

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ANALÝZA AKUSTICKÝCH ZMĚN REZONANČNÍ SKŘÍNĚ VLIVEM VLHKOSTI A DEFORMACE

THE ANALYSIS OF ACOUSTIC CHANGES OF SOUND BOARD DUE TO HUMIDITY AND DEFORMATION

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Juhaščík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

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

Student: Lukáš Juhaščík

ID: 195772

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Analýza rezonančních skříní u různých typů akustických kytar

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Porovnejte rezonanční módy nejméně tří různých typů akustických kytar s různým vnitřním žebrovím. Detailně popište parametry rezonanční skříně (korpus kytary) v normálním stavu (hmotnost, hustotu dřeva, stavbu, žebroví). Jednu rezonanční skříně pak vystavte destruktivnějšímu mechanickému a tepelnému zatížení a vyhodnoťte akustické změny, které v rezonanční skříně proběhnou vlivem vlhkosti či deformace. Popište detailně klimatické vlivy (teplotu, vlhkost ad.), kterým bude korpus vystaven, i jeho způsob zatížení. Z akustických vlastností u všech měřených kytar se zaměřte na rychlost zvuku ve dřevě, Youngův model pružnosti, útlum, odpor, akustickou konstantu, rezonanční křivky, účinnost přeměny energie dodané excitátorem či oscilátorem v energii rezonanční. Popište modální rozdíly ve všech měřených nástrojích/rezonátorech.

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

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 9.6.2020

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

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá spektrální analýzou kytarového korpusu. Předmětem zkoumání je místo vzniku rezonance v celém systému, jeho frekvence a jeho vliv na výslednou barvu zvuku nástroje

Klíčová slova

kytara, rezonance, frekvenční spektrum, Chladniho obrazce, barva zvuku

Abstract

Bachelor's thesis deals with spectral analysis of guitar body. The aim of the study is the place of resonant modes at whole body, its frequency and the impact to the final sound.

Key words

Guitar, resonantion, frequency spectrum, Chladni pattern, timber of sound

JUHAŠČIK, Lukáš. *Analýza rezonančních skříní u různých typů akustických kytar* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125879>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Analýza rezonančních skříní u různých typů akustických kytar* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Patriku Nopovi za zprostředkování měření na půdě Výzkumného centra Josefa Ressela Brno-Útěchov a panu doc. Ing. Jiřímu Schimelovi, Ph.D. za zprostředkování měření na půdě Vysokého učení technického v Brně.

V Brně dne:

.....

podpis autora

Obsah

Abstrakt.....	3
Úvod	11
1. Akustické vlastnosti dřeva.....	12
1.1. Vznik vlