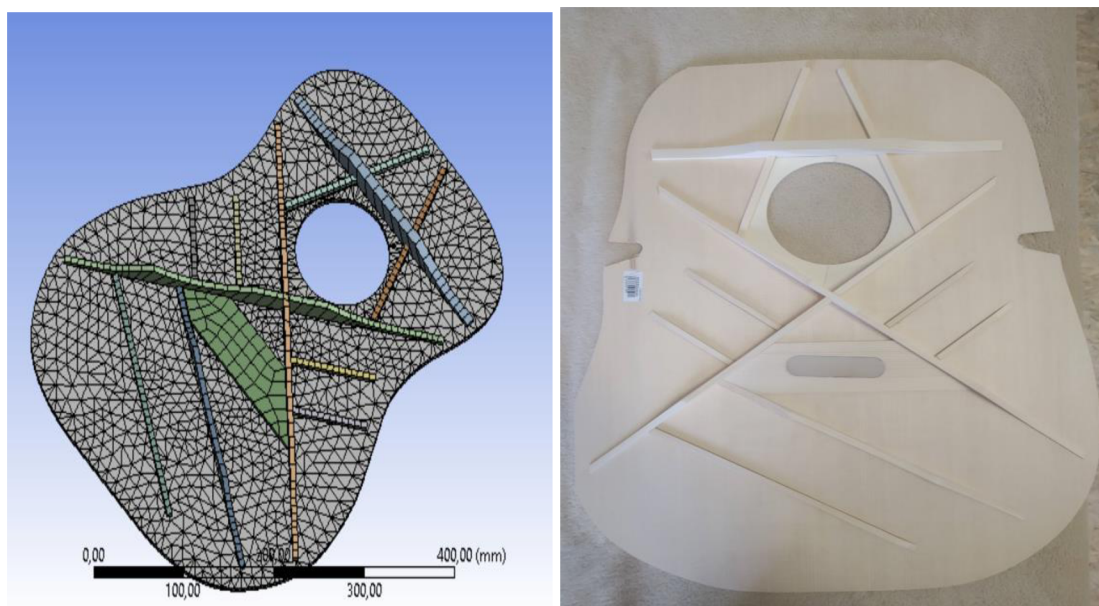
V části solution byl prováděn výpočet rezonančních módů horní desky a její frekvenční odezva. Rezanční módy byly vypočítány dle analýzy typu structural model. Byl určen rozsah pro výpočet 100 módů a structural coefficient damping ratio 0,042 [-] z tabulkových hodnot [23]. Horní deska byla dále na svých spodních hranách fixovaná, tím byly zadány uzlové body, ve kterých se omezily stupně volnosti. V dalších simulacích bude vytvořeno celé tělo kytary a fixování horní desky nebude

nutné, protože bude přilepená k lubům kytary. Výpočet proběhl pro všechny typy materiálu a typy tvaru horní desky a kompletní akustickou kytaru. Výsledky byly zkopírovány do tabulky v programu Excel a porovnány s harmonickou řadou a především mezi sebou.

Výpočet samotné horní desky trval 20 minut, u kompletní akustické kytary trval výpočet až 2 hodiny. Frekvenční odezva desky byla řešena pomocí analýzy harmonic response. Na začátku se nastavil frekvenční rozsah analýzy, ten byl volen od 10 Hz do 5kHz s použitím frekvencí rezonančních módů. Volil se také krok výpočtu, ten byl zvolen na 1000 kroků. Dále musela být určena počáteční síla rozkmitávající horní desku. Byl nastaven vektor ve kterém působila síla hodnotou 2 N. Horní deska se musela nechat opět zafixovat na spodních hranách a kompletní akustická kytara nikoliv. Také byla zadána hodnota damping ratio 0,021 [-] z tabulkových hodnot [24].

V poslední části postprocessing, který probíhal po výpočtu se určovalo o jaké vyobrazení má uživatel zájem, avšak pro každou analýzu nebylo možné užít všech zobrazení, protože daná analýza prováděla jiný výpočet. V modální analýze je možné zobrazit total deformation nebo directional deformation (x, y a z) pro každý mód zvlášť. Bylo možné si také nechat zobrazit pouze určitou část modelu. Další možností bylo vypočítané hodnoty exportovat do tabulky programu excel. V harmonické analýze lze například zobrazit frekvenční odezvu, jako ekvivalentní hladinu vyzařování v dB. Také total deformation a directional deformation podobně jako u modální analýzy, ale v tomto typu analýzy byla vidět deformace horní desky všemi módy současně, v rozsahu voleném před výpočtem.

Podobným způsobem se postupovalo při vytváření modelu horní desky s žebrováním. Vytváření žebrování již bylo obtížnější, pro každé žebro musela být jednotlivě vytvořena nová souřadnice. Každé žebro se skládalo z 8 konstrukčních bodů. Dohromady měl model horní desky s žebrováním 250 hran. Tento model je vidět na obr. (5.1) společně s předlohou. Ve výpočtové části se dále musely zadat kontaktní plochy mezi horní deskou a žebrováním samotným. Vytvořené souřadnice se použily pro vytvoření správné řezby dřevem, která odpovídá skutečné řezbě žebrováním.



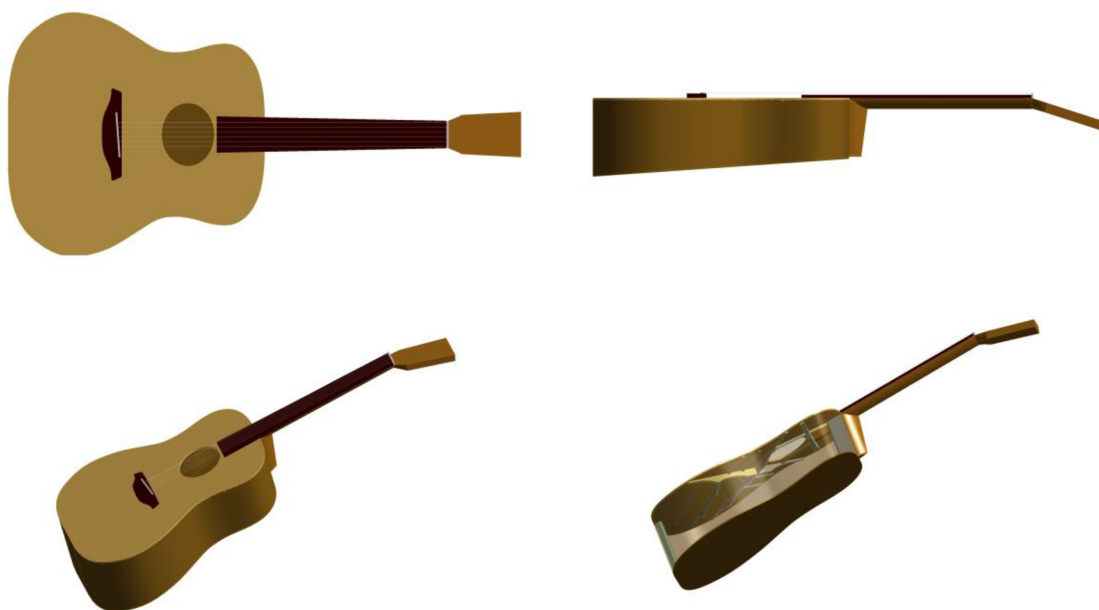
Obr. 5.1: Model horní desky s žebrováním DR s předlohou

Model horní desky a žebrování postačil pouze pro simulaci v semestrální práci, pro účely diplomové práce bylo zapotřebí vymodelovat kompletní akustickou kytaru s téměř všemi jejími částmi. Pro vytvoření modelu bylo potřeba vytvořit 707 konstrukčních bodů ve 32 souřadnicových pozicích nastavené, tak aby bylo možné modelovat jednotlivé části.

Nejprve byla vytvořena horní deska, na které bylo vymodelováno žebrování, následovalo vytvoření dolní desky, ta musela být zkosená pod úhlem $3,3^\circ$, jako je to u předlohové kytary. Luby byly vysunuty z hran horní a dolní desky pomocí vložené funkce skin a nastaveny na odpovídající tloušťku. Mezi horní a dolní desku byly vymodelovány výstužné špalíky.

Krk byl vytvořen z několika částí (patka, krk a hlava), které byly následně sloučeny do jednoho celku pomocí vložené funkce boolean. Model krku byl připojen k tělu kytary. Aby model zapadal do těla bylo zapotřebí vyříznout kus horní desky a část luby. Na tělo krku byl vymodelován hmatník s nultým pražcem a na horní desce byla vymodelována kobylka.

Poslední částí byly struny, které byly vytvořeny z přímky, jejich válcovitý tvar byl zhotoven za pomoci vložené funkce cross section line, průměr struny byl nastaven pro struny typu 12-53. Kompletní model akustické kytary se skládá z 32 menších modelů. Všechny tyto díly bylo nutné v části simulace solution pospojovat („přilepit k sobě“). Každému dílu byl přidělen odpovídající materiál, ze kterého je vyráběn a jsou mu přiřazeny příslušné souřadnice. Souřadnice zajistí, aby vlastnosti definovaného materiálu ve směrech x, y a z přesně pasovaly na vytvořený díl. Jinými slovy: aby měl každý díl odpovídající řezbu dřeva. Hotový model je vidět na obr. (5.2).



Obr. 5.2 Kompletní model akustické kytary

6. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Tato kapitola se zabývá vyhodnocením výsledků. Budou zde porovnány spektra kytar typu dreadnought, orchestral model a konkurenčních kytar, především výkonu spektrálních složek v závislosti na době trvání. Z výsledků lze vyčíst, jak dlouho drží vyšší harmonické složky svůj výkon a na jakých kmitočtech začíná jejich výkon v čase strádat. Porovnány budou dynamiky *ff*, *mf*, *p* a *ppp* ale také vybrané tóny. Z měření ve firmě Furch Guitar's zde budou zobrazeny tabulky vypočítaných vlastností jednotlivých horních desek, dolních desek, kobyly a lubů akustické kytary, jako jsou například akustická konstanta a Youngův model pružnosti v tahu. V kapitole bude dále porovnána frekvenční charakteristika a odezva, která byla změřena na konkurenční kytáře a neinovované kytáře a další výsledky z měření.

Kapitola bude také obsahovat porovnání rezonančních módů horních desek akustických kytar při změně materiálu, materiálních vlastnostech, tvaru a typu kytary, rezonanční módy byly vypočteny programem ANSYS. Programem byla dále simulována frekvenční odezva horních desek a celého korpusu akustické kytary. Porovnávat se zde bude frekvenční odezva, která má různé vlastnosti materiálu, tvar a také rozdílnou tloušťku od 2 mm do 4 mm. Z porovnání můžeme zjistit rezonanční oblasti dané horní desky bez žebroví, jak se mění výkon rezonančních oblastí a také posun ve frekvenční oblasti. Ze zjištěných dat mohou být určeny vhodné vlastnosti materiálu (tloušťka a hustota) k výrobě horní desky pro kytaru typu dreadnought.

6.1 Spektrální analýza kytar

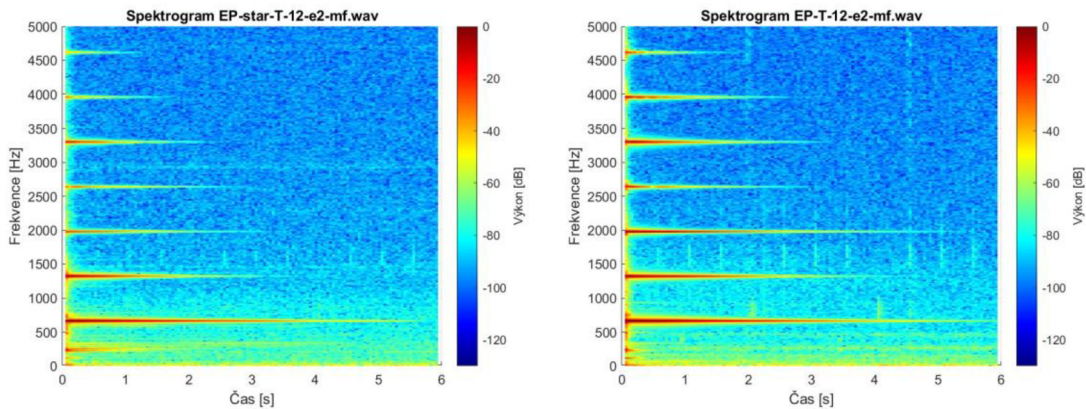
Začátek této kapitoly se bude zabývat vyhodnocením spektra konkurenčních kytar Epiphone dreadnought, Epiphone dreadnought2, Cort dreadnought a ForTuner dreadnought. Následně bude spektrum kytar porovnáno s výsledky bakalářské práce paní Bc. Hany Trávníčkové a to kytary Furch Dreadnought a Orchestral model, dále jen Furch dreadnought a Furch orchestral model.

Před zahájením vyhodnocení je potřeba popsat nadpisy výsledků, a to z důvodu velké variability měření. Pro ujasnění postačí krátký příklad, Spektrogram EP-T-0-E-mf. První místo nadpisu patří názvu analýzy, dále jsou typ nástroje (Epiphone dreadnought – EP, Furch dreadnought – DR, Furch orchestral model – OM, Cort dreadnought – CO a ForTuner – FT), pozice na kterou byl namířen mikrofon (T – tělo, K – kobylka, O – ozvučnice a 12 pozice dvanáctého pražce), pozice na pražci (0, 5 a 12), měřený tón a dynamika hry (*ff*, *mf*, *p* a *ppp*).

6.1.1 Spektrum konkurenčních kytary

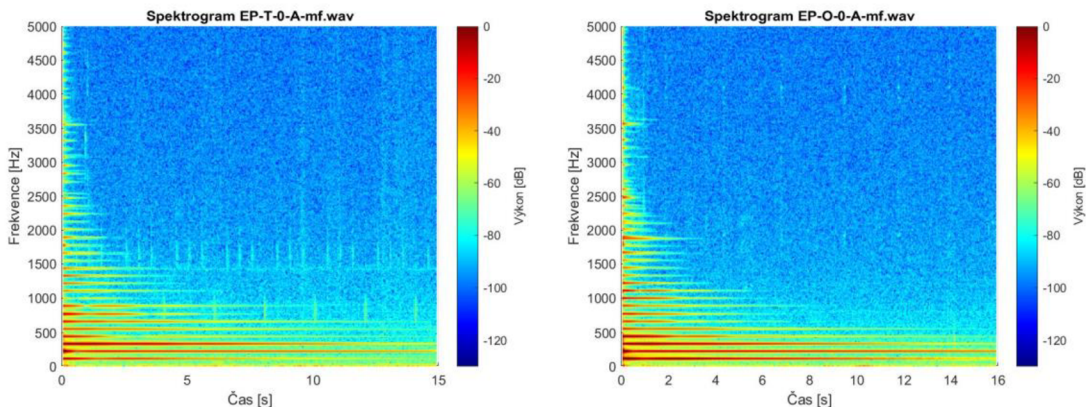
Jako první bude představen vliv strun na spektrum akustické kytary Epiphone dreadnought v čase, přesněji 5 let starých ohraných strun a nových strun. Hraný tón je e^2 ve dvanácté pozici pražce. Spektrum Epiphone dreadnought, na kterém jsou nataženy nové struny je mohutnější, vyšší harmonické složky v čase více drží výkon a lze pozorovat první rezonanční módy horní desky (113 Hz) a ozvučnice (± 200 Hz), které mají vysoký výkon po dobu 0,2 s a které dále drží až do konce tónu přibližně o 50 dB slaběji. U Epiphone dreadnought s opotřebovanými strunami je rezonanční mód horní desky vybuzen stejně jako v předchozím případě na 0,2 s, ale po uplynutí této doby se

ztratí. Zatímco oblast rezonance ozvučnice drží se silnou intenzitou 1,5 s, nese se ke konci tónu s intenzitou zeslabenou o 50 dB. Toto porovnání lze vidět na obr. (6.1).



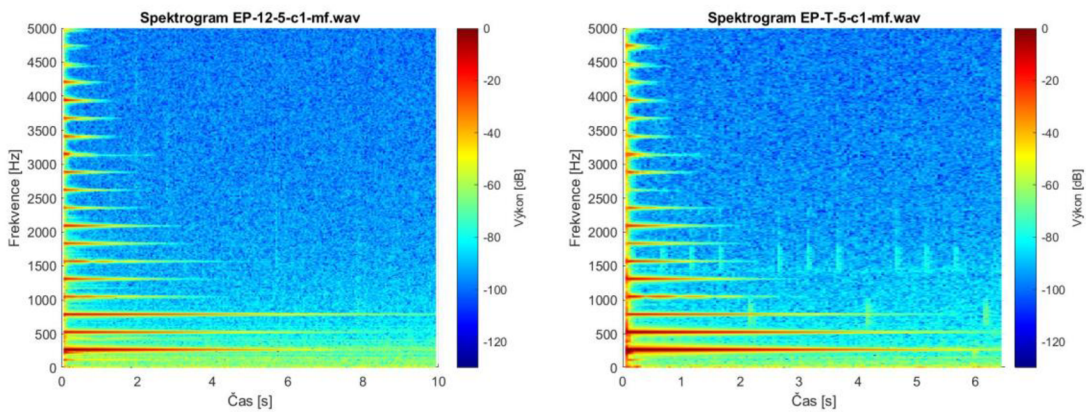
Obr. 6.1: Porovnání vlivu strun na spektrum kytary

Na obr. (6.2) je vyobrazen vliv pozice, ve které byly vzorky nahrávány, na spektrum. Pro porovnání byl vybrán tón A hraný v nulté pozici při dynamice mf. Spektrum v místě ozvučnice je plné a silné. První čtyři harmonické složky drží až po dobu kdy tón odezní (16 s). Do 1 kHz se vyšší harmonické drží do 5 s a nad tento kmitočet v průměru 1,8 s. První harmonická složka mizí po uplynutí 6 s při nastavení mikrofonu na pozici snímající tělo kytary. Nejvýraznějšími jsou harmonické složky 2 a 3. Další vyšší harmonické složky do kmitočtu 1 kHz drží přibližně 6 až 15s. Oproti spektru ozvučnice spektrum v oblasti těla postrádá 9. harmonickou složku.



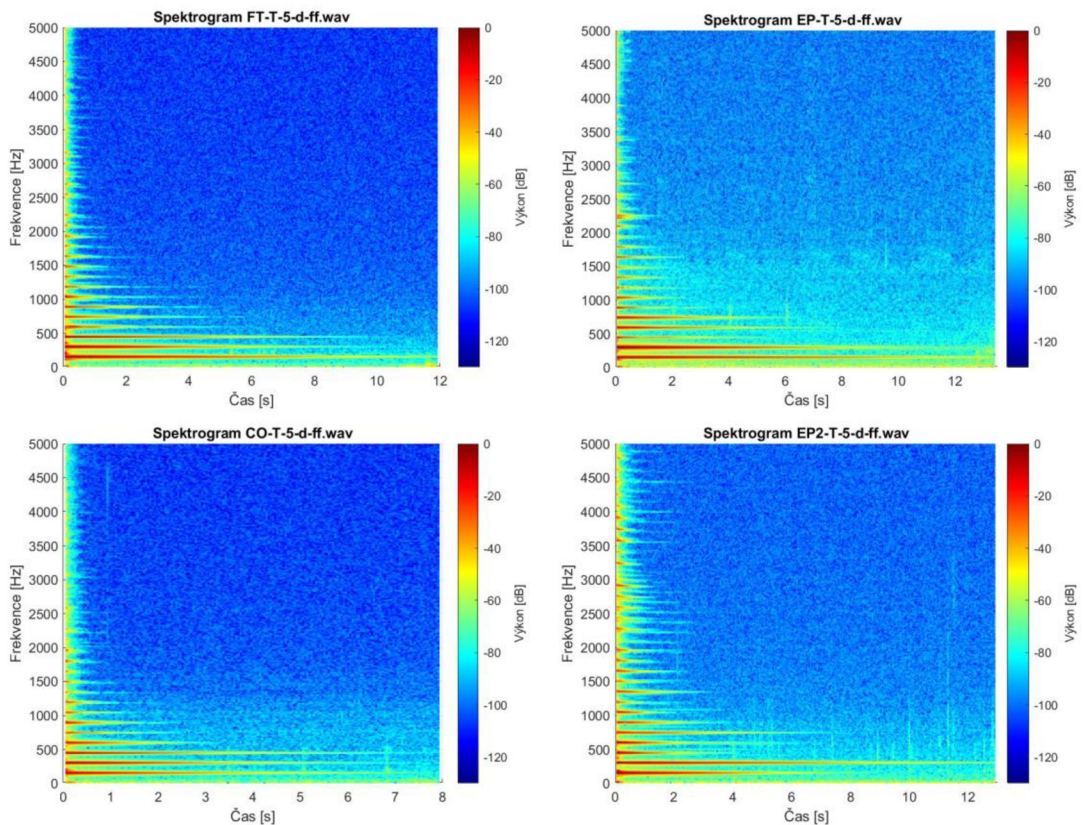
Obr. 6.2: Porovnání spektra různých částí kytary

Dalším tónem pro porovnání je tón c^1 hraný v dynamice mf. Toto porovnání se zaměřuje na vliv na spektrum tónu snímané na těle a u dvanáctého pražce. Cíleně vzdálené pozice mohou vykreslit spektrum s podporou horní desky a bez podpory. Je tak vyobrazeno na obr. (6.3). Časově výkonnější spektrum se vytváří v pozici dvanáctého pražce, avšak je slabší 1. harmonická složka, v druhém případě je silnější, dochází totiž k podpoře tónu horní deskou. Přibližně na kmitočtu 65 Hz lze pozorovat rezonanční mód krku, který trvá 2 s na dvanácté pozici a na těle 0,2 s.



Obr. 6.3: Porovnání spektra různých částí kytary 2

Pro objektivnější hodnocení spektra, doby trvání a formantových oblastí je žádoucí měření většího počtu akustických kytar typu dreadnought. Na základě výsledků bude možné najít společné rysy a rozdíly, které nám napoví při hledání vystihujících vlastností a na které části se při inovaci zaměřit a případně je vylepšit či přímo zachovat. Spektrogramy čtyř konkurenčních kytar, které hrají tón *d* v dynamice *ff*, jsou vidět na obr. (6.4).

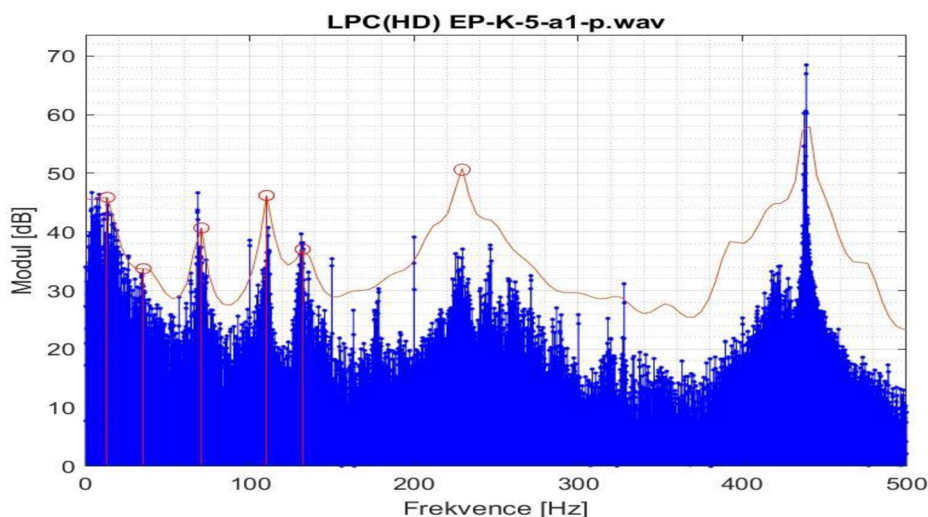


Obr. 6.4: Porovnání spektra 4 konkurenčních kytar

Lze si všimnout rozdílného generování vyšších harmonických složek, každá kytara tak má jedinečnou barvu tónu. Kytara Cort dreadnought, má oproti ostatním kytarám nejkratší dobu dozvuku její harmonické složky a právě 1. až 3. trvají pouze 8 s, kdežto u ostatních kytar je tato doba 12 s. Kytary Epiphone dreadnought a Epiphone

dreadnought2 negenerují 3. harmonickou složku, u kytary Epiphone dreadnought2 strádá i fundament, který hraje pouze 8 s. I přesto je tato kytara zvukem nejbarevnější a lidskému vjemu bude více lahodit. Kytarou s nejméně barevným zvukem je kytara Cort dreadnought. Obdobné rozdíly byly pozorovány i na dalších vzorcích, které byly změřeny.

Vyhledání rezonančních módů horní desky, krku, těla a ozvučnice, proběhlo pomocí LPC (lineární prediktivní kódování) v programu Matlab a také pomocí spektrálního analyzátoru v DAW prostředí. Obě metody zobrazily stejné nebo velmi blízké hodnoty. Metodu LPC lze vidět na obr. (6.5) pro tón a^1 v dynamice p . Na obrázku je vidět 6 rezonančních oblastí z nichž první je oblastí šumu prostředí. Druhá oblast odhaluje mód krku, třetí oblastí je rezonance mezi horní a zadní deskou, čtvrtá a pátá oblast připadají samotné horní desce a v poslední oblasti se nachází rezonance ozvučnice. Pro vyobrazení tohoto LPC musel být nastaven vysoký řád metody. Pokud by byl nastaven na menší řád například řeči, tak by se tato oblast projevila jako první formantová oblast.

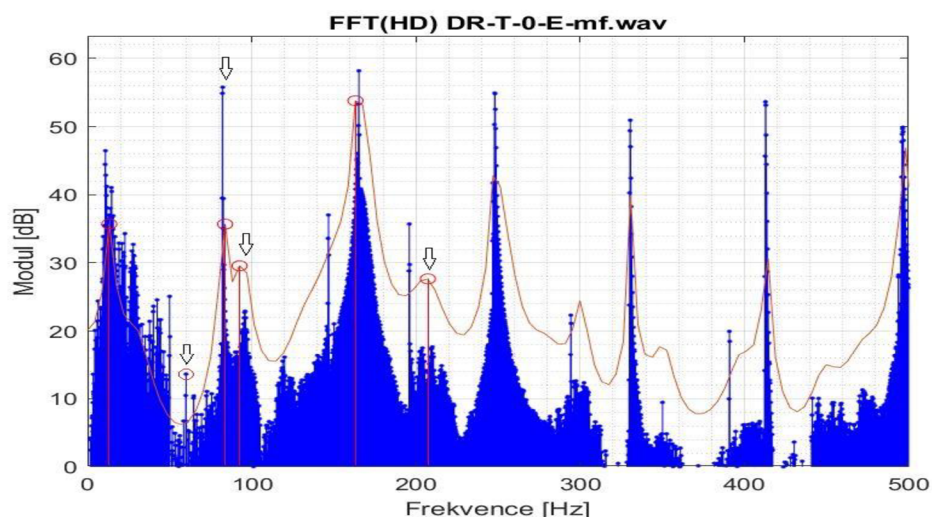


Obr. 6.5: LPC – tón a^1 , konkurenční kytara

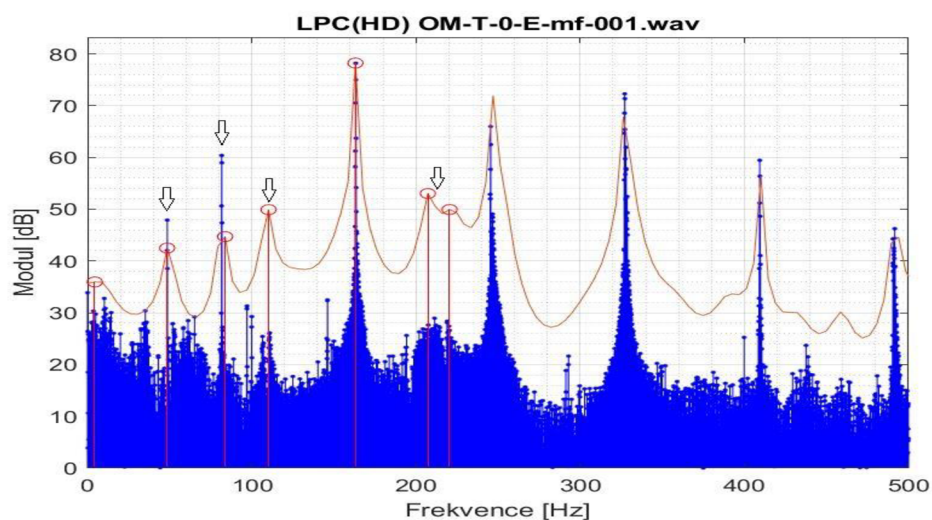
6.1.2 Porovnání kytar

Některé tóny kytar Furch dreadnought a Furch orchestral model byly převzaty ze zdroje [24].

Nejprve budou porovnány rezonanční módy mezi kytarami Epiphone dreadnought, Furch dreadnought a Furch orchestral model. Také zde bude porovnáno spektrum těchto kytar a na konci budou stručně sepsány rozdíly. Porovnáván zde bude tón E. Na obr. (6.6) je LPC analýza kytary Furch dreadnought. První rezonanční oblast je zde šum. Druhá oblast rezonance krku se nevykreslila z důvodu malého výkonu, ale je přikreslena do obrázku. Rezonanci horní a spodní desky najdeme v třetí oblasti, ve čtvrté oblasti pak rezonanci samotné horní desky a oblast rezonance ozvučnice je v šesté oblasti. Kytara Furch orchestral model má LPC analýzu na obr. (6.7), kde první oblast je opět šumovou složkou. Druhá rezonance patří krku, třetí rezonanci těl, čtvrtá samotné horní desce, čtvrtá a pátá oblast náleží ozvučnici. Epiphone dreadnought LPC analýza byla popsána v předchozí kapitole a je na obr. (6.5).



Obr. 6.6: LPC – tón E, dreadnought



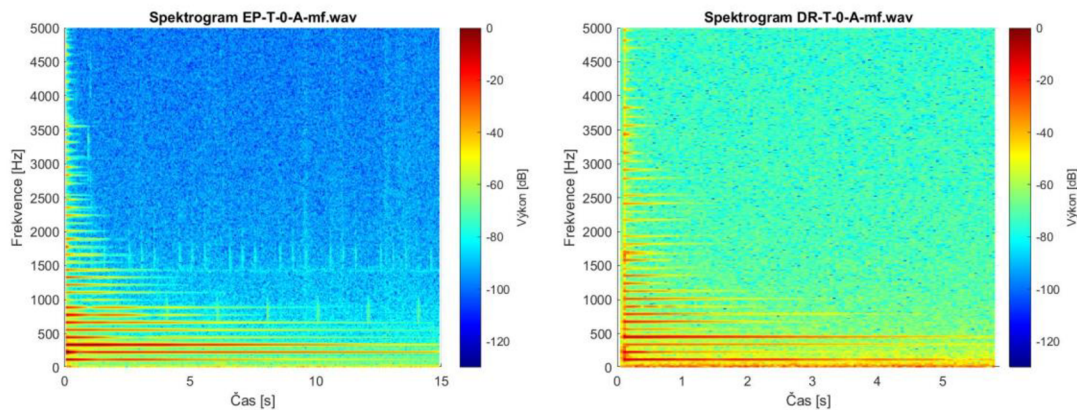
Obr. 6.7: LPC – tón E, orchestral model

Vyhodnocené spektrum kytar je zobrazené pomocí spektrogramu, který zobrazuje výkon vyšších harmonických složek v čase. Spektrum kytary Epiphone dreadnought je v čase výkonnější v celém spektru na vyšší frekvencích až dvounásobně, především potom 2. a 3. harmonická složka oproti kytaře Furch dreadnought, která tyto složky postrádá. Epiphone dreadnought postrádá 4. harmonickou složku. Na obr. (6.8) je možné vidět toto porovnání. Na obr. (6.9) je zobrazeno porovnání kytary Epiphone dreadnought a Furch orchestral model, kde Furch orchestral model má zřetelně barevnější spektrum, přičemž od 1 kHz je spektrum časově výkonnější v porovnání s Epiphone dreadnought. To má v čase výkonnější 1., 2. a 5. až 8. harmonickou složku.

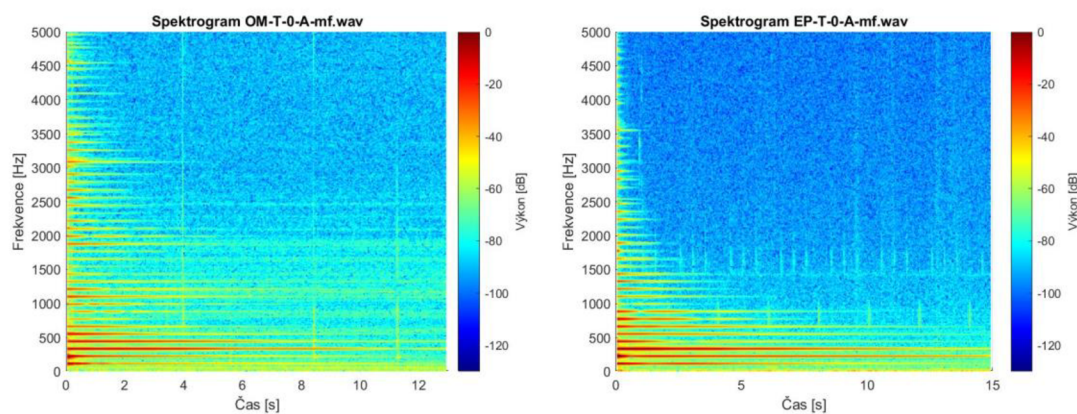
Z porovnání mnoha dalších výsledků byly zjištěny rezonanční módy krku, horní desky a ozvučnice tab. (6.1). Všechny rezonanční módy jsou téměř stejné. Horní deska u Furch orchestral model a Epiphone dreadnought je laděna na cca 110 Hz (tón A) a u Furch dreadnought je laděna na přibližně 94 Hz

(tón Fis – G). Ve spektru se Epiphone dreadnought blíží Furch orchestral model, to má však o něco časově výkonnější spektrum, ale do oblasti 1,5 kHz jsou si spektra podobná. Všechny testované kytary Furch dreadnought mají v porovnání s Epiphone

dreadnought bohatší spektrum, avšak strádají na výkonu v čase. Epiphone dreadnought od Furch dreadnought se liší především rezonančním módem horní desky. Epiphone dreadnought má stejný typ žebrování ale použité žebrování je mohutnější (těžší).



Obr. 6.8: Porovnání spektra EP a DR



Obr. 6.9: Porovnání spektra EP a OM

Tab. 6.1: Pozice rezonančních módů částí kytary

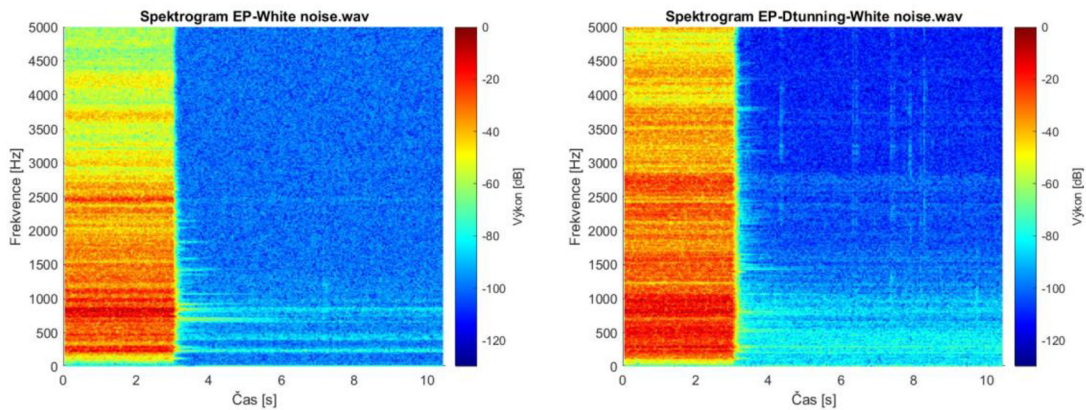
Kytara	Mód [Hz]			
	Krk	HD+DD	HD	Ozvučnice
EP	65	87	113	219
DR	63	88	94	202
OM	64	82	110	220

6.1.3 Doplnující měření

Jedním z mnoha možných měření je měření doby dozvuku, tu lze vidět i ve spektrogramu, v tomto znázornění je však excitátorem struna kytary. Dobu dozvuku samotné horní desky nebo celého mechanického obvodu akustické kytary lze měřit například, tím že danou desku vybudíme signálem, který po sléze vypneme, přičemž deska se nechá dokmitat.

Doba dozvuku byla měřena na všech horních deskách a na všech akustických kytarách, které byly měřeny v této diplomové práci. V této části práce není třeba analyzovat všechna tato měření, postačí tedy menší ukázka viz obr. (6.10).

Na obrázku je stejná kytara Epiphone dreadnought v ladění E-standard a D-standard, hlavním rozdílem je, že kytara v ladění D-standard generuje více harmonických složek oproti ladění v E-standard. Vyšší intenzitu dozvuku má ladění v E-standard. Dobu dozvuku mají obě ladění přibližně stejně dlouhou, avšak ladění D-standard pro větší počet harmonických složek.

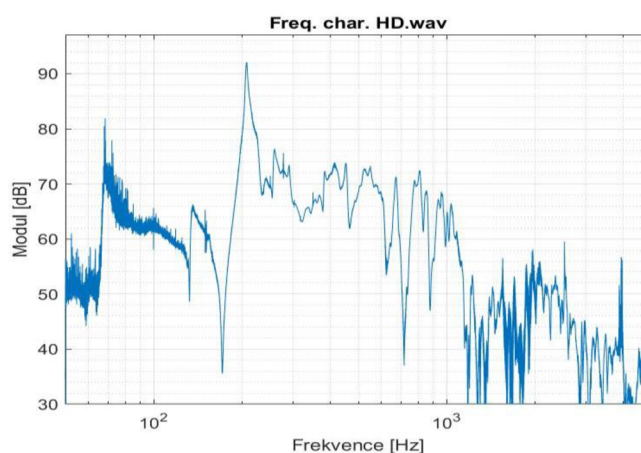


Obr. 6.10: Doba dozvuku na kytáře DR

6.2 Frekvenční analýza

Tato část se bude zabývat hodnocením frekvenční charakteristiky a frekvenční odezvy horní desky, těla a konkurenční kytary. Bude se jednat o prvotní zhodnocení před konečnou komparací s již inovovanými kytarami. Tato analýza poskytne funkční obraz o tom, které části spektra horní deska, tělo a kompletní kytara již s tahem strun podpoří.

Na obr. (6.11) je znázorněna změřená frekvenční charakteristika horní desky kytary Furch dreadnought. Je možné vidět dvě hlavní rezonanční špičky a to na přibližně 70 Hz a 200 Hz mezi těmito kmitočty se nachází pokles. Zhruba od frekvence 250 Hz až po 1 kHz se nachází oblast o přibližně stejné intenzitě s občasnými propady. Po 1 kHz následuje útlum o 20 dB. Lze říct, že funkční frekvenční rozsah této horní desky je od 70 Hz do 1 kHz.

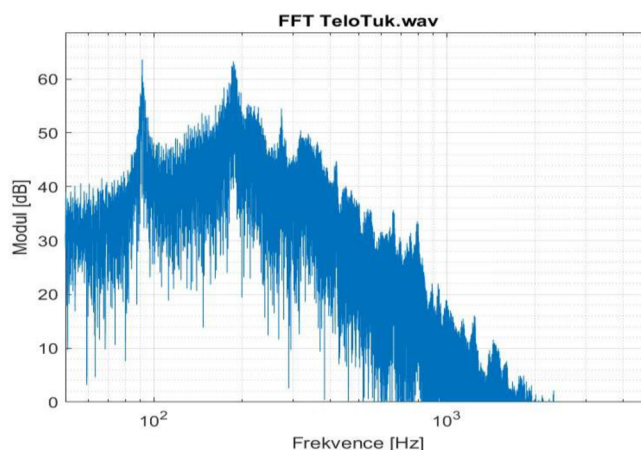


Obr. 6.11: Frekvenční charakteristika horní desky kytary DR

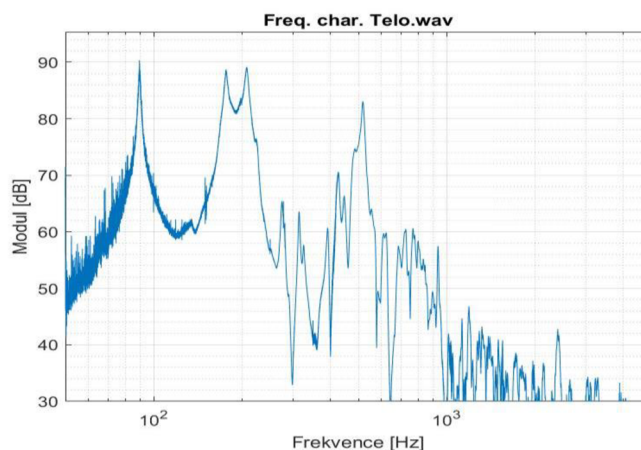
Na obr. (6.12) je znázorněné porovnání frekvenční charakteristiky a na obr. (6.13) frekvenční odezvy těla kytary Furch dreadnought. Frekvenční charakteristika byla měřena pomocí piezo snímače a generátoru přeladovaného harmonického signálu, frekvenční odezva pak ťuknutím paličkou do horní desky, tím je možné zjistit frekvenční charakter různé části horní desky, protože každá část rezonuje na jiných frekvencích.

Je tedy lehké přímo určit mrtvá místa na horní a spodní desce či na lubech těla. Na tato „mrtvá“ místa je tedy možné se zaměřit a vylepšit je, tímto způsobem vznikla první inovace žebrování na kytáře Furch dreadnought. Frekvenční odezva směrem k vyšším frekvencím klesá z důvodu nedostatečné energie vybuzení, proto je vhodné analyzovat kytaru i pomocí frekvenční charakteristiky.

Stručně řečeno, pomocí frekvenční odezvy hledáme místo a kompletní obraz zobrazí frekvenční charakteristika. Jedním z rozdílů mezi obr. (6.12) a (6.13) je, že v místě, ve kterém došlo k ťuknutí, nedošlo ke generování rezonance na cca. 210 Hz, ve frekvenční charakteristice však došlo k záznamu této rezonance.

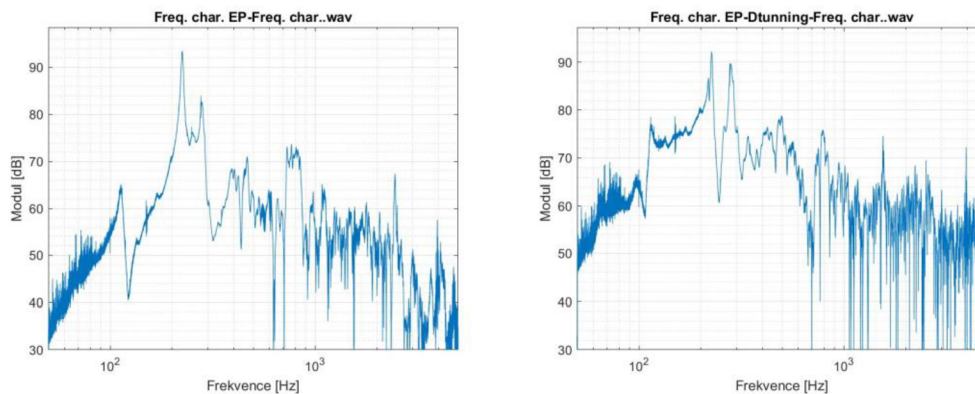


Obr. 6.12: Frekvenční odezva těla kytary DR



Obr. 6.13: Frekvenční charakteristika těla kytary DR

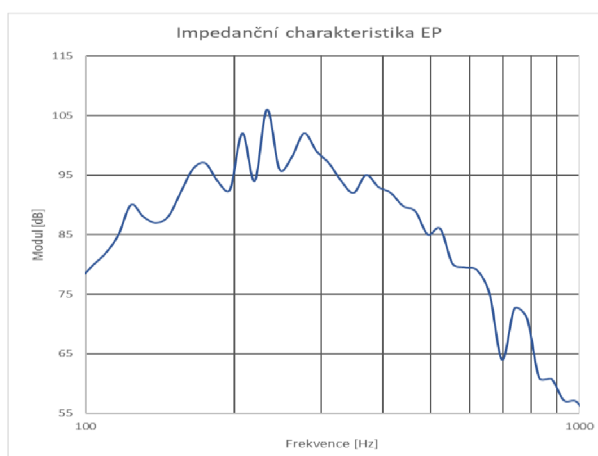
Frekvenční charakteristika je vhodná pro pozorování změn, které způsobí odlišný tah strun, tah strun způsobuje napětí na horní desce, ta už může mít své předpětí z výroby, změnou ladění můžeme desku také napružit či podpružit, na právě jedné akustické kytáře. Lze sledovat pohyb rezonančního kmitočtu impedance. Na obr. (6.14) je vyobrazena frekvenční charakteristika na stejné kytáře: jednou s laděním E-standard (E, A, d, g, h, e¹) a poté s laděním D-standard (D, G, c, f, a, d¹).



Obr. 6.14: Frekvenční char v závislosti na tahu strun

Je zřejmé, že rezonanční módy drží stále svoji pozici ve frekvenční oblasti. Změna ladění především posunula rezonanční kmitočet impedance do nižších kmitočtů (viz obr. 6.15), tuto změnu lze přímo sledovat v oblasti od 100 Hz do 200 Hz. Při ladění D-standard je frekvenční charakteristika rovnější a došlo k posílení rezonančních oblastí v celém rozsahu. Zdá se tedy, že impedance, kterou má horní deska s kobylkou při tomto ladění je pro tuto kytaru vhodnější.

Impedanční charakteristiku v rozsahu hraných tónů je možné vidět na obr. (6.15) Je možné sledovat hřebenový filtr, který je způsobený rezonančními módy celého nástroje a také vrchol rezonančního kmitočtu impedance na frekvenci 235 Hz. Při prohlednutí frekvenční charakteristiky kytary Epiphone dreadnought na obr. (6.14) a impedanční charakteristiky lze usoudit, že vrcholy v impedanční charakteristice si přímo odpovídají. S impedancí lze na kytáře posouvat laděním strun a váhou žebrovaní, mimo jiné také vlastnostmi materiálu.



Obr. 6.15: Impedanční charakteristika kytary EP

6.3 Tabulky vypočtených hodnot

V této podkapitole je možné porovnat vlastnosti materiálů, které byly měřeny ve firmě Furch Guitar's a také akustické a pružné vlastnosti materiálů, jež byly vypočteny pomocí vzorců [7].

V tab. (6.2) si lze všimnout rozdílných hustot rezonančních smrků, mezi kterými je rozdíl mezi nejnižší a největší hustotou 69 kg.m^{-3} . V kapitole 6.4-5 bude zobrazen vliv rozdílné hustoty. Každý z materiálů má také rozdílnou rychlost šíření zvuku, která má rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší naměřenou hodnotou 619 m.s^{-1} , ta se při měření měnila přibližně o 250 m.s^{-1} v každé z měřených poloh. Polohy, ve kterých se měřilo jsou popsány v kapitole 4.2.

Tab. 6.2 Naměřené hodnoty rezonančních smrků

Porovnání vlastností stejného materiálu								
Materiál	Váha m [kg]	Rozměry [cm]			Hustota ρ [kg.m^{-3}]	Rychlost šíření zvuku v [m.s^{-1}]		
		x	y	z		x	y	z
Rez. smrk 1	0.37	56.00	39.50	0.40	418.17	4950.33	1335.33	321.60
Rez. smrk 2	0.44	56.50	43.00	0.40	450.71	4926.67	1275.00	327.80
Rez. smrk 3	0.38	56.00	44.00	0.40	381.49	4482.33	1556.00	336.80
Rez. smrk 4	0.43	56.50	44.00	0.40	430.41	4331.33	1499.67	338.40
Rez. smrk 5	0.43	56.00	42.50	0.40	446.43	4842.00	1489.00	336.20

Přehled všech materiálů, které byly měřeny jsou zapsány v tab. (6.3). Nejnižší hustotu má cedrové dřevo, konkrétně 371 kg.m^{-3} . Nejvyšší hustota připadá ebenu s hodnotou 1289 kg.m^{-3} . Z těchto hodnot bylo dále možné dopočítat některé pružné a akustické vlastnosti, z nichž lze predikovat vhodnost daného materiálu pro výrobu jednotlivých částí akustické kytary.

Tab. 6.3: Naměřené hodnoty

Porovnání vlastností rozdílného materiálu								
Materiál	Váha m [kg]	Rozměry [cm]			Hustota ρ [kg.m^{-3}]	Rychlost šíření zvuku v [m.s^{-1}]		
		x	y	z		x	y	z
Rez. smrk	0.37	56.00	39.50	0.40	418.17	4950.33	1335.33	321.60
Cedr	0.36	55.00	44.50	0.40	371.81	4565.67	1537.33	234.20
Palisandr	0.47	56.00	43.50	0.27	717.63	4353.33	1963.33	248.60
Mahagon	0.36	54.50	43.50	0.27	554.60	4408.33	1774.00	243.60
Ořech	0.34	55.50	40.70	0.27	560.76	4380.00	1446.00	246.40
Český smrk	0.0028	18.00	0.60	0.45	576.13	5116.00	508.00	430.00
Eben	0.029	15.00	2.50	0.60	1288.89	4330.00	1740.00	1799.00

Tab. 6.4: Vypočítané vlastnosti pružnosti rezonančních smrků

Pružné vlastnosti stejného materiálu					
Materiál					
	Rez. smrk1	Rez. smrk2	Rez. smrk3	Rez. smrk4	Rez. smrk5
E_x [MPa]	10200	10900	7660	8070	10500
E_y [MPa]	746	733	924	968	990
E_z [MPa]	43	48	43	49	51
Pr_{xy} [-]	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Pr_{yz} [-]	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Pr_{xz} [-]	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
G_{xy} [MPa]	1250	1280	1200	1260	1450
G_{yz} [MPa]	82	86	91	99	102
G_{xz} [MPa]	322	352	279	306	352

Vypočítané vlastnosti pružnosti rezonančních smrků jsou vidět v tab. (6.4). Youngův model pružnosti v tahu byl vypočítán z naměřených hodnot a dopočítané hustoty z tab. (6.3). Poissonovo číslo bylo použito z tabulkových hodnot [24] a z Poissonova čísla a Youngova modelu pružnosti v tahu byl vypočítán Youngův model pružnosti ve smyku. Vypočítané hodnoty přibližně odpovídají tabulkovým hodnotám z literatury [24], tudíž mohou být použity jako vstupní data v programu ANSYS.

Tab. 6.5: Vypočítané vlastnosti pružnosti

Pružné vlastnosti rozdílného materiálu							
Materiál							
	Rez. smrk	Cedr	Palisandr	Mahagon	Ořech	Č. Smrk	Eben
E_x [MPa]	10200	7750	13600	10800	10800	15100	24200
E_y [MPa]	746	879	2770	1750	1170	1490	3900
E_z [MPa]	43	20	44	33	34	107	4170
Pr_{xy} [-]	0.40	0.40	0.32	0.3	0.37	0.37	0.37
Pr_{yz} [-]	0.40	0.40	0.21	0.21	0.21	0.44	0.43
Pr_{xz} [-]	0.50	0.50	0.15	0.15	0.15	0.46	0.47
G_{xy} [MPa]	1250	1300	2680	1930	1580	667	4330
G_{yz} [MPa]	82	49	171	117	97	56	1780
G_{xz} [MPa]	322	197	385	295	300	572	4530

Jelikož jsou výsledky vztažené k hustotě bude se měnit i Youngův model pružnosti v tahu, mezi kterými je rozdíl nejvyšší a nejnižší hodnoty 3,24 GPa. V tab. (6.5) je možné vidět srovnání dalších materiálů, jejichž hodnoty byly také použity pro tvorbu virtuálního materiálu v programu ANSYS. Materiálem s nejvyšší hodnotou Youngova modulu pružnosti v tahu je ebenové dřevo 24,2 GPa, nejnižší hodnotu má právě cedrové dřevo 7,8 GPa.

Tab. 6.6: Vypočítané akustické vlastnosti

Akustické vlastnosti měřených materiálů									
Materiál	Ak. Konst. K [-]			Ak. vlnový odpor Z [kg.m ⁻² .s ⁻¹]			Tlumení způsobené radiací λ [m ² .s.kg ⁻¹]		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Rez. smrk 1	11.8	3.2	0.8	2070099	558401	134485	11.8	3.2	0.8
Rez. smrk 2	10.9	2.8	0.7	2220498	574655	147743	10.9	2.8	0.7
Cedr	12.3	4.1	0.6	1697551	571593	87077	12.3	4.1	0.6
Palisandr	6.1	2.7	0.3	3124085	1408948	178403	6.1	2.7	0.3
Mahagon	7.9	3.2	0.4	2444856	983858	135100	7.9	3.2	0.4
Ořech	7.8	2.6	0.4	2456117	810855	138171	7.8	2.6	0.4
Český smrk	8.9	0.9	0.7	2947490	292675	247737	8.9	0.9	0.7
Eben	3.4	1.4	1.4	5580889	2242667	2318711	3.4	1.4	1.4
Ocel	0.6	0.6	0.6	39623226	39623226	39623226	0.6	0.6	0.6

Akustické vlastnosti neboli rezonanční vlastnosti materiálů jsou vypočítané v tab. (6.6), zde vypočítané hodnoty jsou důležité pro přesný výběr materiálu, ze kterého se následně vyrobí část akustické kytary.

Akustická konstanta vyjadřuje rezonanční vlastnosti materiálu, čím je konstanta vyšší, tím bude mít materiál lepší rezonanční vlastnosti, přesněji materiál s vysokou hodnotou bude lépe vyzařovat zvuk. Například ocel má akustickou konstantu 0,6 [-] a rezonanční smrk 11,8 [-] dřevo je tedy jednoznačně nepřekonatelné. Český smrk má o něco menší hodnotu akustické konstanty, konkrétně 8,9 [-], toto dřevo totiž nesplňuje přesné podmínky růstu, jeho vlákna jsou od sebe různě vzdálená a vlnitá, tím je dán tento rozdíl. Eben určený pro výrobu kytarové kobylky má akustickou konstantu 3,4 [-] nebude tedy vyzařovat zvuk, tak jako rezonanční smrk, tato vlastnost ale není u kytarové kobylky přímo žádoucí, žádoucí vlastností je naopak co nejnižší mechanická impedance (akustický vlnový odpor).

Akustický vlnový odpor říká, jaký je vnitřní odpor materiálu proti šířené zvukové vlně, takže čím nižší bude akustický vlnový odpor tím lepší bude mít materiál akustické vlastnosti.

Tlumení zvuku způsobené radiací vyjadřuje schopnost materiálu vyzařovat zvuk do svého okolí, čím větší tedy bude zvuková radiace materiálu, tím má lepší rezonanční vlastnosti [7]. Z tabulky je také vidět, že hodnoty akustické konstanty a tlumení zvuku způsobeného radiací jsou úplně totožné. Jedná se sice o jiné proměnné, jejich vzorce se však sobě rovnají.

6.4 Simulace v programu ANSYS

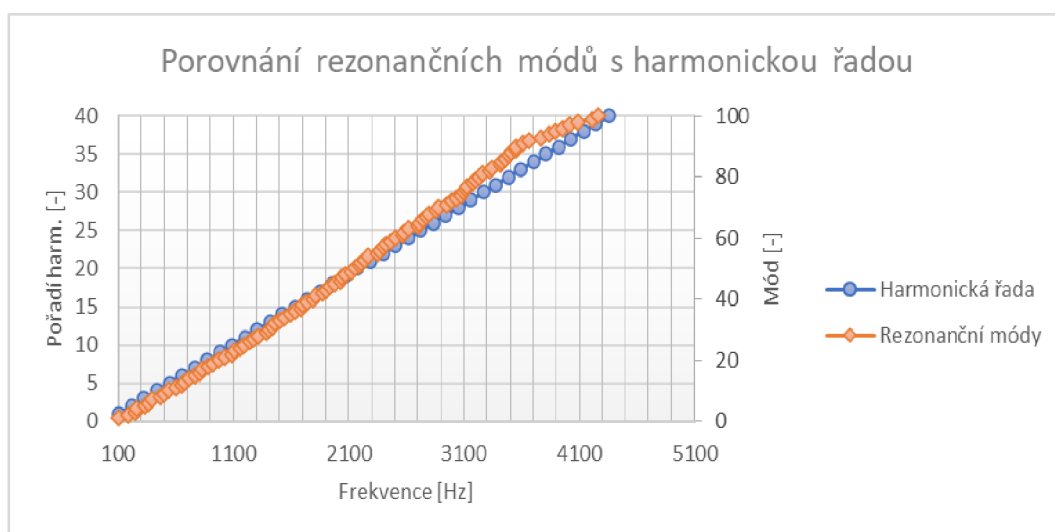
6.4.1 Porovnání rezonančních módů horních desek

Rezonanční módy byly vypočteny pro 100 módů, avšak z důvodu velikosti tabulky zde budou ukázány hodnoty pro 40 módů. Rezonanční módy na struně jsou sdružené s harmonickou řadou a teoreticky bude mít stejný počet vyšších harmonických složek jako rezonančních módů, z důvodu kmitání v jedné ose. Rezonanční módy na horní desce vznikají ve více osách a jejich počet bude vyšší než počet vyšších harmonických složek. Na obr. (6.16) je zobrazeno porovnání harmonické řady s rezonančními módy na horní desce. Průběh ve frekvenční oblasti je téměř lineární a shodný. Čím bude těleso pravidelnější, tím se bude křivce harmonické řady více podobat.

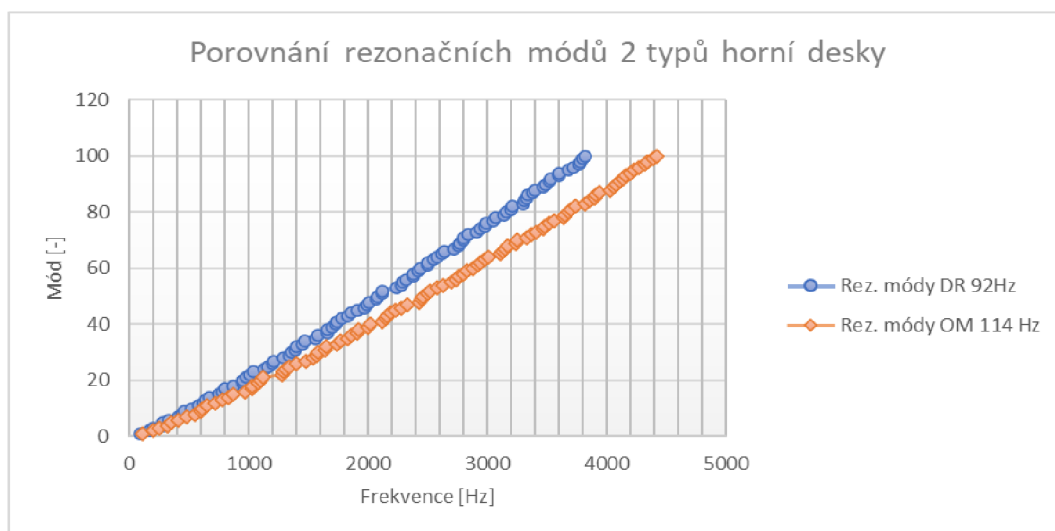
Od prvního rezonančního módu se bude odvíjet strmota křivky, čím bude první rezonanční mód vyšší, tím bude křivka méně strmá a naopak tj. širší rozsah. Příklad je zobrazen na obr. (6.17), kde první rezonanční mód horní desky u Furch dreadnought je 94 Hz (tón Fis) a u Furch orchestral model 114 Hz (tón A), rozdíl činí 20 Hz. Na stém módu u Furch dreadnought 3822 Hz (tón přibližně h^4) a u Furch orchestral model 4195 Hz (tón a^4), rozdíl činí 572 Hz.

Pro přehlednější porovnání byly vytvořeny tabulky, ze kterých je možné vyčíst přesné hodnoty. V tabulkách (6.7) a (6.8) je zobrazeno porovnání stejného typu horní desky v závislosti na materiálu. První rezonanční mód horní desky se mění při použití odlišného materiálu v průměru o 1 Hz až 10 Hz. Materiál rez_smrk_1 má první rezonanční mód na 88 Hz (tón F) a materiál rez_smrk_tab 83 Hz (tón E) jedná se zde o rozdíl tónu resp. půl tónu. Daleko větší rozdíl je možné sledovat při změně tloušťky horní desky. Při ztenčení horní desky se změní první rezonanční mód o 20 Hz. Tyto rozdíly mohou být vyčteny z tab. (6.8-9).

Rozdíly pozic rezonančních módů, které vznikají použitím materiálu např. odlišnou hustotou nebo použitím jiného typu horní desky, lze kompenzovat zbrúšením horní desky na potřebnou tloušťku.



Obr. 6.16: Porovnání rezonančních módů s harmonickou řadou



Obr. 6.17: Porovnání rez. módů 2 typů horní desky

Tab. 6.7: Rezonanční módy: Rez_smrk_1

Typ: DR, Materiál: Rez_smrk_1, Tloušťka 4 mm							
Mód [-]	Frek. [Hz]	Mód [-]	Frek. [Hz]	Mód [-]	Frek. [Hz]	Mód [-]	Frek. [Hz]
1	88	11	557	21	954	31	1364
2	164	12	599	22	993	32	1366
3	184	13	622	23	1018	33	1421
4	266	14	654	24	1106	34	1434
5	270	15	723	25	1141	35	1525
6	320	16	760	26	1174	36	1559
7	392	17	780	27	1188	37	1617
8	429	18	848	28	1257	38	1625
9	444	19	923	29	1316	39	1667
10	504	20	930	30	1334	40	1707

Tab. 6.8: Rezonanční módy: Rez_smrk_tab_4mm

Typ: DR, Materiál: Rez_smrk_tab, Tloušťka 4 mm							
Mód [-]	Frek. [Hz]	Mód [-]	Frek. [Hz]	Mód [-]	Frek. [Hz]	Mód [-]	Frek. [Hz]
1	83	11	519	21	904	31	1279
2	149	12	530	22	946	32	1351
3	187	13	618	23	1000	33	1369
4	243	14	650	24	1027	34	1394
5	254	15	660	25	1089	35	1425
6	322	16	698	26	1127	36	1468
7	354	17	759	27	1161	37	1479
8	380	18	787	28	1170	38	1523
9	459	19	797	29	1222	39	1615
10	478	20	861	30	1249	40	1641

Tab. 6.9: Rezonanční módy: Rez_smrk_tab_3mm

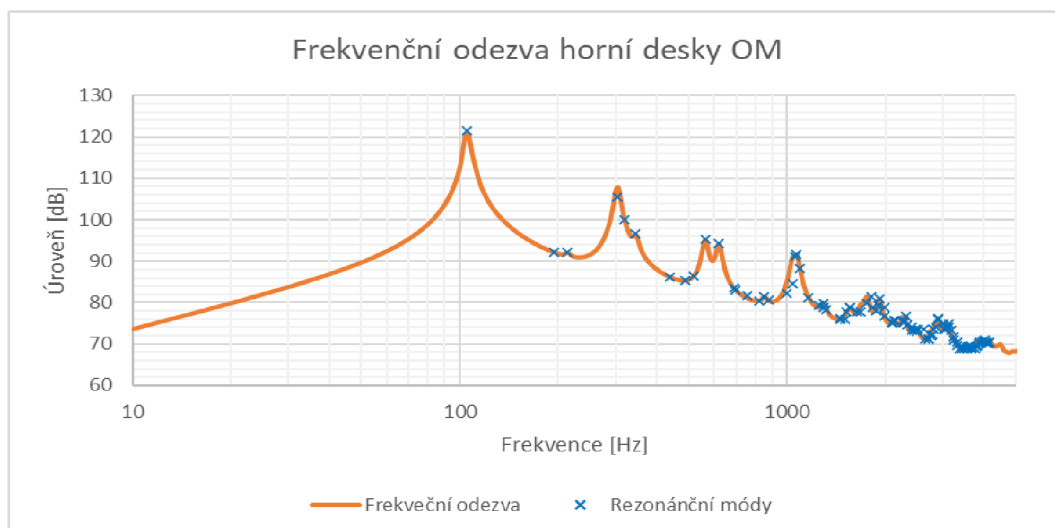
Typ: DR, Materiál: Rez_smrk_tab, Tloušťka 3 mm							
Mód [-]	Frek. [Hz]	Mód [-]	Frek. [Hz]	Mód [-]	Frek. [Hz]	Mód [-]	Frek. [Hz]
1	63	11	394	21	686	31	972
2	113	12	401	22	719	32	1034
3	141	13	469	23	762	33	1045
4	184	14	491	24	781	34	1064
5	192	15	501	25	827	35	1087
6	245	16	529	26	854	36	1120
7	267	17	574	27	883	37	1127
8	288	18	597	28	889	38	1161
9	347	19	605	29	930	39	1230
10	362	20	653	30	952	40	1244

Určení rezonančních módů je zásadní pro další zkoumání vlastností akusticko-mechanického obvodu akustické kytary. Budeme-li mít například frekvenční odezvu horní desky, tak do ní můžeme vložit pozice rezonančních módů a zjistit tak, kterým rezonančním módům věnovat pozornost. Před osazením žebrování se na tyto módy detailněji podívat a zamyslet se zdali je vhodné do určitých oblastí lepit žebrování. Mohou nám totiž nejvýraznější rezonanční módy oslabit a tím snížit vyzářovací výkon celé horní desky.

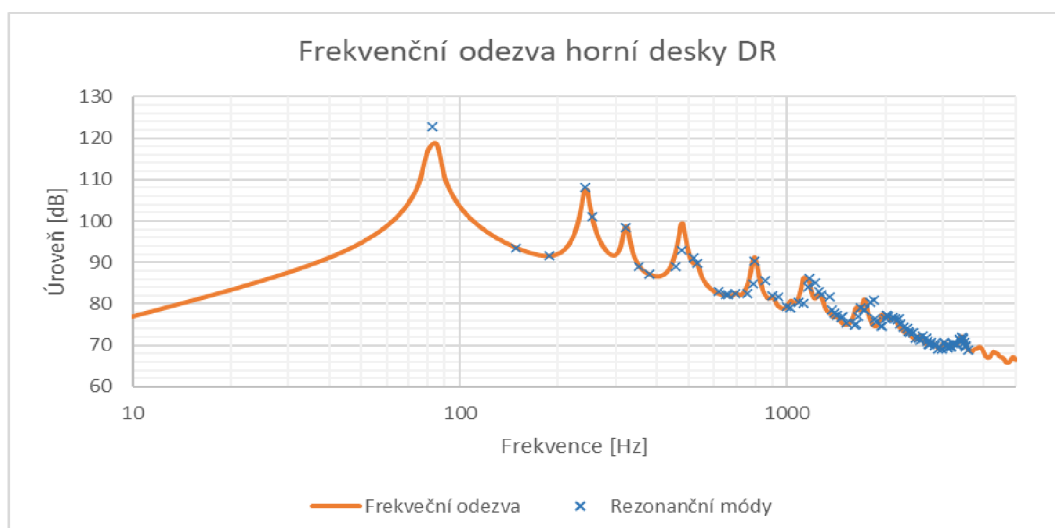
Pozice těchto módů jsou vyobrazeny na obr. (3.18-19). Lze sledovat, že na určitých frekvencích mají rezonanční módy větší úroveň odezvy na budící sílu. Při sledování obrázku (3.18), na které je frekvenční odezva horní desky Furch orchestral model, můžeme vyčíst, že důležitými rezonančními módy pro nás jsou módy 1, 4, 5, 6, 10 a 11. Na obrázku s frekvenční odezvou horní desky typu Furch dreadnought jsou to potom módy 1, 4, 5, 6 a 10. U obou typů horní desky dochází k velmi podobným vlastnostem, mají přibližně stejnou frekvenční odezvu a také stejné slabé a silné rezonanční módy. Tuto skutečnost ovlivňuje především tvar, který není u obou desek až tak odlišný, liší se pouze svými rozměry.

Tvar není jediným faktorem, dalším faktorem je typ materiálu a to přímo zda se jedná o izotropní či anizotropní materiál. U izotropního materiálu se šíří zvuk všemi směry stejnou rychlostí, teoreticky ku příkladu na čtvercové desce budou vznikat rezonanční módy blízké harmonické řadě struny.

Změníme-li však materiál z izotropního na anizotropní rychlost se začne v každém směru šířit jinou rychlostí a budou nám vznikat pro každý směr dvě harmonické složky stejné úrovně (např. druhá harmonická složka), ale s jinou frekvencí. Změny v rozložení rezonančních módů dále ovlivňuje samotná struktura materiálu, laicky řečeno podle toho jak dřevo naroste, vzdálenost let na kytarě a hustotu výplně (ligninu) mezi nimi. Bude tedy měnit rychlost šířeného zvuku a to především ve směru radiálním, v této práci nejčastěji označovaný jako osa y.



Obr. 6.18: Frekvenční odezva horní desky OM s módy



Obr. 6.19: Frekvenční odezva horní desky DR s módy

6.4.2 Porovnání frekvenční odezvy horních desek

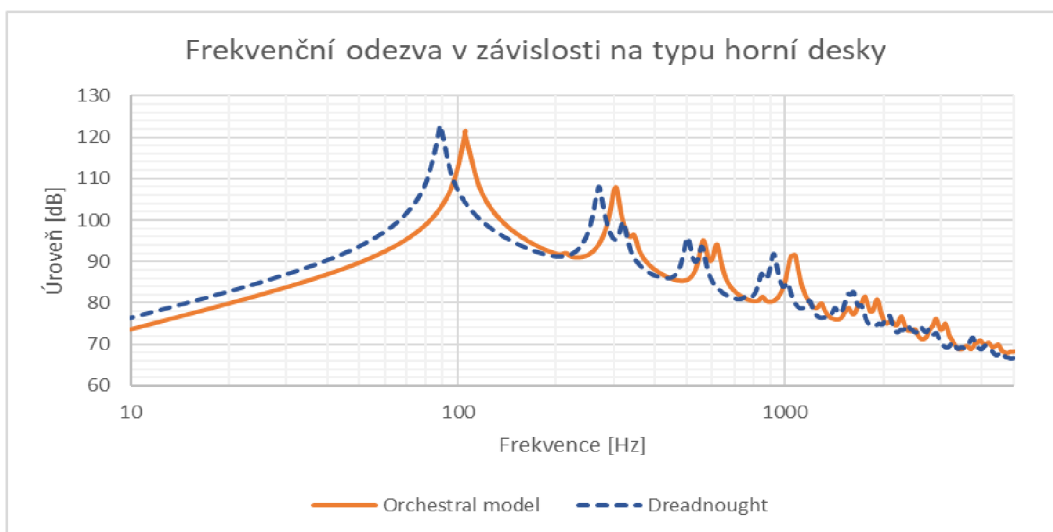
Tato podkapitola se bude zabývat porovnáním frekvenční odezvy horní desky v závislosti na typu tloušťky horní desky, hustotě a druhu materiálu. Z výsledků porovnání se může dále vycházet pro určení změn (inovace) na horní desce typu Furch dreadnought. Z výsledků bakalářské práce paní Bc. Hany Trávníčkové, měření firmy Furch Guitar's ve spolupráci s panem Mgr. MgA Ondřejem Jiráskem Ph. D. a také mého orientačního měření vychází, že akustická kytara typu Furch dreadnought ztrácí velmi rychle svůj výkon v čase.

Vyšší harmonické složky od 4 kHz vymizí po uplynutí 1,5-2 s. Na akustické kytáře typu Furch orchestral model vyšší harmonické složky od stejného kmitočtu vymizí až po uplynutí 4-4,5 s, lépe tedy drží svou barvu tónu.

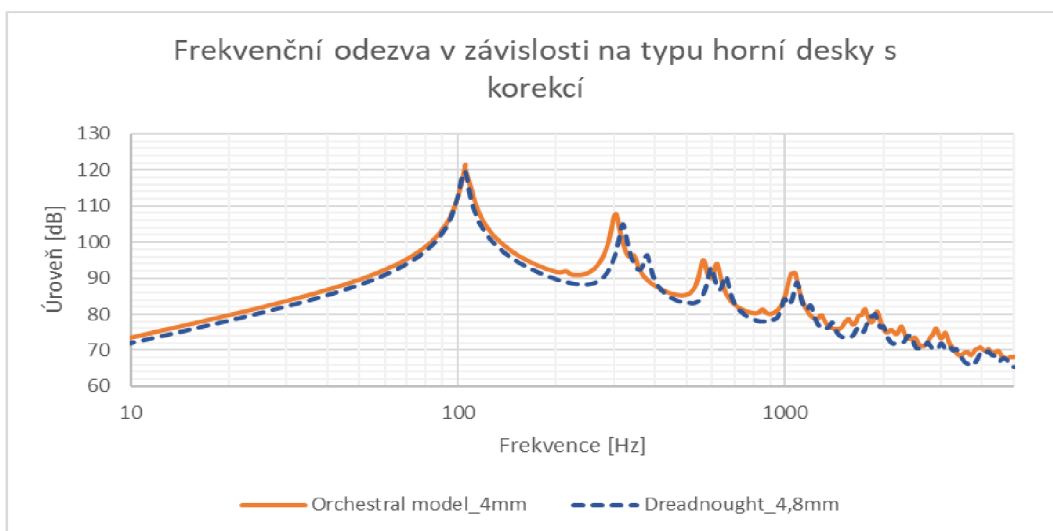
Prozkoumáním frekvenční odezvy na horní desce se pokusíme vyhledat rozdílnost mezi horními deskami při stejné tloušťce a stejných materiálových vlastnostech, ta je vyobrazena na obr. (6.20).

Z obrázku vyplývá, že menší horní deska typu Furch orchestral model má svoji frekvenční oblast posazenou na vyšších kmitočtech a má rozdílné silné rezonanční módy oproti větší horní desce typu Furch dreadnought, kde u horní desky Furch orchestral model začíná první rezonanční oblast na kmitočtu 105 Hz (přibližně tón A) zatímco u druhého typu horní desky začíná na kmitočtu 88 Hz (tón F), jedná se o rozdíl 4 půltónů.

Úroveň výkonu rezonančních oblastí (jinak řečeno oblast s výskytem silných rezonančních módů), je v obou případech stejný. Bez uvážení žebroví je tedy jedním z hlavních rozdílů horních desek jejich první rezonanční oblast.

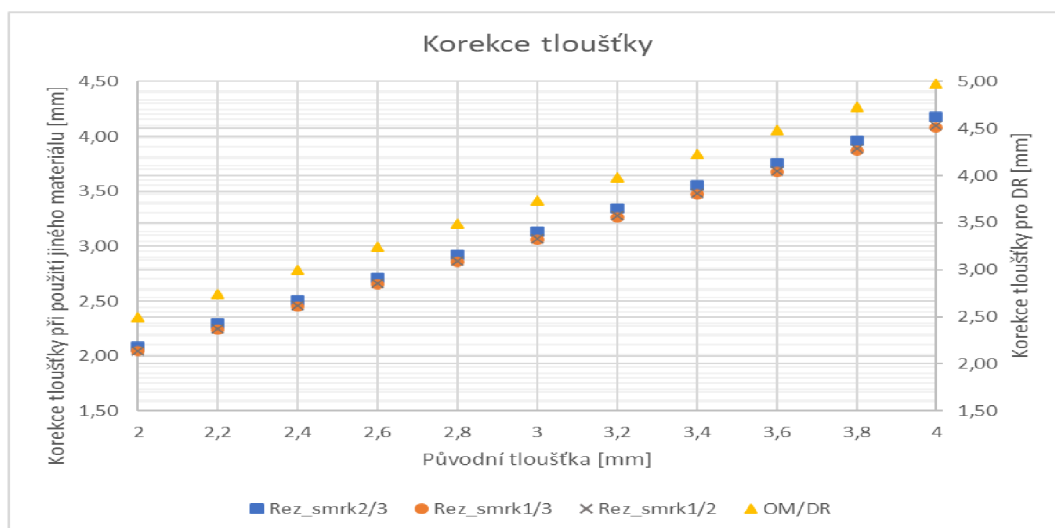


Obr. 6.20: Porovnání frekvenční odezvy horních desek



Obr. 6.21: Porovnání frekvenční odezvy horních desek s korekcí

Na obr. (6.21) je vidět frekvenční odezva stejných horních desek s korekcí tloušťky při stejných materiálových vlastnostech. Korekcí tloušťky horní desky typu Furch dreadnought dosáhneme toho, že budou mít oba typy horních desek naladěnou první rezonanční oblast na stejný kmitočet tedy na 105 Hz. Při této korekci však dojde ke ztrátě úrovně výkonu v průměru o -2 dB, k maximální ztrátě dochází na kmitočtu 295 Hz a jedná se o ztrátu -12 dB. K nejvyšším ztrátám dochází v rezonančních oblastech, kde se nachází slabé rezonanční módy. V rezonančních oblastech se silnými rezonančními módy jde právě o ztrátu 2 dB.



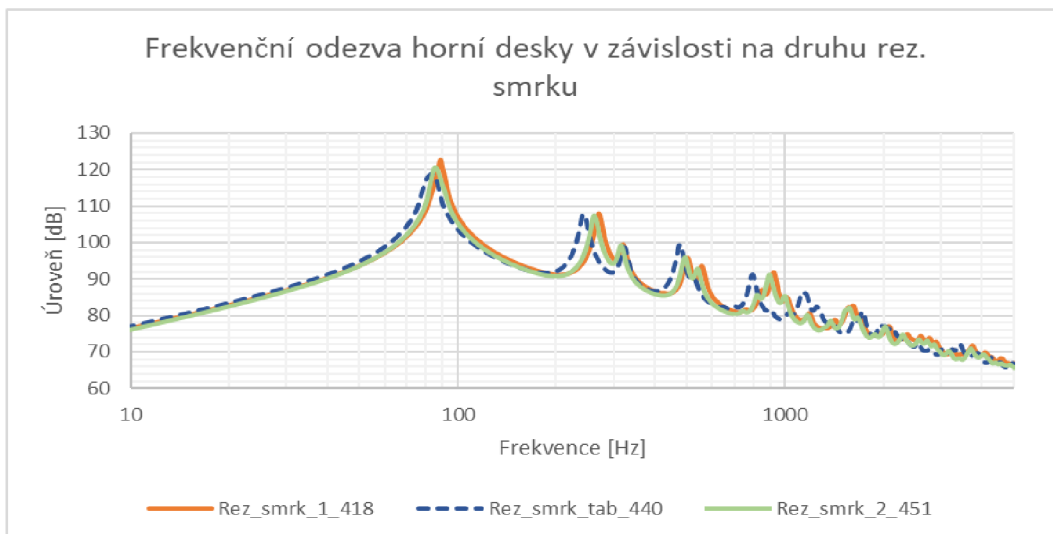
Obr. 6.22: Korekce tloušťky

Korekci tloušťky lze provádět v celém rozsahu tloušťky horní desky který se pohybuje od 2 mm až do 3,8 mm. K nastavení první rezonanční oblasti u obou horních desek na stejný kmitočet použijeme vypočtenou konstantu. Nazveme ji například kor (jako korekce) a její hodnota je 1,246 [-]. Vynásobíme-li aplikovanou tloušťku pro výrobu horní desky Furch orchestral model námi vypočtenou konstantou kor vyjde nám tloušťka, na kterou nastavit horní desku Furch dreadnought.

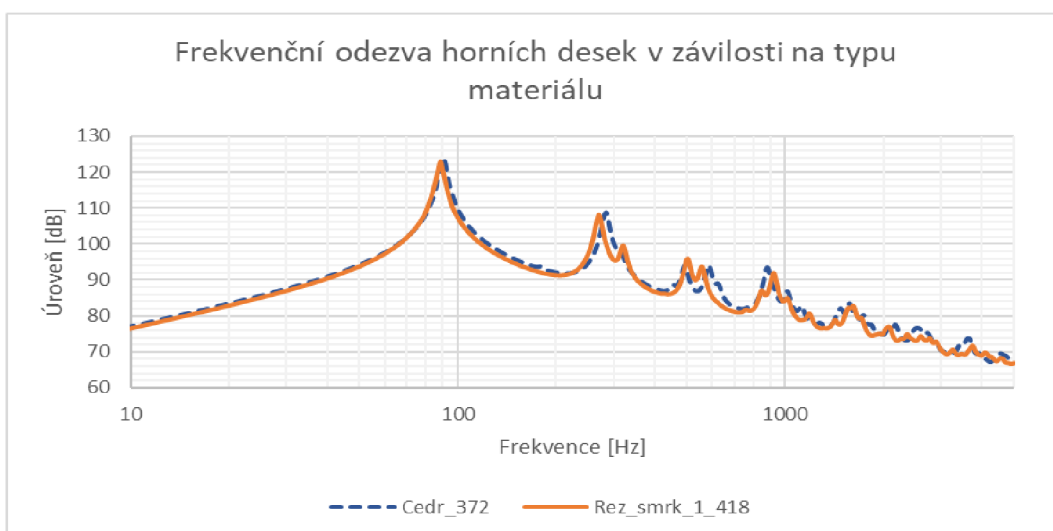
Hodnota konstanty je určena poměrem korekce mezi různými materiály a mezi poměrem korekce horních desek. Z těchto hodnot byl následně vypočten průměr všech poměrů, částečný graf je vidět na obr. (6.22).

Na obr. (6.23) je vyobrazené porovnání frekvenční odezvy v závislosti na hustotě materiálu a vzhledem k vypočítaným vlastnostem materiálu a tabulkovým hodnotám [9]. Lze vidět, že při různých vlastnostech materiálu se budou vytvářet jiné rezonanční módy, tím i jiné rezonanční oblasti. Takovéto změny nelze kompenzovat. Porovnáme-li hustotu stejného materiálu zjistíme, že menší hustota vede k větší úrovni výkonu.

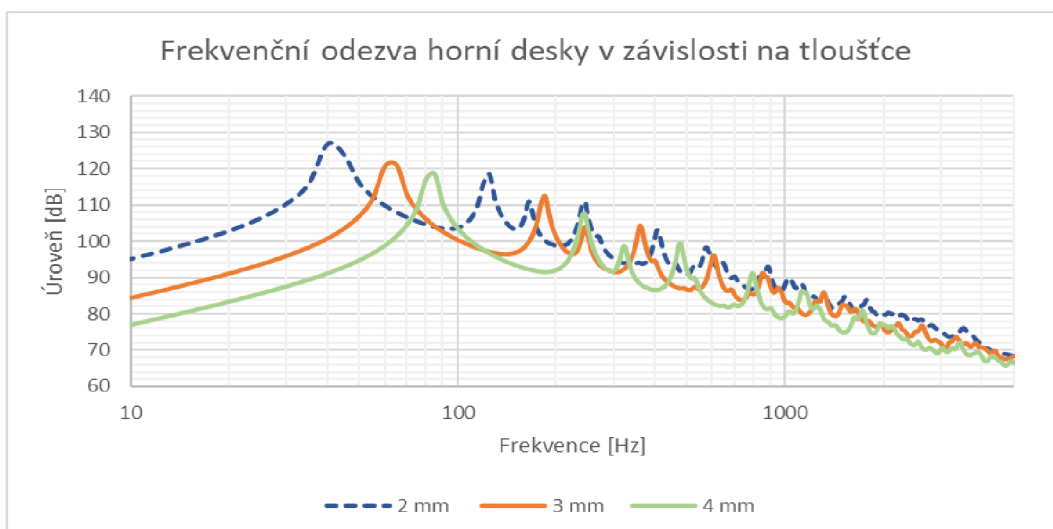
Porovnání frekvenční odezvy dle druhu dřeviny vidíme na obr. (6.24). Lze vidět, že se opět vytváří odlišné frekvenční oblasti, které se však stále pohybují na téměř stejných kmitočtech. Cedrové dřevo má o něco menší hustotu, má tedy o něco silnější úroveň výkonu. Vliv tloušťky na výslednou úroveň výkonu je zobrazen na obrázku (6.25). Čím bude horní deska tenčí, tím bude úroveň výkonu v celém kmitočtovém rozsahu větší. Zároveň se však přesune první rezonanční oblast směrem k nižším kmitočtům.



Obr. 6.23: Frekvenční odezva v závislosti



Obr. 6.24: Frekvenční odezva v závislosti na typu materiálu



Obr. 6.25: Frekvenční odezva v závislosti na tloušťce

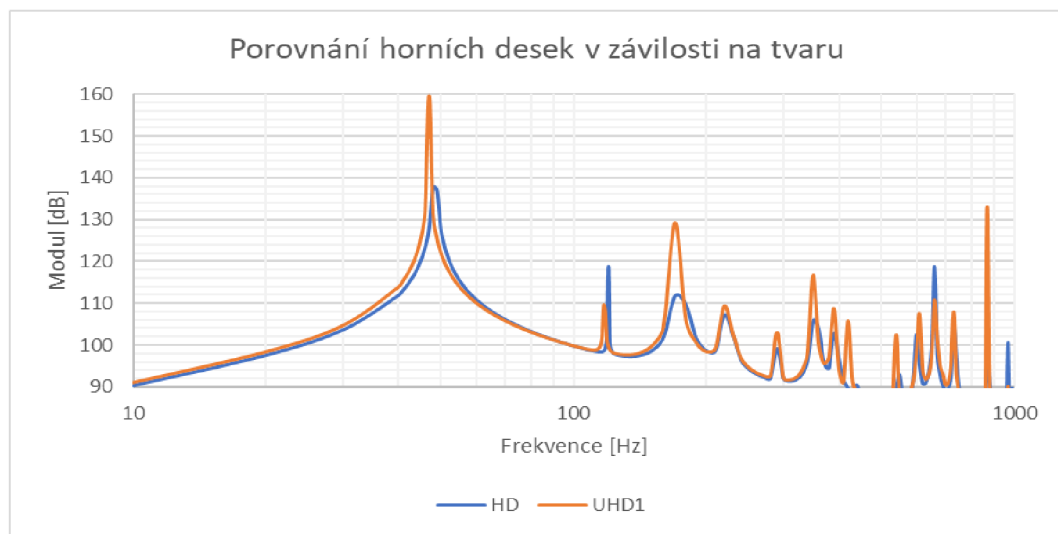
6.4.3 Porovnání vlivu tvaru horní desky

V této části bude porovnán vliv tvaru horní desky, o toto porovnání požádala firma Furch Guitar's. Ve firmě jsou horní desky zbrušovány a mají rozdílnou tloušťku po celé své ploše. Výrobce zajímá, jaké změny vznikly touto úpravou oproti horní desce, která má stejnou tloušťku „je rovná“.

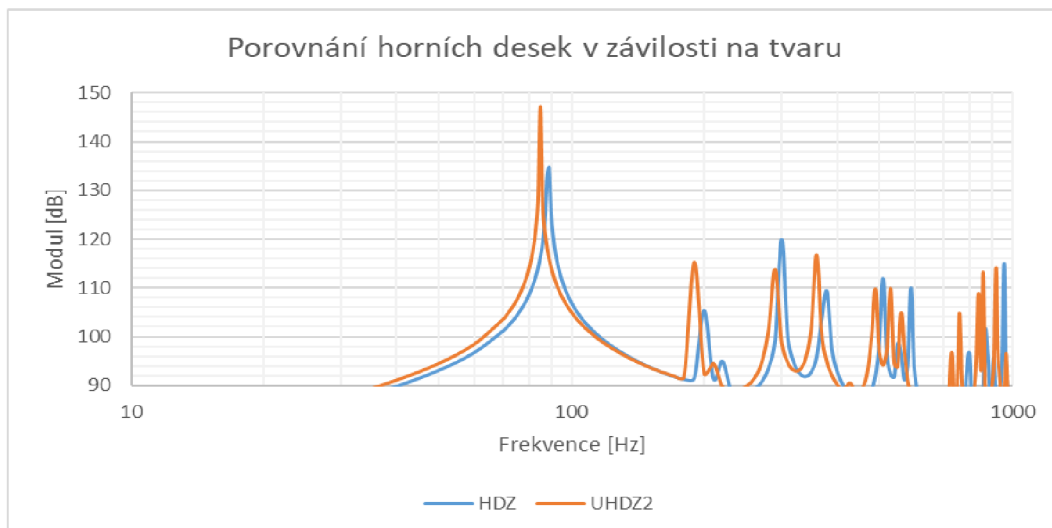
Pro zjištění vlivu byl použit program ANSYS, kde se tyto horní desky nově vymodelovaly a nechaly se spočítat harmonickou analýzou, pro horní desku bez žebrování a s žebrováním. Výsledek této analýzy je možné vidět na obr. (6.26 a 6.27).

Označení HD připadá rovné horní desce a UHD je název pro zbrúšením upravenou horní desku, Z v názvu prezentuje, že daná deska je s žebrováním. Na obr. (6.26) je možné vysledovat, že zbrúšená horní deska má větší výkon rezonančních módů v celém zobrazeném rozsahu beze změny jejich frekvenčních pozic. Na horních deskách s žebrováním je možné sledovat obdobný rozdíl, tedy nárůst výkonu rezonančních módů, avšak ne v celém zobrazeném rozsahu, ale v rozsahu do 200 Hz a dále od 700 Hz, pásmo mezi těmito frekvencemi je u obou desek rovnocenné.

Výhodu shledávám v odlehčení desky, tím se sníží hmotnost a zároveň se zmenší útlum, v oblasti kobylinky a krku zůstává stejná tloušťka, pevnost v této oblasti je tedy shodná. Zbrúšením se podpoří výkon rezonančních módů a sníží se útlum proti kmitání, tím se podpoří výkon vyšších rezonančních módů.



Obr. 6.26: Vliv tvaru horních desek



Obr. 6.27: Vliv tvaru horních desek s žebrováním

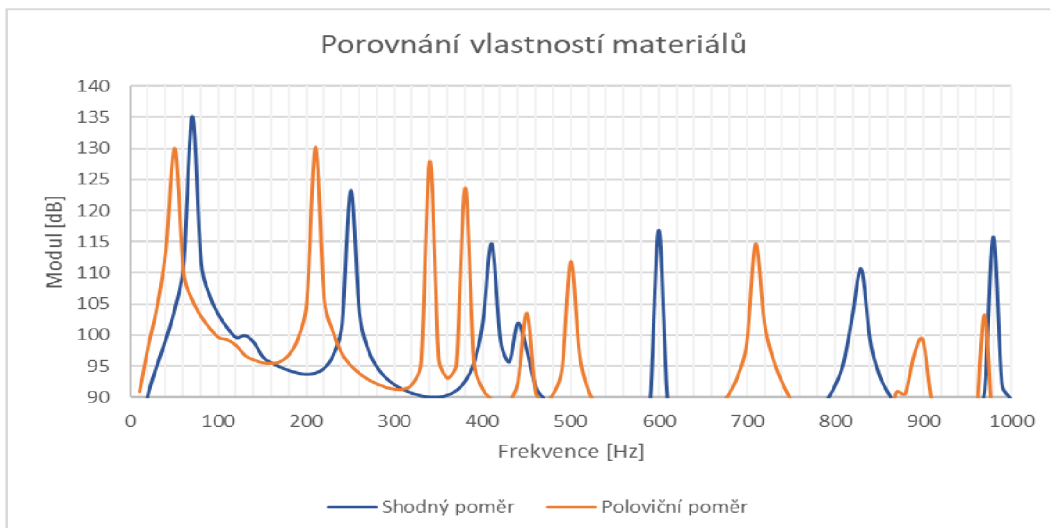
6.4.4 Porovnání vlastností materiálu horní desky

Toto porovnání vzniklo z představy, zdali existuje ideální poměr mezi rychlostí šíření ve směru vláken „x“ a ve směru kolmém na vlákna „y“. Například u izotropního materiálu jsou tyto rychlosti shodné a na čtvercové desce se vytvoří první mód ve středu desky se stejnou šířkou módu v těchto směrech, vlnové délky jsou si totiž rovné. Změnou materiálu na ortotropní, kde je poměr rychlostí 3 : 1, dochází k vytvoření prvního rezonančního módu na čtvercové desce taktéž ve středu desky, ale ve směru, kde je šíření zvuku rychlejší, se vytvoří delší mód a naopak. Pro porovnání poměru byly vytvořeny 4 typy materiálu s různým poměrem rychlostí šíření zvuku, a to shodným, polovičním, třetinovým a „třetinovým“ s neceločíselným poměrem. Výsledky tohoto průzkumu jsou zobrazeny na obr. (6.28 až 6.30).

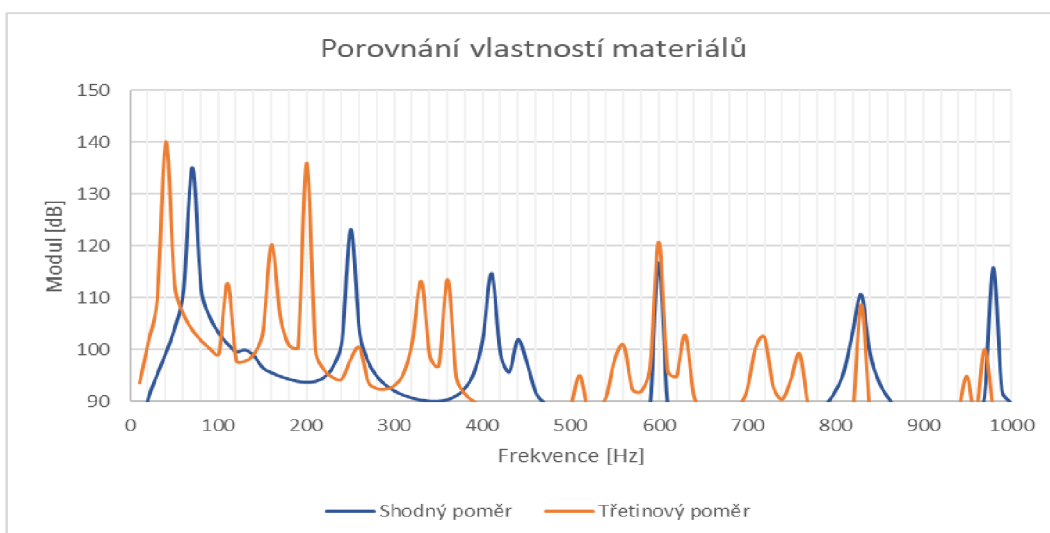
Z grafu v obr. (6.28) lze vidět výsledný součet generovaných rezonančních módů pro poměr shodný a poloviční na horní desce kytary. Shodný poměr rychlostí generuje menší počet rezonančních módů, protože dochází k jejich společnému sčítání, mírné odchylky jsou způsobeny tvarem horní desky. Poloviční poměr rychlostí generuje oproti shodnému poměru větší počet rezonančních módů s lehce větším výkonem.

Obr. (6.29) zobrazuje též porovnání, ale je zde porovnán shodný poměr s třetinovým poměrem. Je možné sledovat ještě větší množství generovaných rezonančních módů u třetinového poměru vůči shodnému a polovičnímu poměru rychlostí. Na nižších frekvencích má třetinový větší výkon než shodný poměr, směrem k vyšším frekvencím klesá výkon třetinového poměru strměji než u poměru shodného.

Dřevěný materiál má poměr rychlostí třetinový, změření a výpočtů tomu odpovídá i tvar kytary. Je vhodné měřit rychlost šíření zvuku v materiálu, který se použije pro výrobu horní desky a tím se dosáhne celočíselného poměru rychlostí nebo je to nežádoucí? Porovnání je znázorněné na obr. (6.30), neceločíselný poměr generuje výkonově slaběji všechny rezonanční módy a výskyt rezonančních módů se význačně odlišuje od celočíselných poměrů, a tak dochází, že se ve frekvenční oblasti tvoří místa bez rezonance, jinými slovy výskyt není spojitý má hluchá místa. Tento nepoměr přinese ostřejší/zkreslenější barvu. Celočíselným násobkem tedy docílíme většího výkonu a většího počtu vygenerovaných rezonančních módů. Je tedy vhodné se zabývat měřeními vlastností materiálů, které budou dále použity k výrobě horních desek.



Obr. 6.28: Porovnání poměru rychlostí



Obr. 6.29: Porovnání poměru rychlostí 2



Obr. 6.30: Porovnání poměru rychlostí 3

6.4.5 Inovovaná horní deska s žebrováním

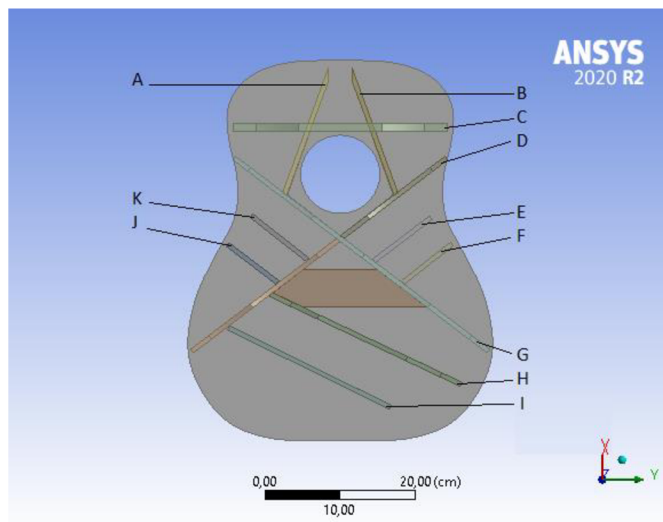
Většina parametrů byla na horních deskách simulována, avšak bez vlivu žebrování, které se chová jako zátěž a které bude zvyšovat rezonanční kmitočet. Dále může omezovat kmitání v některých rezonančních oblastech. Pomineme-li tento vliv, můžeme navrhnout změny, které aplikovat na horní desce Furch dreadnought.

První změnou by bylo aplikování korekce tloušťky a nastavit tak rozdílným rozměrům horních desek Furchorchestral model a Furch dreadnought stejný první rezonanční kmitočet. Rezananční kmitočet s Furchorchestral modelsdíli kytara Epiphone dreadnought, která je stejného typu jako Furch dreadnought.

Další změnou, vezmeme-li v potaz žebrování, se bude týkat právě žebrování samotného. To můžeme udělat těžší, lehčí, odebrat ho nebo ho přidat. Při zkušební hře na nástroje Furch orchestral model a Furch dreadnought byly různé pozice na horní desce tlumeny. U Furch dreadnought nastával minimální rozdíl při utlumení oblasti na krajích kobylky, kde má Furch dreadnought 2 plátky žeber. Proto bylo navrženo odstranění jednoho ze dvou plátků žeber.

K dalšímu návrhu pomohl program ANSYS, kde byla simulována frekvenční odezva horní desky Furch dreadnought s žebrováním spolu se zobrazením rezonančních módů do kmitočtu 5 kHz. Rezananční módy byly prohlédnuty a byly vyhledávány rezonanční módy, do kterých zasahuje žebrování, a které z žeber to má za příčinu. Do kmitny módu zasahovala již zmíněná dvojice plátků žeber, které se nachází po stranách kobylky. Nebyla to však jediná žebra, která zasahovala do kmiten módů. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl žebra, kterých se to týkalo, modifikovat nebo odebrat.

Na obr. (6.31) je zobrazena horní deska s žebrováním, na kterém jsou popsány názvy žeber, které budou v dalších částech užívány.



Obr. 6.31: Horní deska s žebrováním s pojmenováním žeber

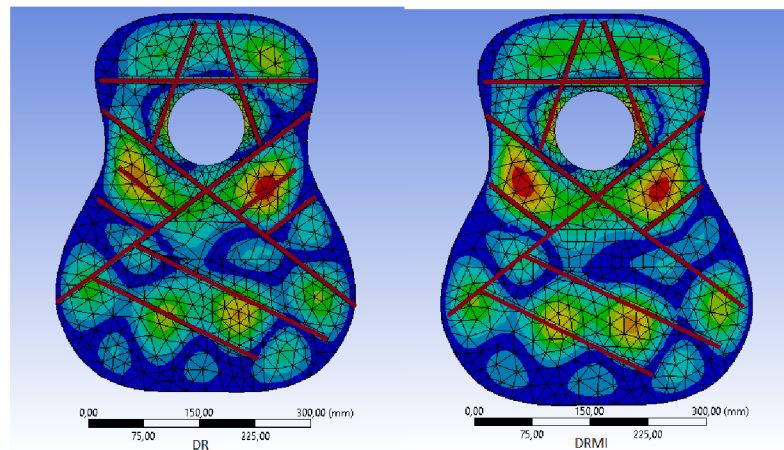
6.4.6 Inovace žebrování po zkušební hře

V této části budou porovnány rezonanční módy, neupraveného žebrování Furch dreadnought a inovovaného žebrování dreadnought inovace1, vzniklé superpozicí rezonančních módů v daném frekvenčním rozsahu v grafech a obrazcích se bude používat zkratka DRMI. A také odezva horních desek s žebrováním.

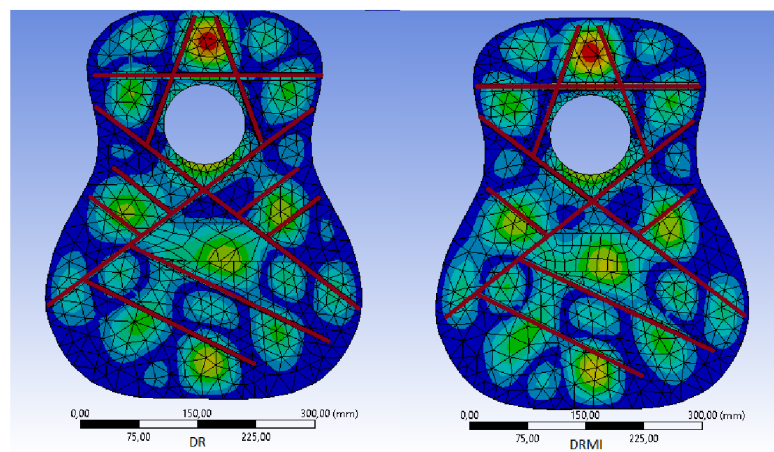
Na obr. (3.32) je zobrazen rozdíl zásahu žebrování do rezonančních módů u Furch dreadnought a dreadnought inovace 1 do kmitočtu 1 kHz. Lze pozorovat, že u Furch dreadnought zasahují žebra E a K do vzniklé kmitny. U dreadnought inovace 1 jsou tato žebra posunuta od své polohy o 2 cm a žebra F a J jsou odebrána. Plocha kmitání na horní desce byla u dreadnought inovace 1 zvětšena.

Rozdíl do rezonančních módů v rozsahu od 1 kHz do 1,5 kHz je na obr. (6.33), kde u dreadnought inovace1 dochází k většímu prolnutí rezonančních módů, zvlášť potom ve spodní části horní desky.

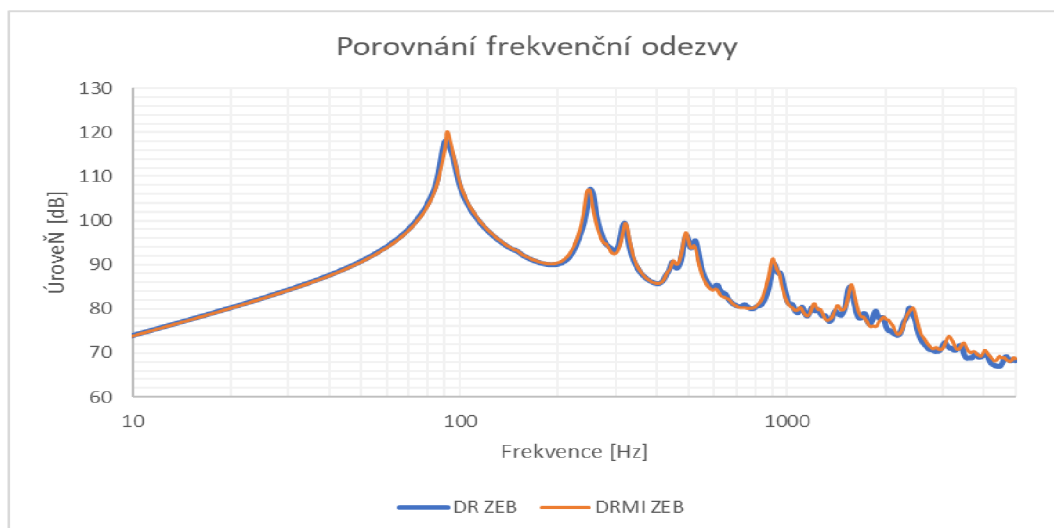
Frekvenční odezva je vidět na obr. (6.34). Lze si všimnout menšího posílení výkonu v první rezonanční oblasti, dále posílení na kmitočtu okolo 500 Hz, 900 Hz a od 3 kHz. Změny frekvenční odezvy mezi deskami nejsou příliš výrazné.



Obr. 6.32: Módy u DR a dreadnought inovace1 do 1 kHz



Obr. 6.33: Módy u DR a DRMI od 1 kHz – 1,5 kHz



Obr. 6.34: Frekvenční odezva DR a DRMI

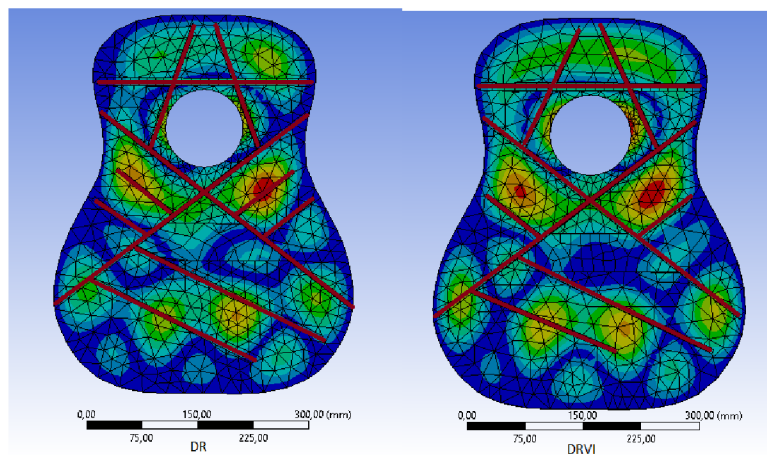
6.4.7 Inovace žebrování po simulaci

Stejně porovnání jako v předchozí části proběhne i v této podkapitole. Změny v žebrování jsou v této části markantnější a inovované žebrování nese název dreadnought inovace 2, zkratka pro obrázky a grafy této inovace je DRVI. Oproti původnímu žebrování je u dreadnought inovace 2 odebráno žebro J a F, žebra E a K jsou posunuta od své pozice o cca 2 cm, žebro I je zkráceno o 4 cm z 24 cm, jeho úhel je zostřen o 5° , žebro C je ztenčeno z 1,7 cm na 1,4 cm a žebra A a B mají tupější úhel k žebro c o 5° z 110° .

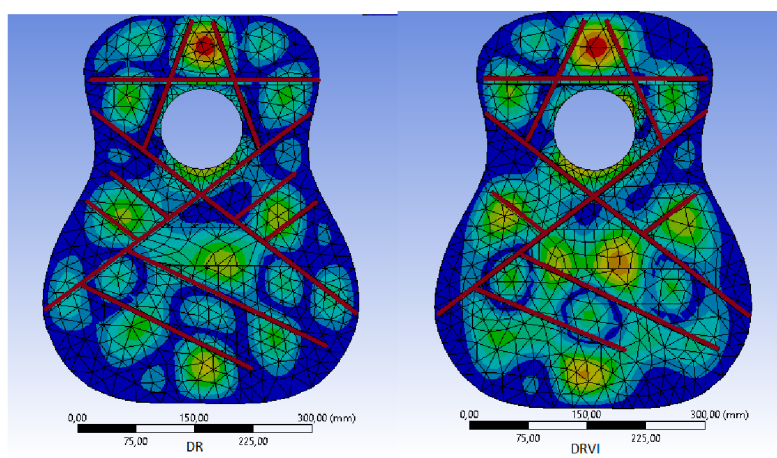
Při porovnání změn rezonančních módů do 1 kHz desky Furch dreadnought a dreadnought inovace 2 vychází lépe inovované žebrování, které ve vrchní části horní desky vytváří větší plochu na níž mohou rezonanční módy vznikat. V oblasti kolem otvoru ozvučnice se horní desce umožnilo kmitat. Je tak znázorněno na obr. (6.35).

Na zobrazení (6.36) je viditelné stejné porovnání s tím rozdílem, že se pomocí metody superpozice sečetly rezonanční módy od 1 kHz do 1,5 kHz. Opět se na dreadnought inovace 2 vyskytuje plocha s větší možností volnosti kmitání. Zde se jedná o plochu ve spodní části horní desky.

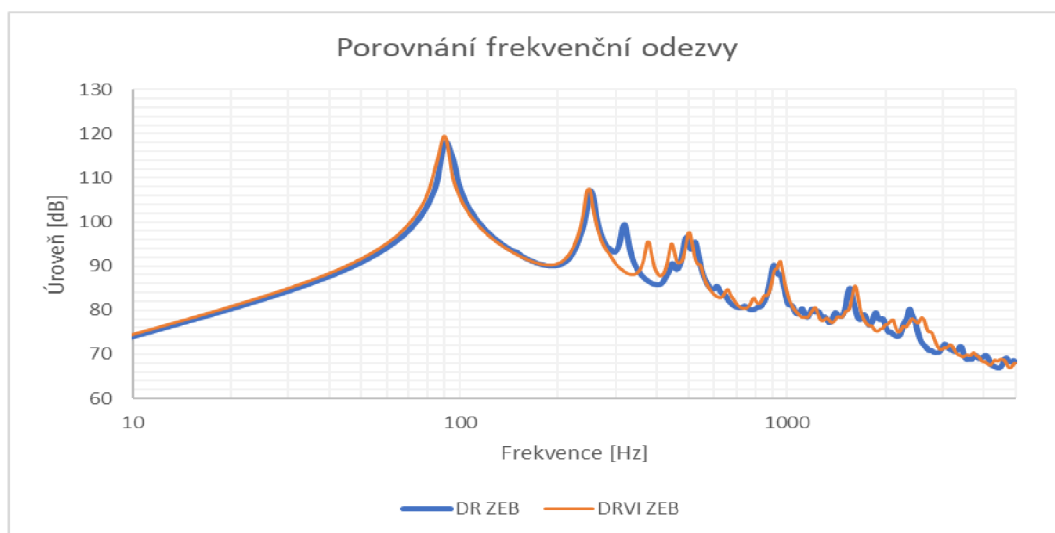
Frekvenční odezva u dreadnought inovace 2 je oproti Furch dreadnought ve své úrovni vytvářeného výkonu posílněna. Změna přinesla dvě nově vzniklé rezonanční oblasti na kmitočtu 370 Hz a 450 Hz, avšak přišla o jednu rezonanční oblast na kmitočtu 310 Hz. Posílení se projevuje na všech silných rezonančních módech. Tato frekvenční odezva je vidět na obr. (6.37).



Obr. 6.35: Módy u DR a DRVI do 1 kHz



Obr. 6.36: Módy u DR a DRVI od 1 kHz do 1,5 kHz



Obr. 6.37: Frekvenční odezva DR a DRVI

6.4.8 Analýza modelu akustické kytary a její komparace

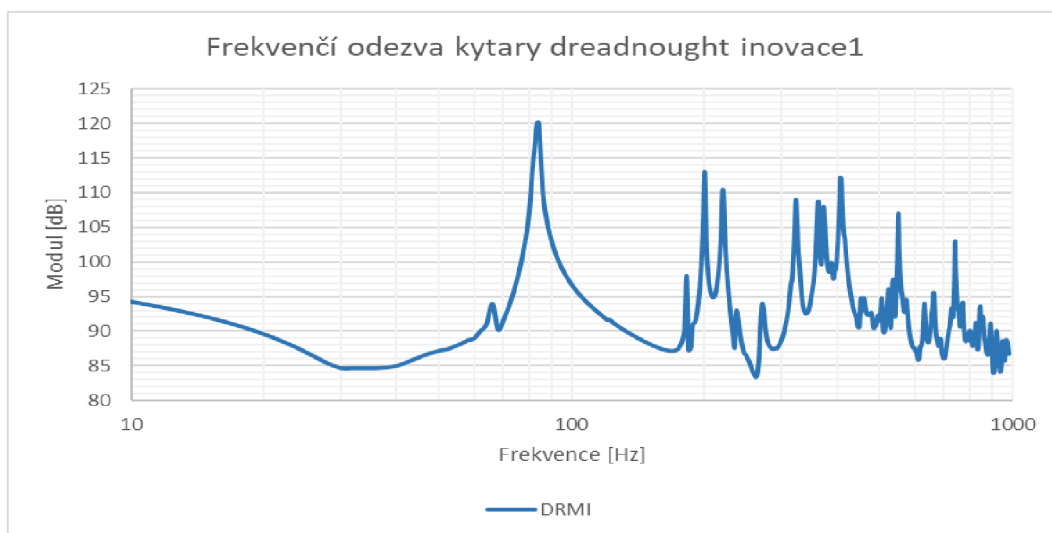
V této části bude představena frekvenční odezva jedné z inovovaných kytar z prostředí programu ANSYS a bude porovnána s frekvenční charakteristikou, která byla změřena. Dále zde budou porovnány rezonanční módy kompletního korpusu bez žebrování s žebrováním a v poslední řadě budou srovnány s Chladniho obrazci.

V tab. (6.10) jsou výsledky porovnání pozic rezonančních módů mezi prostředím ANSYS a reálným měřením. Pozice si jsou blízké, ale nejsou si stoprocentně rovny. Příčin může být hned několik, například nelinearity způsobené skutečným materiálem a celým mechanickým obvodem, chybou při nastavení výpočtu v programu ANSYS, rozdílnými vlastnostmi materiálu atd.

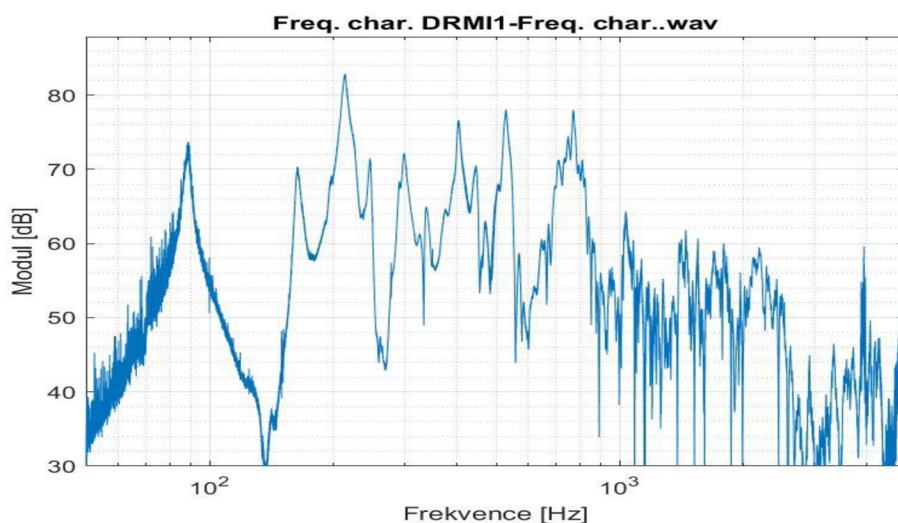
Na obr. (6.38 a 6.39) je znázorněné grafické srovnání, kde je možné sledovat změny především ve výkonu rezonančních módů, a to hlavně z toho důvodu, že frekvenční odezva reaguje na útlum materiálu + důvody viz výše a frekvenční charakteristika je podporována generátorem. Přesto je jejich podobnost dost zřetelná. Pozice rezonančních módů vypočtené v programu ANSYS odpovídají pozicím na změřené frekvenční charakteristice.

Tab. 6.10: Porovnání pozic rezonančních módů

Porovnání rezonančních módů											
	Frekvence [Hz]										
Měření	94	178	205	250	300	349	402	447	514	685	760
Simulace	95	184	200	235	322	372	408	452	550	660	740

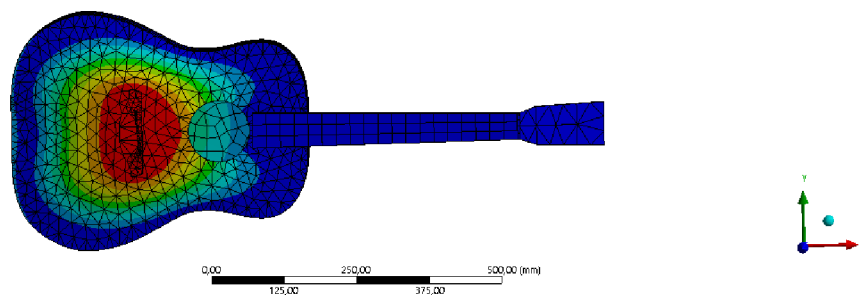


Obr. 6.38: Frekvenční odezva kytary dreadnought inovace1 ANSYS

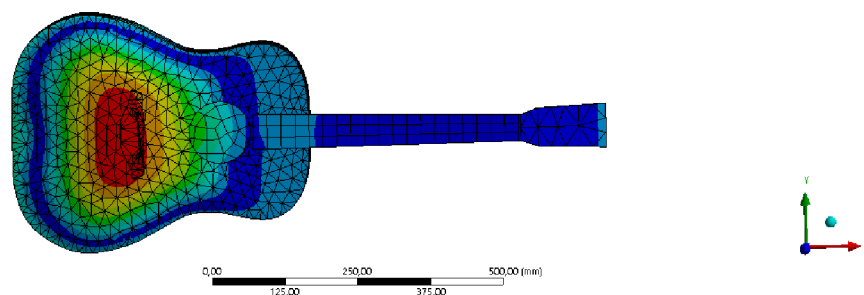


Obr. 6.39: Frekvenční charakteristika kytary DRMI

Dále bude představen kompletní model akustické kytary a právě jeho rezonanční módy a bez žebrování a s žebrováním. Model s žebrováním bude následně porovnán s Chladniho obrazci. První rezonanční mód je zaznamenán na obr. (6.40 a 6.41), hlavním rozdílem je, že u kytary s žebrováním se vytvoří uzly ještě před upevním k lubům a že okraje kytary dále rezonují (oproti kytarě bez žebrování, která rezonuje především v oblasti u kobylky). Posledním rozdílem je změna rezonanční frekvence – ta se posunula od 20 Hz výš u kytary s žebrováním, a to díky jeho zatížení horní desky. Hmotností žebrování lze tedy ladit desku, při menší hmotnosti směrem k nižším frekvencím a při naopak větší hmotnosti do vyšších frekvencí.

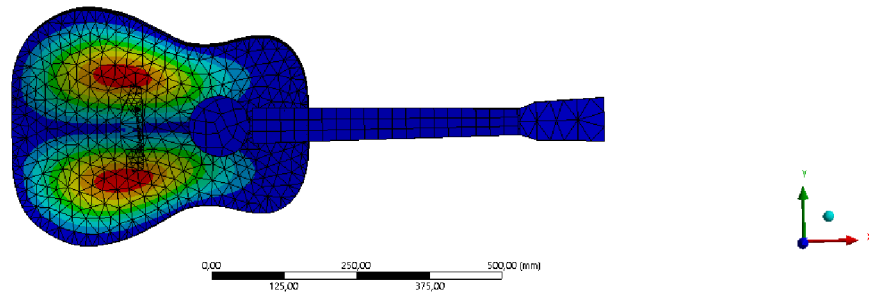


Obr. 6.40: 1. rezonanční mód [74 Hz] bez žebrování

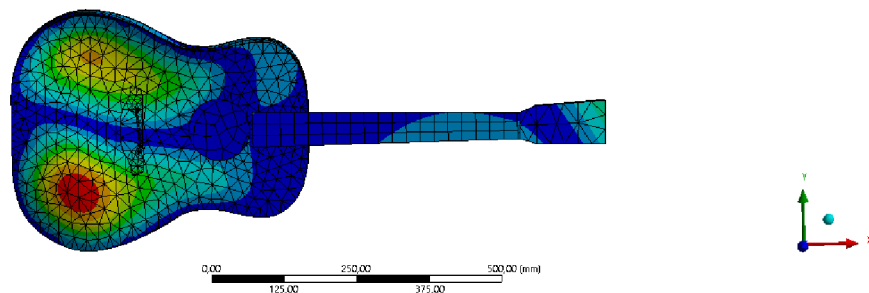


Obr. 6.41: 1. rezonanční mód [96 Hz] s žebrováním

Na dalších obrázcích (6.42 a 6.43) je představen druhý rezonanční mód (opět pro kytaru s žebrováním a bez žebrování). Kytara bez žebrování generuje symetricky druhý rezonanční mód, jak rozměrově, tak i výkonově. Kytara s žebrováním generuje tento samí mód nesymetricky v obou ohledech jako u kytary bez žebrování. Dále bude mít tato nesymetrie vliv na směrové vyzařování (tedy směrovou charakteristiku nástroje). Mód, který vznikl s žebrováním, vyplňuje větší plochu než kytara bez žebrování. Za nesymetrii může právě tvar žebrování, který je ve spodní části nesymetrický viz další část kapitoly.



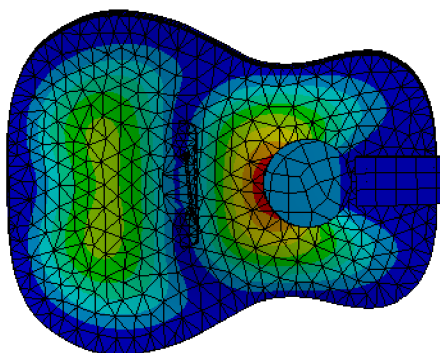
Obr. 6.42: 2. rezonanční mód bez žebrování



Obr. 6.43: 2. rezonanční mód s žebrováním

Pro porovnání rezonančních módů mezi simulací v programu ANSYS a skutečným měřením Chladního obrazců byl vybrán třetí rezonanční mód, viz obr. (6.44-6.45). Tento mód je v obou případech velmi podobný, tomu nahrává skutečnost, že model by měl být replikou právě porovnávané kytary. Rozdílem je především rezonance ve spodní části desky, která u reálné kytary rezonuje až k jejím krajům, kde probíhá přenos energie na luby kytary.

Komparovány byly i další rezonanční módy, které potvrzovaly shodu v tvaru rezonančních módů, pozice těch to rezonančních módů byli odlišné o několik hertz, což je způsobené odlišností vlastností materiálu atd.



Obr. 6.44: 3. rezonanční mód kytary s žebrováním ANSYS



Obr. 6.45: 3. rezonanční mód kytary DRMI

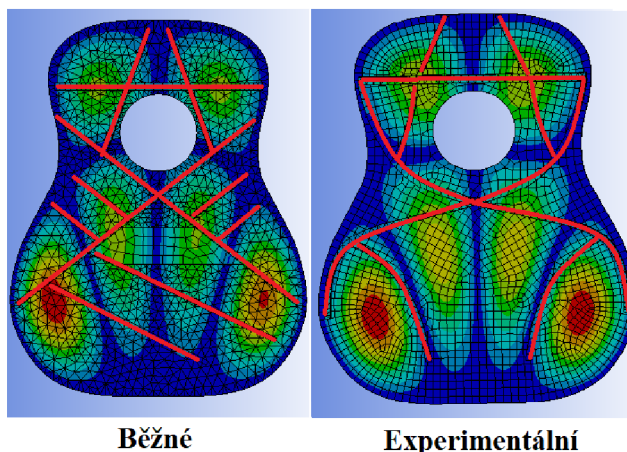
6.4.9 Experimentální žebrování

Tato část představí experimentální tvar žebrování, který byl vytvořen pozorováním prvních 26 módů na horní desce bez žebrování. Účelem pozorování bylo vytvořit mapu uzlů a kmiten. Žebrování by mělo obtékat kmitny a mělo by být umístěné v místě uzlů, tím by mělo být dosaženo, že žádné z žebrování nebude bránit kmitně v pohybu.

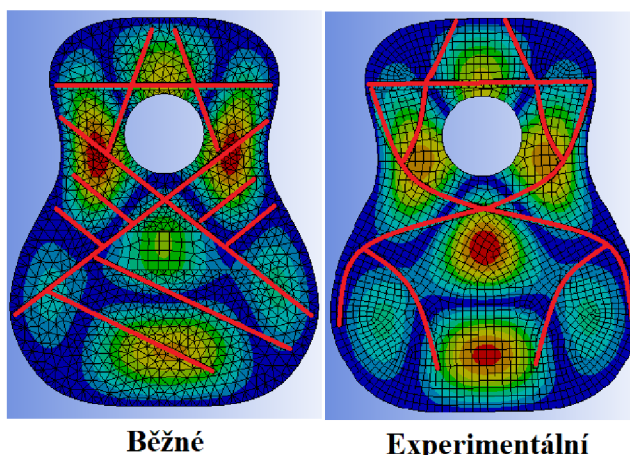
Žebrování dostalo novou formu až na část v horní části desky, kde žebrování a jeho pozice zpevňuje tuto část, z důvodu že v tomto místě je přilepen krk a výrobce sám očekává, že tato část bude tzv. „hluchá“.

Experimentální žebrování nemá již tvar lineární ale spíše exponenciální. Na obr. (6.46) je znázorněn sedmý mód na horní desce s běžným a experimentálním žebrováním. Lze si všimnout, že experimentální žebrování v dolní části desky nebrání vzniklým kmitnám v kmitání a je vidět, jak žebrování obkresluje uzly dvou kmiten s největší rezonancí. Rezonance horní desky s experimentálním žebrováním byla posílena na celé desce. Horní část desky by zde šla ještě lehce upravit, tak aby nebránila vzniklým kmitnám. Devátý mód je možné vidět na obr. (6.47), zde je možné sledovat podobné rozdíly jako v předchozím případě. Zdá se, že deska s žebrováním má menší rezonanci v oblasti u rezonančního otvoru. To je zapříčiněno škálováním hodnot.

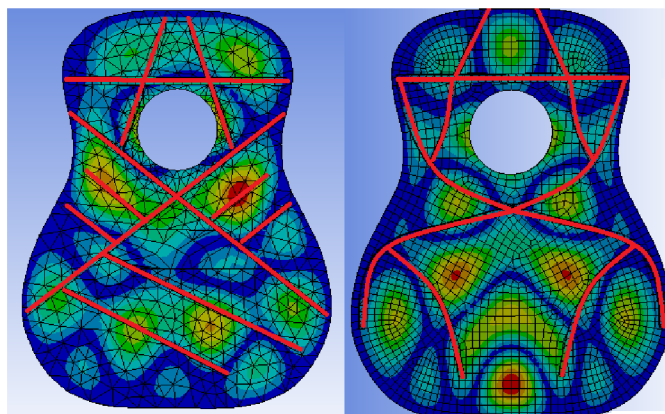
Při pozorování rezonančních módů, které byly vytvořeny superpozicí do frekvence 1 kHz. Si lze všimnout rozdílného obrazu rezonance. U experimentálního žebrování je názorně předvedeno, že pozice žebrování je umístěná téměř přesně v místě vytvořených uzlů. Rezonance na experimentálním žebrování je ve většině oblastech posílená, avšak není, tak slité do větší rezonanční plochy, zdá se být diskreditované. Vzniklé módy mají větší rezonanci především ve spodní části desky, než při použití běžného žebrování, viz obr. (6.48).



Obr. 6.46: 7. mód při běžném a experimentálním žebrování



Obr. 6.47: 9. mód při běžném a experimentálním žebrování



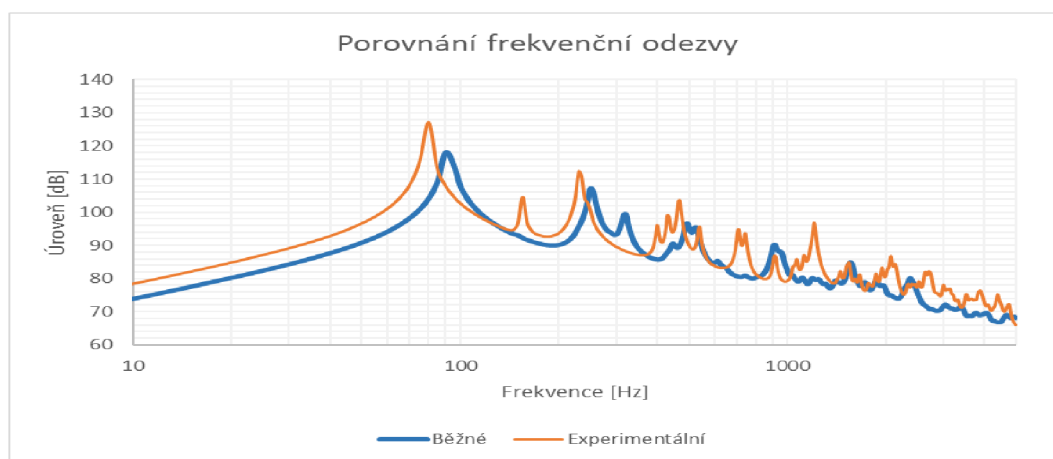
Běžné

Experimentální

Obr. 6.48: Módy do 1 kHz při běžném a experimentální žebrování

Na obr. (6.49) je možné vidět frekvenční odezvu horní desky při použití běžného a experimentálního žebrování. Experimentální žebrování je posunuté více do nižších kmitočtů, protože je lehčí. Rezonanční módy jsou v celém rozsahu výkonnější a především se zde objevují nové módy, které jsou u běžného žebrování potlačeny. Výsledná barva zvuku by měla být barevnější a ostřejší. Právě díky tomu, že žebrování v menší míře křížuje vytvořené kmitny ale soustředí se umístěním do jejich uzlů.

Z dalšího pozorování módů, které zde nebyly ukázány, že experimentální žebrování nekříží cestu žádné kmitně až do 26. rezonančního módu. Bylo by vhodné toto žebrování ještě lehce vymodelovat a reálně jej vyrobit a podrobit dalším již skutečným analýzám.



Obr. 6.49: Porovnání frekvenční odezvy při běžném a experimentálním žebroví

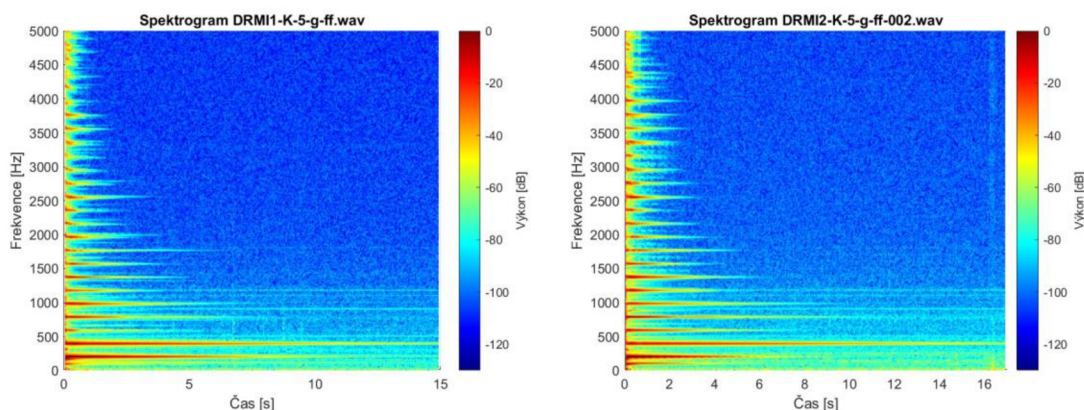
7. VYHODNOCENÍ INOVACE ŽEBROVÁNÍ

Kapitola se bude zabývat vyhodnocením inovovaného žebrování na horních deskách a kompletních kytarách, které firma FurchGuitar's vyrobila na základě měření a simulace, jež proběhla v semestrální práci. Firma vyrobila dvě kytary ke každé inovaci, tudíž čtyři kompletní kusy, tím je možné komparovat jednu inovaci na dvou kytarách a právě tak zajistit, aby například kladný nebo záporný výsledek nebyl ovlivněn vlastnostmi dřeva použitého při výrobě. Hodnoceno bude spektrum, frekvenční charakteristika a doba dozvuku. Po samotném vyhodnocení budou kytary s inovovaným žebrováním porovnány s kytarou před inovací a s konkurenčními kytarami.

7.1 Spektrální analýza inovovaných kytar

V této části budou popsána spektra, každé ze dvou inovací, tedy inovací označovanou dreadnought inovace1, která byla vytvořena po samotné hře na nástroj a tlumením různých částí horní desky a dále inovací dreadnought inovace2, která vznikla pozorováním rezonančních módů v programu ANSYS.

Nejprve budou jednotlivě popsána spektra dreadnought inovace 1 a dreadnought inovace 2, následně budou porovnány čtyři dynamiky (*ff*, *mf*, *p* a *ppp*) a dva různé tónů ve stejné dynamice vzájemně.



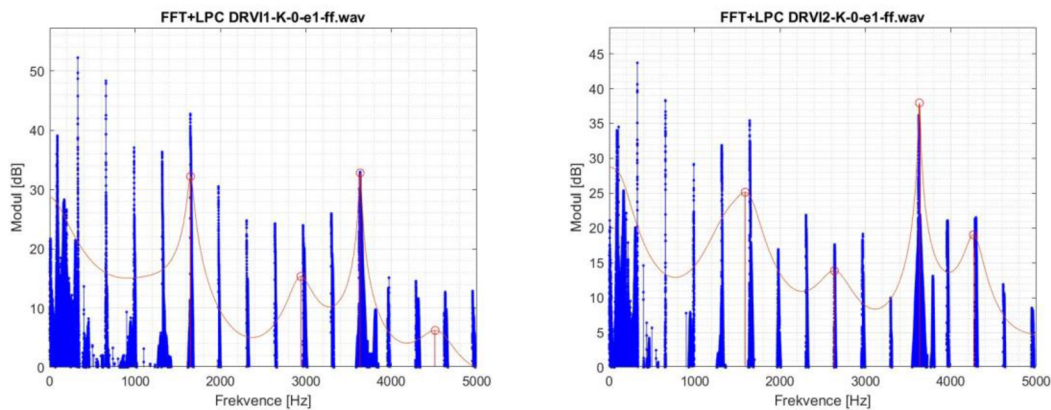
Obr. 7.1: Porovnání DRM11 a DRM12

Porovnání dvou stejných kytardreadnought inovace1hrající tón g v páté poloze při dynamice *ff* je na obr. (7.1), na kterém jsou dva spektrogramy pro DRM11 a DRM12. Spektra si jsou velice podobná, ve spektru si lze všimnout, že obě kytary generují velmi stejné spektrum, které lehce liší na vyšších frekvencích a dreadnought inovace11 generuje slaběji 3. harmonickou složkou.

Obě kytary mají dlouhou dobu dozívání, která dosahuje až 16 s, od 500 Hz do 2 kHz potom harmonické složky vydrží až do 5 s a zbytek spektra trvá přibližně 2 s. U DRM12 se zdá, že její spektrum je v čase i intenzitě výkonnější, to mohl způsobit hráč, který nedodržel dynamiku, a částečně lepší vlastnosti dřeva.

Obr. (7.2) zobrazuje pro obměnuFFT spektra společně s LPC dvou inovovaných kytar dreadnought inovace2, které hrají tón e¹ na prázdné struně v dynamice *ff*. Lze vidět, že spektrum těchto dvou stejných kytar si je velice podobné, generuje stejné

harmonické složky, některé ze složek jsou v jiném výkonovém poměru, tuto skutečnost lze opět připisat buďto samotnému hráči, nebo přímo vlastnostem materiálu. Formantové oblasti jsou tedy díky tomu rozdílné, ale jsou přibližně na stejné pozici.

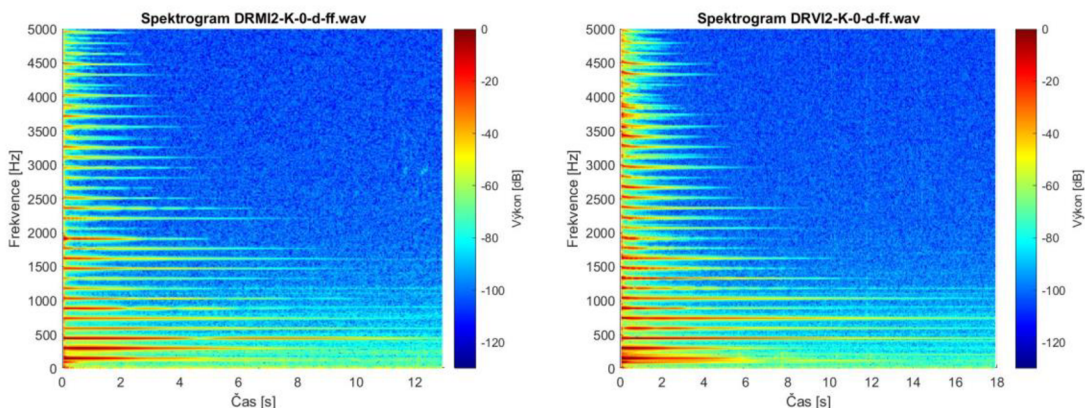


Obr. 7.2 Porovnání spektra kytar DRVI

Ani u dreadnought inovace 1 a ani u dreadnought inovace 2 není spektrum úplně totožné, prohledány byly všechny vzorky, a proto usuzují, že za tyto odlišnosti může především materiál, který nebude mít nikdy přesně stejné vlastnosti, ale budou si sobě velice blízké. Všechny čtyři kytary mají velice bohaté spektrum, které má i vysoký výkon (jak v čase, tak i v intenzitě).

Komparace inovací dreadnought inovace 1 a dreadnought inovace 2 je znázorněná na obr. (7.3), obě kytary hrají tón d na prázdné struně v dynamice *ff*. Na první pohled je možné vidět, že kytara dreadnought inovace 2 má velkou dobu trvání všech vygenerovaných harmonických složek, a to až o 6 s déle než dreadnought inovace 1, její spektrum je rovněž barevnější.

Při bližším prozkoumání si lze všimnout větší podpory rezonance horní desky, kterou dreadnought inovace 1 téměř postrádá. Dále lze zpozorovat, že harmonické složky u kytary dreadnought inovace 2 mají větší výkon, především pak na vyšších harmonických složkách. Dreadnought inovace 1 je barevně chudší, například v oblasti od 500 Hz do 1,5 kHz jsou harmonické složky výrazně slabší než u kytary dreadnought inovace 2. Obdoba všech těchto vlastností byla pozorována i na dalších vzorcích.



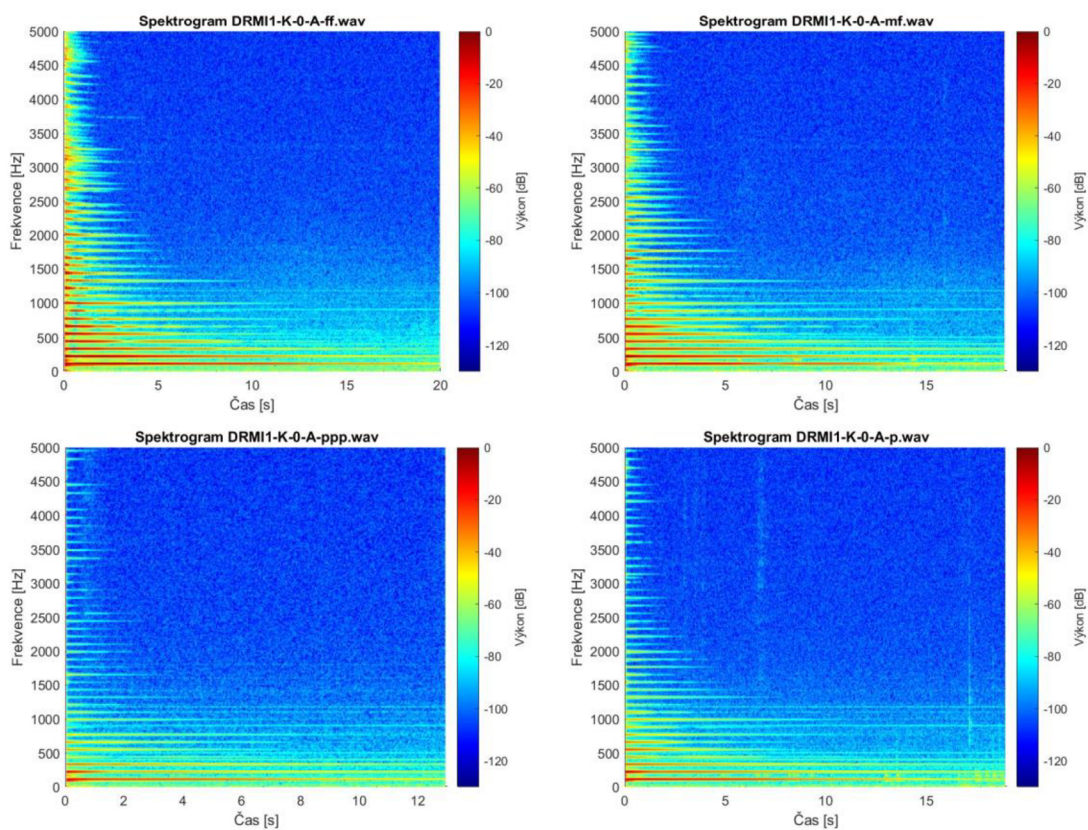
Obr. 7.3: Porovnání spektra DRMI a DRVI kytar

7.1.1 Spektrální analýza dreadnought inovace 1

Tato část se zaměří na porovnání, jak kytara dreadnought inovace 1 generuje své harmonické složky v odlišných dynamikách, a zhodnotí dva od sebe výškou vzdálené tóny ve stejné dynamice.

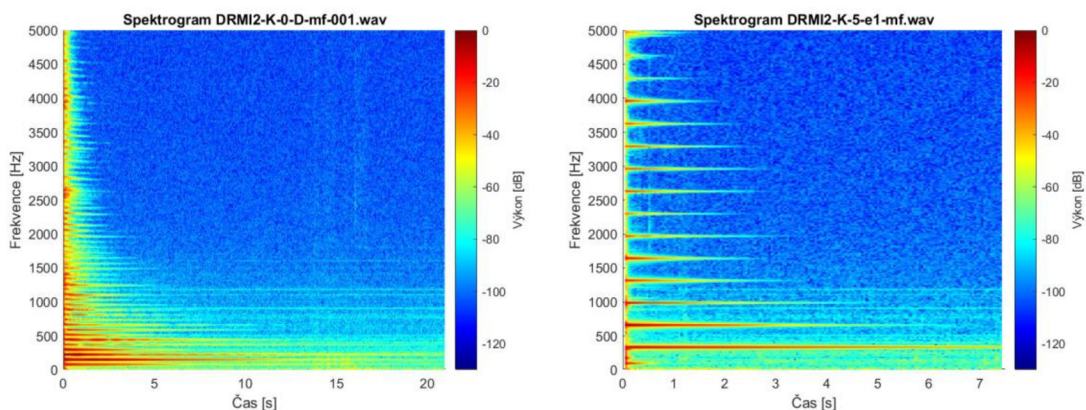
Obr. (7.4) znázorňuje srovnání tónu A na prázdné struně v různých dynamikách. Je možné sledovat, že čím je dynamika slabší, tím klesá výkon harmonických složek v čase napříč celým spektrem. Do frekvence 1 kHz si je doba trvání harmonických složek u všech dynamik blízka a klesá přibližně o 2 s na dynamiku, dále se liší svojí intenzitou.

Dynamický rozsah určuje, jaké je generování harmonických složek. V ideálním případě by doba trvání nebyla pozměněna, taktéž pozice vyšších harmonických složek by nebyly pozměněny, ale pokles intenzity vyšších harmonických složek by byl žádoucí.



Obr. 7.4: Porovnání dynamiky kytary DRM1

Na obr. (7.5) je možné vidět dva odlišné tóny, a to tóny D a e^1 , které jsou hrány na stejné kytáře při stejné dynamice *mf*. Vyšší z tónů má kratší výkon v čase a má výrazně chudší spektrum, to je způsobeno výškou tónu, spektrum se tedy zdá být více diskrétní. Přibližně od 2 kHz se doba trvání shoduje u obou tónů. Obě spektra jsou bohatá, barevná a silná.

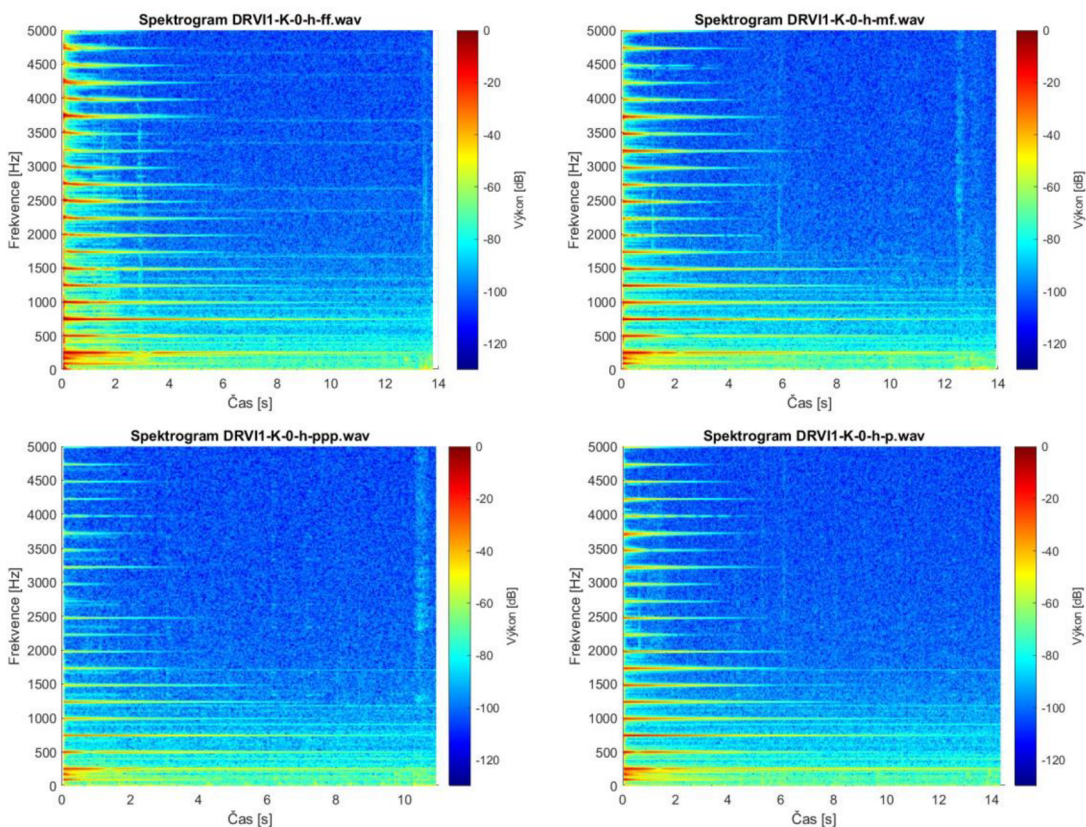


Obr. 7.5: Porovnání vzdálených tónů na kytáře DRMI

7.1.2 Spektrální analýza dreadnought inovace2

Podkapitola se bude zabývat stejnou analýzou jako podkapitola 7.1.1, avšak pro kytaru s inovací dreadnought inovace 2. Téměř všechny spektra vzorků hrající tón h na prázdném struně, která jsou na obr. (7.6) mají dobu trvání fundamentu 14 s, kromě vzorku v dynamice *ppp*, který má dobu trvání 10 s.

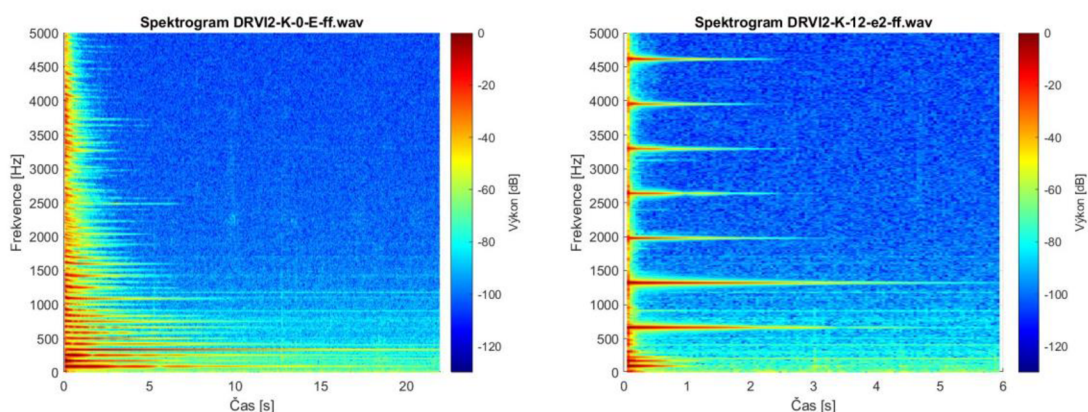
S klesající dynamikou klesá intenzitní výkon vyšších harmonických složek a také se krátí jejich doba trvání přibližně o 0,5 s. Lze si všimnout, že první rezonanční mód na horní desce hraje v každé dynamice 4 s. Spektrum těchto vzorků dokládá, že kytara dreadnought inovace 2 má vysoký dynamický rozsah. Dreadnought inovace 2 si počíná v tomto ohledu lépe než dreadnought inovace 1.



Obr. 7.6: Porovnání dynamiky kytary DRVI

Na obr. (7.7) jsou zobrazeny spektrogramy tónů E a e^2 hraných v dynamice ff . Barevnější je jednoznačně tón E, a to hned z několika důvodů, například se jedná o nízký tón, tudíž mu jsou umožněny vyšší násobky harmonických složek, a také je tento tón hrán na motané struně, která má šestihrané jádro (oproti tónu e^2 , který je hrán na nemotanou strunu).

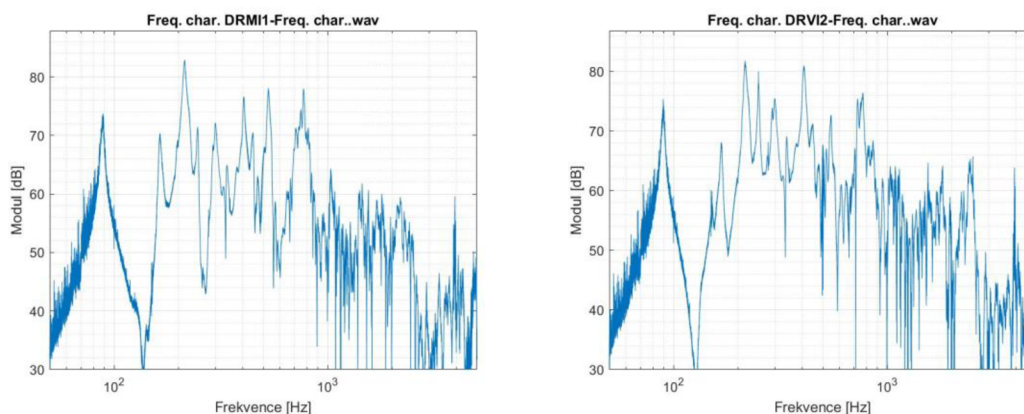
Tón e^2 má ale také plné spektrum, do 5 kHz generuje všech 7 harmonických složek, které jsou v téměř dokonalém poměru. Výkon v čase je delší u tónu E z důvodu podpory rezonančního módu horní desky a impedance kobyly, tón e^2 už je příliš vysoko, aby byl podpořen, a zároveň je mimo rezonanční kmitočet kobyly, který má vrchol na 200 Hz, lze však sledovat rezonanci kobyly, krku a těla na kmitočtech okolo 90 Hz.



Obr. 7.7: Porovnání vzdálených tónů na kytáře DRVI

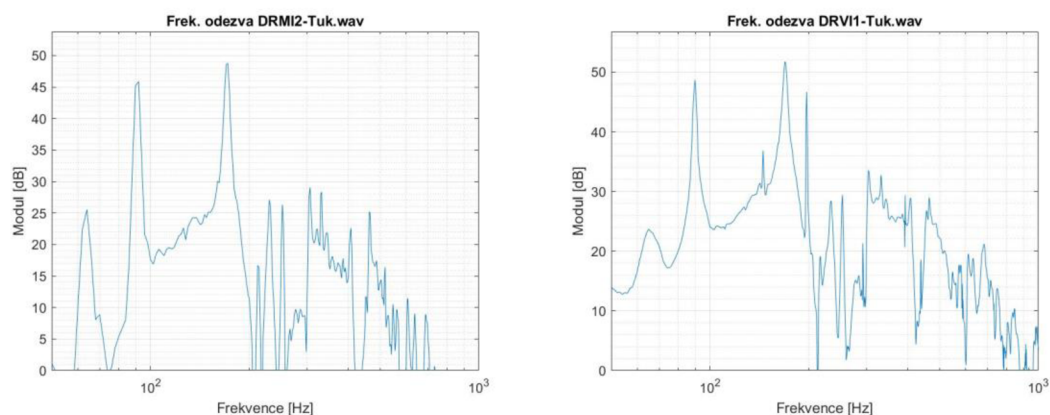
7.2 Frekvenční analýza inovovaných kytar

V části bude porovnána frekvenční charakteristika a odezva inovovaných kytar dreadnought inovace 1 a dreadnought inovace 2. Jinými slovy, bude zde nastíněn obraz horní desky či celého korpusu akustické kytary (viz kapitola 6.2). Při srovnání, které je znázorněné na obr. (7.8), si lze všimnout, že kytara s inovací dreadnought inovace 2 je silnější na vyšších kmitočtech, přičemž se zdá být daleko „rovnější“ než na kytáře dreadnought inovace 1, která má četné propady a strádá na vyšších kmitočtech. Plnější barvu má frekvenční charakteristika kytary dreadnought inovace 2, avšak většina rezonančních špiček je na stejných kmitočtech, liší se pouze mírou intenzity.



Obr. 7.8: Porovnání Frekvenční charakteristika kytar DRMI a DRVI

Frekvenční odezva při tuku do horní desky 10 cm od kobylky je zobrazena na obr. (7.9), a tudíž je zde viděn pouze částečný obraz frekvenční charakteristiky. Frekvenční odezva kytary dreadnought inovace 2 je bohatší na vygenerované rezonanční oblasti, směrem k vyšším kmitočtům jsou dále intenzivnější než u kytary dreadnought inovace 1, obraz mají přesto velice podobný. Dreadnought inovace 2 doplňuje svůj obraz o rezonanční mód na 130 Hz, 200 Hz atd.

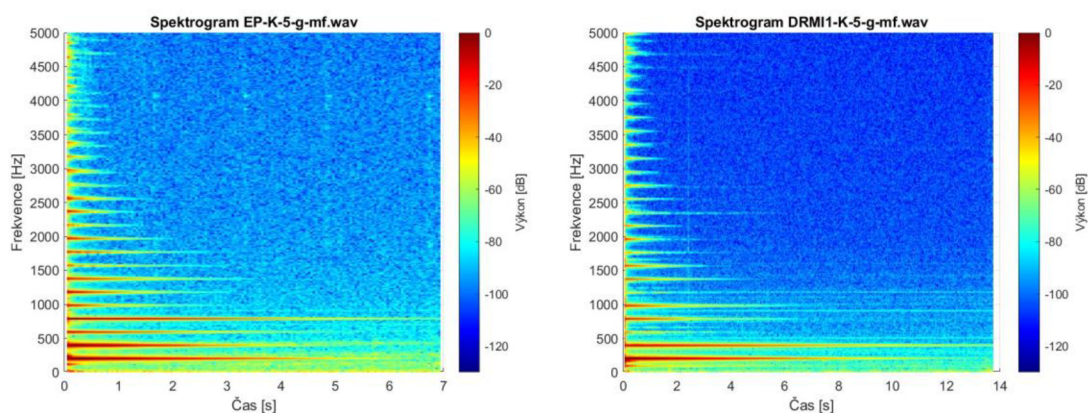


Obr. 7.9: Porovnání Frekvenční odezvy kytar DRMI a DRVI

7.3 Porovnání inovovaných kytar s konkurenčními kytarami

Pro srovnání byly vybrány kytary Epiphone dreadnought a Epiphone dreadnought 2 z důvodu dlouhé doby trvání zvuku a jejich barevnosti. Každá z konkurenčních kytar bude pro úsporu komparována pouze s jednou inovovanou kytarou a naopak.

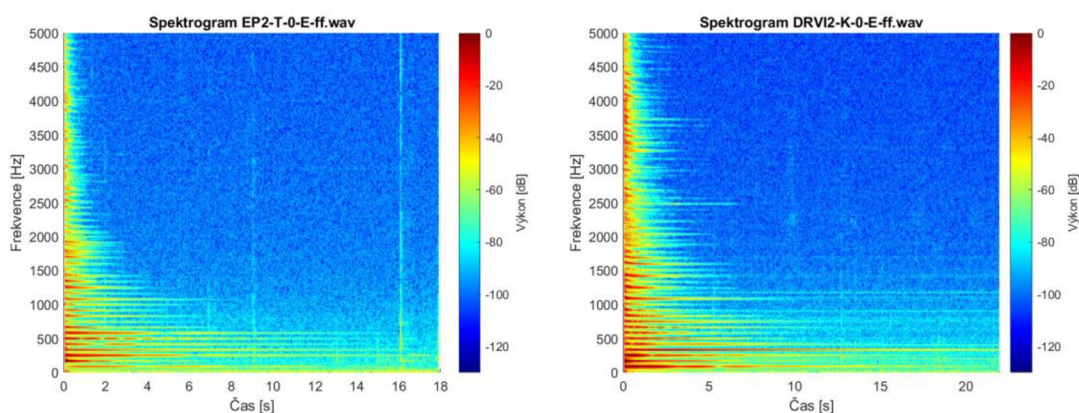
Na první pohled je možné vidět dvojnásobnou dobu trvání u inovované kytary dreadnought inovace 1 – viz obr. (7.10), kde hrají kytary tón g v páté pozici pražce v dynamice *mf*. Dreadnought inovace 1 oproti Epiphone dreadnought generuje 3. a 6. harmonickou složku s menší intenzitou. Do frekvence 1 kHz mají obě kytary stejný výkon v čase, a to 7 s. Po tomto kmitočtu má o 1,5 s delší generování kytara dreadnought inovace 1. Do barvitosti spektra jsou na tom dreadnought inovace 1 a Epiphone dreadnought velice podobné, skoro totožné až na výše zmíněné harmonické složky.



Obr. 7.10: Porovnání spektra kytar EP a DRMI

Dále budou porovnány kytary Epiphone dreadnought 2 a dreadnought inovace 2, které hrají tón E na prázdné struně v dynamice *ff*, kytara Epiphone dreadnought 2 proto, že měla velice barevné spektrum. Toto porovnání je vyobrazené na obr. (7.11). Při pozorování spekter je zřetelně vidět, že kytara dreadnought inovace 2 je oproti Epiphone dreadnought 2 daleko barevnější, Epiphone dreadnought 2 generuje první dvě harmonické složky s malou intenzitou. Co se do doby trvání jsou na tom obě kytary stejně, dreadnought inovace2 drží zvuk o něco déle.

Na vyšších frekvencích je ale znatelný rozdíl, od 1 kHz do 2,5 kHz drží dreadnought inovace 2 celkem 6 s, zatímco Epiphone dreadnought 2 jen 3 s. U dreadnought inovace2 drží dále vyšší harmonické složky do 2,5 s a u Epiphone dreadnought2 tak do 1,5 s. Porovnání v této podkapitole poukázalo na fakt, že obě inovované kytary předčily konkurenční kytary, což se o kytarě Furch dreadnought před inovací říct nedalo. Srovnání s původní kytarou bude následovat v další kapitole.



Obr. 7.11: Porovnání spektra kytary EP2 a DRVI

7.4 Porovnání kytar před a po inovaci

V této závěrečné části budou komparovány kytary od firmy Furch Guitar's před jejich inovováním a po něm. V předchozích kapitolách této diplomové práce je popsáno, jaké změny byly na žebrování aplikovány a jakými metodami byly dané inovace zjišťovány, resp. měřeny. Komparaci spekter kytar Furch dreadnought, Furch orchestral model, dreadnought inovace1 a dreadnought inovace2, které hrají tón A na prázdné struně v dynamice *mf* je na obr. (7.12).

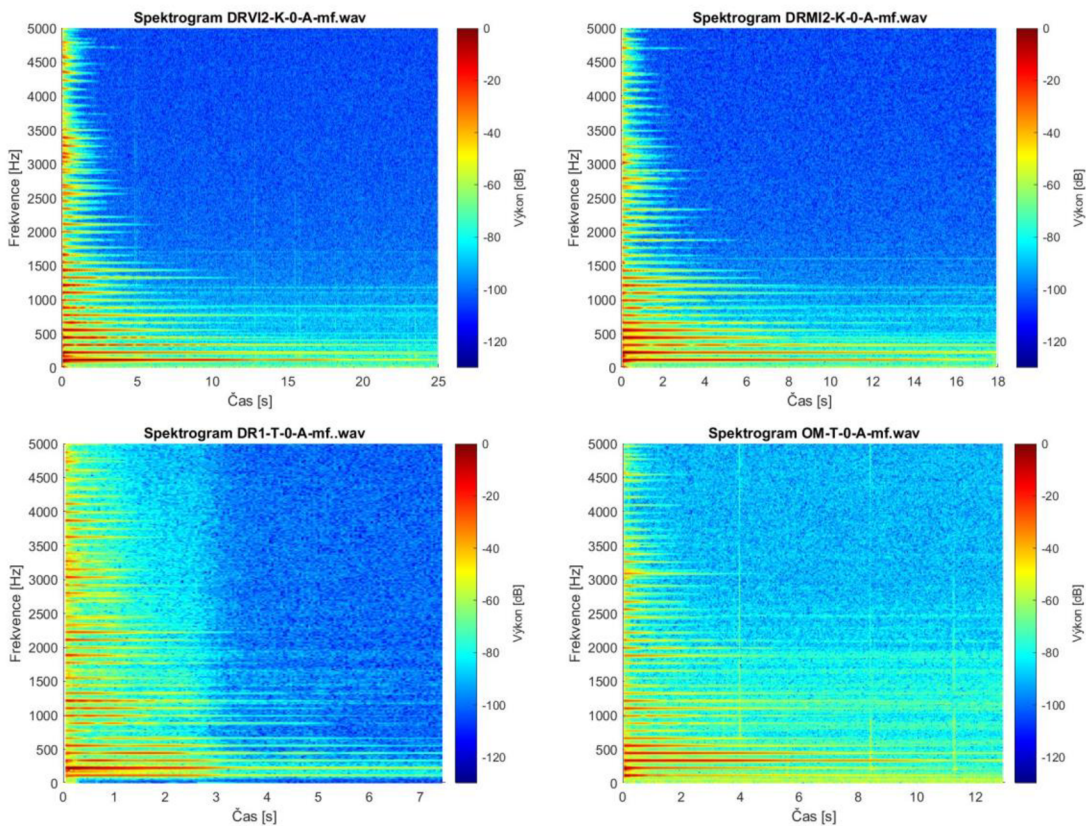
Nejprve budou jednotlivě popsány změny inovace dreadnought inovace1 s Furch dreadnought a Furch orchestral model. Ze spektrogramů dreadnought inovace 1 a Furch orchestral model lze vypočítat, že dreadnought inovace 1 má delší dobu generování vyšších harmonických složek a fundamentu přibližně o 6 s. Další pozorovatelnou změnou je, že Furch orchestral model generuje slabě, jak ve výkonu v čase, tak intenzitně fundament s 2. harmonickou složkou, díky tomu hraje kytara kratší dobu (fundament zajišťuje nosnost zvuku) a zároveň bude postrádat mohutnost, tu zajišťuje právě 2. harmonická složka.

Barvu mají obě kytary plnou, o něco plnější barvu má kytara s inovací dreadnought inovace 1. Doba trvání tónů mezi kytarou Furch dreadnought a dreadnought inovace 1 je trojnásobně menší ku prospěchu kytary dreadnought inovace 1. Obě z kytar generují zhruba stejné harmonické složky, ty trvají u Furch dreadnought od 1,5 kHz do 1,5 s a u kytary dreadnought inovace 1 do 3 s, to je tedy dvojnásobné posílení vyšších

harmonických složek. Na základě porovnání inovované kytary s kytarami Furch dreadnought a Furch orchestral model je možné tvrdit, že inovace žebrování byla správná a přinesla především změny v podobě delší doby trvání (znění) harmonických složek tónu.

Nyní bude srovnána inovovaná kytara dreadnought inovace 2 nejprve s kytarou Furch orchestral model a následně s kytarou, která byla určena k inovaci Furch dreadnought. Doba trvání tónu u dreadnought inovace 2 dosahuje 25 s, u kytary Furch orchestral model trvá tón 12 s, tudíž je zde zřejmý dvojnásobný rozdíl. Barevnější kytarou je z pohledu generování harmonických složek kytara dreadnought inovace 2, která má bohaté spektrum a která má oproti Furch orchestral model silný fundament, Furch orchestral model dále slabě generuje 2. harmonickou složku.

Posledním porovnáním bude porovnání spektra inovované kytary dreadnought inovace 2 a Furch dreadnought kytary, která byla určená k inovaci. Z porovnání vychází, že kytara dreadnought inovace 2 má skoro čtyřnásobně delší dobu trvání hraného tónu, a to v celém rozsahu, tedy i na vyšších harmonických složkách. Dreadnought inovace 2 generuje větší počet harmonických složek, čímž má barevnější tón a plnější spektrum. Furch dreadnought má celkově slabší intenzitní výkon harmonických složek. Tónový charakter dreadnought inovace 2 se však od Furch dreadnought změnil, při inovaci dreadnought inovace 1 byl tento charakter zachován. I přes tuto skutečnost hodnotím inovaci dreadnought inovace 2 jako správnou, její spektrum je ze všech kytar měřených v této diplomové práci nejvýkonnější, co do času, tak intenzitně, zároveň kytarou s nejbarevnějším spektrem. Pozorované změny byly sledovány i na dalších vzorcích tónu v různých dynamikách.

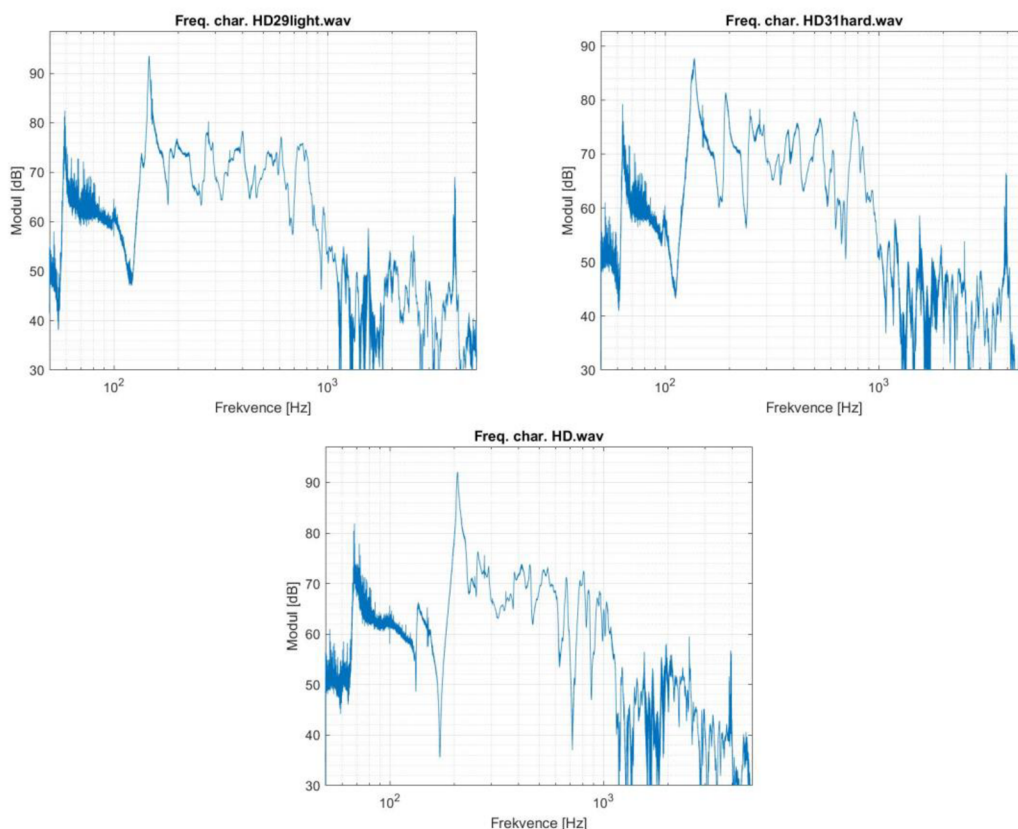


Obr. 7.12: Porovnání kytar před a po inovaci

Měřena byla také frekvenční charakteristika horních desek před osazením na tělo kytary. Tu je možné vidět na obr. (7.13), grafy mají jiný popis, proto je stručně vysvětlím. Pojmenování HD přísluší horní desce Furch dreadnought před inovací, pojmenování „light“ je pro kytary s menší inovací dreadnought inovace 1 a „hard“ pro kytaru dreadnought inovace 2 s větší úpravou, číslo u tohoto názvu je výrobním číslem. Aby nedocházelo k nesrovnalostem bude horní desky jmenovat názvem v grafech.

Porovnáme-li horní desku HD s HD29 light, všimneme si nově vytvořeného rezonančního módu na 150 Hz tento mód také přibyl i u desky HD31hard. Dále byla frekvenční charakteristika HD29 light výkonově posílena na vyšších frekvencích oproti HD. Daleko výraznějšího posílení je možné si všimnout u horní desky HD31 hard, ta předčila i posílení na desce HD29 light.

Celkový obraz rezonančních módů je si podobný až na nově posílený mód na 150 Hz. Na základě frekvenční charakteristiky lze tvrdit, že obě inovace vedou ke správnému výsledku.



Obr. 7.13: Porovnání frekvenční char. horních desek před a po inovaci

7.5 Doplnující měření

Chladního obraze mohou odhalit slabiny horní desky s žebrováním, tedy místa, kde nedochází k rezonanci. Také je možné zjistit rezonanční módy horní a spodní desky, jejich velikost a rychlost.

Pozorováním Chladního obrazů je možné analyzovat kytary a velkou přesností vybrat kytaru s lepší rezonancí. Na obr. (7.14) lze vidět vzniklý 3. rezonanční mód na kytare dreadnought inovace 1 a na kytare dreadnought inovace 2.



Kytara DRMI 3. mód

Kytara DRVI 3. mód

Obr. 7.14: Porovnání 3. módu na inovovaných kytarách

Obě kytary generují tento mód s rozdílnými rozměry. Kytara dreadnought inovace 1 má slabou rezonanci v horní části desky, spodní část desky rezonuje celá. U Kytara dreadnought inovace 2 rezonuje téměř celá deska, jak v horní, tak i ve spodní části desky, horní část desky rezonuje ztlačně silněji než u kytary dreadnought inovace 1. Totožné rozdíly byly sledovány u všech 6 měřených módů, přesněji kytary dreadnought inovace 2 měla vždy větší rozměry vygenerovaného rezonančního módu a zároveň i větší plochu rezonance, tato kytara měla méně tzv. „hluchých míst“.

Dalším měřením bylo měření rychlosti v rámci rezonančních módů, to je možné vidět v tab. (7.1), kde x je směr k hlavě kytary rovnoběžný se strunami a y je směr kolmý ke směru x . Teoreticky by měl první rezonanční mód odpovídat rychlostem v materiálu v daném směru, ale kvůli žebrování a přepětí strun, tedy celému mechanickému obvodu, nedochází k uplatnění celého potenciálu.

Změřením rychlosti je možné zjistit, jak moc byl tento potenciál využit (větší rychlost = širší rezonanční mód, v rámci jednoho rezonančního módu), a lze tak porovnávat kytary mezi sebou. Z tabulky je možné vyčíst, že kytara dreadnought inovace 1 má menší rychlosti v rámci rezonančních módů v celém rozsahu oproti kytara dreadnought s inovací 2, díky tomu budou i vytvořené rezonanční módy širší – viz obr. (7.14). Pro správné porovnání je třeba znát i frekvenci rezonančních módů.

Tab. 7.1: Tabulka rychlostí v rámci rezonančních módů

Typ	Epiphone			Dreadnought inov.1			Dreadnought inov.2		
	Frek. [Hz]	Rychlost [m.s ⁻¹]		Frek. [Hz]	Rychlost [m.s ⁻¹]		Frek. [Hz]	Rychlost [m.s ⁻¹]	
Mód		y	x		y	x		y	x
1	115	40	44	90	37	25	90	37	36
2	225	74	74	175	49	56	175	53	58
3	285	80	71	210	42	32	210	50	42
4	390	125	86	250	63	50	250	83	83
5		-	-	300	99	75	290	107	148
6		-	-	400	92	72	400	120	132

ZÁVĚR

V bakalářské práci byla provedena spektrální analýza a frekvenční analýza konkurenčních kytar Epiphone dreadnought a dalších (celkem čtyř), jejichž výsledky byly dále srovnávány se spektrem kytar Furch dreadnought a Furch orchestral model. Komparací bylo zjištěno, že konkurenční kytara Epiphone dreadnought má hojnou základnu vyšších harmonických složek ve spektru. Přesto mají kytary značky Furch bohatší spektrum. Epiphone dreadnought generuje vyšší harmonické složky téměř o 2 s déle než kytara dreadnought. Nejlépe ze všech kytar dopadla kytara Furch orchestral model, která má nejhojnější spektrum, také v časové oblasti má největší výkon generování, a to o 1,5 s delší než konkurenční kytara Epiphone, přesněji na kmitočtech od 1 kHz. Pomocí prohlédnutí spektra, LPC analýzy a dalších poznatků byly objeveny rezonanční oblasti krku, těla, horní desky a rezonančního otvoru. Tyto oblasti budou vytvářet formantovou oblast. Furch orchestral model a konkurenční kytary mají tyto oblasti na velmi blízkých kmitočtech a jejich horní desky jsou laděné na tón A (110 Hz). Kytara Furch dreadnought má horní desku laděnou na tón Fis–G (94 Hz).

V diplomové práci byl také mnou vytvořeny modely horních desek s žebrováním, bez žebrování a celých korpusů kytar Furch dreadnought a Furchorchestral model bez použití šablony. Model byl vytvořen z odměřených rozměrů horní desky, žebrování a všech dalších částí akustické kytary. Samotný model korpusu akustické kytary se skládá přibližně ze 707 konstrukčních bodů, řádně okótovaných. Byly zjištěny rezonanční módy horní desky pro různou tloušťku, různý druh dřeviny, tvar, typ kytary a při různých poměrech rychlosti šíření zvuku v materiálu, toto měření pomohlo nalézt ideální vlastnosti použitého materiálu. Horní deska a celý korpus byly také podrobeny výpočtu frekvenční odezvy, kde se zkoumal vliv hustoty dřeva a tloušťky horní desky na pozici rezonančních oblastí.

Frekvenční odezva celého korpusu akustické kytary byla porovnána se skutečnou frekvenční charakteristikou, kde bylo dosaženo shody. Při teoretických výpočtech bude mít menší hustota dřeva silnější úroveň výkonu rezonančních oblastí. V praxi ale záleží na více faktorech. Jedním z takových faktorů je faktor toho, jak dřevo naroste (vzdálenost let od sebe, a jejich deformace) tyto parametry budou vytvářet nelinearity. Tloušťka horní desky při stejných materiálních vlastnostech bude ovlivňovat výkon a bude ladit horní desku na určitý kmitočet. Čím bude horní deska tenčí, tím bude mít větší výkon a nižší ladění a naopak. Tvar horní desky zdali je rovný nebo ke stranám zbroušený má vliv především takový, že zbroušením dojde ke zlehčení desky, které následně posílí výkon a v závislosti na síle zbroušení, větším zbroušením budou posíleny nižší kmitočty a naopak.

Poměr rychlosti šíření zvuku mezi směrem rovnoběžným s vlákny a mezi směrem kolmým na vlákna prozradil vhodný poměr, ten by měl být 3 : 1, k tomu je vhodné napsat důležitou připomínku zjištěný poměr se bude měnit při rozdílných rozměrech horní desky.

Žebrování bylo inovované na základě dvou skutečností. V prvním případě se vycházelo ze samotné hry na nástroj a tlumení různých částí na těle kytary označené jako dreadnought inovace 1 (se zkratkou DRMI). Prozkoumáváním rezonančních módů a jejich obrazců byla nalezena žebra, která narušují vzniklé kmitny. Jedná se o druhý příklad, ze kterého bylo vycházeno pro inovaci žebrování, a jeho název je dreadnought inovace 2 (DRVI). První případ přinesl zvětšení výkonu horní desky a umožnil desce

více kmitat. Tato inovace zasáhla do původního žebrování minimálním způsobem. V druhém případě se opět zvýšil výkon horní desky, a to více než v prvním případě. Plocha možnosti kmitat se v horní desce navýšila. Byly vytvořeny nové rezonanční oblasti, zároveň byla jedna oblast utlumena.

V semestrální práci nevytvářela simulace v programu ANSYS větší změny ve frekvenční oblasti, při odebrání různých žeber. Při zobrazení rezonančních módů však změny nastávaly. V diplomové práci bylo zjištěno, že se jednalo o chybu v přednastaveném útlumu materiálu a malém rozsahu výpočtu. Útlum nezmění pozice rezonančních módů, pouze výslednou křivku uhladí. Rozsah výpočtu je vhodné mít nastaven na co krok to 1 Hz. Frekvenční odezvu tedy bylo možné dále hodnotit.

Ze všech zjištěných dat v semestrální práci byly firmou Furch Guitar's vyrobeny čtyři inovované akustické kytary. Ty byly v rámci diplomové práce akusticky a mechanicky zkoumány a komparovány s kytarou Furch dreadnought, jež byla určena k inovaci, s kytarou, které se měla inovace přiblížit, s konkurenční kytarou, jež byla vyhodnocena jako nejkvalitnější, a nakonec byly obě inovace porovnány mezi sebou. Ze spektrální i frekvenční analýzy bylo zjištěno, že obě inovace vedly ke správnému výsledku, a dokonce předčily kytaru, ke které se měla inovace přiblížit, a také vybranou konkurenční kytaru. Posílen byl výkon generování harmonických složek v čase, počtu vygenerovaných složek a jejich intenzitním výkonu.

Kytara dreadnought inovace 1 nesla všechny tyto vlastnosti a byla zachována barva kytar firmy Furch Guitar's. Druhá inovace od této barvy odstoupila a do spektra přidala další příměsi. Tato skutečnost byla předpokládána na základě výsledků v semestrální práci. Výkon v čase byl u obou inovací navýšen o téměř dvojnásobek v celém rozsahu do 5 kHz a byla podpořené generování harmonických složek na vyšších kmitočtech. Frekvenční analýza dále ukázala, že výkon na středních frekvencích vzrostl u kytary s inovací dreadnought inovace 2 oproti inovaci dreadnought inovace 1. Výrobce kytar též zhodnotil inovace jako správné po vlastním prozkoumání.

DOPORUČENÍ

S ohledem na koronavirovou krizi bylo obtížné zajistit možnost měření analýz v bezdrazové komoře za použití měřicích přístrojů. Důvodů bylo hned několik. Nebylo tedy možné stanovit si konkrétní termín, a proto byla všechna měření provedena v improvizovaném prostředí zkušebny a bylo použito pouze dostupné zařízení. Místo ani přístroje se při měření neměnily z důvodu improvizované místnosti a dostupného zařízení mohlo dojít ke zkreslení naměřených dat ale k jejich porovnání mohlo stále docházet, protože změny by šly stále pozorovat. Doporučoval bych tedy zopakovat některá měření v lepších podmínkách.

Práci by bylo dále možné rozšířit o vytvoření dalších inovací žebrování upravovaná by mohla být tloušťka přilehlé plochy, přímo tvar žebrování, jeho prohlubiny a vrcholy nebo zvolit například exponenciální tvar oproti lineárnímu. Dále je možné vytvořit mapu překrytí všech uzlů a nalézt tzv. „dálnici“, kde se střetává největší počet uzlů. Hmotností žebrování lze dále ladit rezonanční frekvenci horní desky, tedy lehčí žebra vytvoří rezonanci na nižších kmitočtech, zatímco těžší žebrování ji posune do kmitočtů vyšších.

Na základě zjištěných dat v této diplomové práci je možné dále hledat a vyrábět netypický materiál k vytvoření podobných, nebo dokonce lepších akustických a mechanických vlastností materiálu. Například deska z PVC, která je prokládaná látkou, čímž zajistí podobný poměr rychlostí v daných směrech, jako je tomu u dřeva. Důvodem proč, je ubývající materiál, který je vhodný pro výrobu rezonančních desek a samozřejmě s úbytkem vzrůstá cena materiálu.

Dále by se dalo zabývat pozicí, tvarem a velikostí rezonančního otvoru. Změn, které je možné aplikovat, je celá řada, některé ze změn by mohly být ovšem zahrnuty již idealizovanou představou, jak má akustický kytara vypadat a jak má znít. Tato idealizace je dále zásadní pro subjektivní hodnocení, to by mohlo být spíše záporné, kdežto z pohledu objektivního hodnocení by se jednalo o naprosto špičkový nástroj.

LITERATURA

- [1] Obrázek kytary. In: *Guitar.com* [online]. neznámé: neznámé, neznámý [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://guitar.com/news/furch-adds-new-model-to-its-indigo-series/>
- [2] BLÁHA, Vladislav. *Dějiny kytary: s přihlédnutím k literatuře nástroje*. Brno: Janáčkova akademie múzických umění v Brně, 2012. ISBN 978-80-7460-020-3.
- [3] BACON, Tony. *The ultimate Guitar book*. London: Dorling Kindersley, 1991. ISBN 978-03-9458-955-8.
- [4] RITTER, Michael A. *Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance* [online]. 2. USA: Datamotion Publishing, 1990 [cit. 2021-5-20]. ISBN 978-14-1022-191-9. Dostupné z: http://www.dot.state.mn.us/bridge/pdf/insp/USFS-TimberBridgeManual/em7700_8_chapter03.pdf/
- [5] POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vydanie. Bratislava: Príroda, 1997. ISBN 80-07-00960-4.
- [6] ZEJDA, J, J TIPPNER, V SEBERA, E KOŇASOVÁ a V DÁNIEL. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. *Mendelova univerzita v Brně* [online]. neznámé: neznámé, 2007 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/slozky_objekty.pl?slozka=42;zobrazit=554;typ=opora;lang=cz
- [7] SUMMERSCALES, J. Elastic properties. In: *Slideplayer* [online]. neznámé: neznámé, neznámý [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/2401808/>
- [8] BORESI, A. P a R. J SCHMIDT. *Advanced Mechanics of Materials* [online]. 6th Edition. neznámé: Wiley, 2019. ISBN 978-1-119-62876-7. Dostupné také z: sd
- [9] PROCHÁZKA, Jakub. Strunal Schönbach vrací věhlas českým nástrojům. *BusinessInfo.cz* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.businessinfo.cz/clanky/strunal-zije/>
- [10] Jak ovlivňuje druh dřeva zvuk akustické kytary. *Frontman.cz* [online]. 2017 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.frontman.cz/jak-ovlivnuje-druh-dreva-zvuk-akusticke-kytary>
- [11] GEIST, Bohumil. *Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: Muzikus, c2005. ISBN isbn80-86253-31-7.
- [12] HOFFMAN, Pavel. Analýza spektra a směrovosti xylofonu, vibrafonu a zvonkohry [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/118127>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.
- [13] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN isbn978-80-7331-297-8.

- [14] SOMMER, Tomáš. Analýza srovnání spekter flétnových varhanních píšťal. Brno, 2018, 66 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.
- [15] Zvukové vlny a kmity: Přednáška č.1 [online]. neznámé: neznámé [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/page95/files/I_zvukove_vlny.pdf
- [16] SMĚKAL, Z. Analýza signálů a soustav-BASS. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [17] KOKTAVÝ, Pavel. Fyzikální akustika (MPC-FYA). *Přednáška 06-Vlny* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií [cit. 2021-5-20].
- [18] *ANSYS Theory Reference. 001242. Eleventh Edition. SAS IP, Inc.* 1999, Eleventh Edition(001242).
- [19] CHLADNI, E. F. F. *Die Akustik: Scholar SELECT*. Neznáme. neznámé: Wentworth Press, 2018. ISBN 978-034-1357-758-2.
- [20] ACOUSTIC & ELECTRICAL SPECIFICATIONS. *RODE MICROPHONES* [online]. neznámé: neznámé, 2020 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <http://www.rote.com/microphones/m5>
- [21] Datasheet of Speaker. *Greatplainsaudio.com* [online]. neznámý [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: http://greatplainsaudio.com/wp-content/uploads/2016/06/425-8A_lfspkr_spec_sheet.pdf
- [22] SPECIFICATIONS IN DETAIL. *Focusrite* [online]. neznámé: neznámé, 2020 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://focusrite.com/en/usb-audio-interface/scarlett/scarlett-2i2>
- [23] BUCUR, V. Acoustics of Wood. Nancy. France: Institut National de la Recherche Agronomique Centre de Recherches Forestieres, 1995. ISBN 978-0849348013.
- [24] TRÁVNÍČKOVÁ, Hana. Komparace akustických vlastností kytar ze stejné výrobní řady. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125871>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.
- [25] Miláček, S. (2001): Modální analýza mechanických kmitů, Praha, Vydavatelství ČVUT, ISBN: 80-01-02333-8 (brož.)

SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah CD

A OBSAH CD

CD obsahuje:

- Složku Matlab ve složce ./Matlab
 - ~ m.file se skriptem pro zobrazení spektra ve složce ./Program
 - ~ nastříhané zvukové vzorky ve složce ./Vzorky
- Složku DM ve složce ./DM
 - ~ modely kytary Furch orchestral model a Furch dreadnought
- Složku Skladby ve složce ./Skladby
 - ~ Jedna skladba hraná na 3 kytary (konkurenční a Furch dreadnought inovace 1 a 2)
- Elektronickou verzi diplomové práce ve formátu .pdf
- Přiložený textový dokument .txt s informacemi o obsahu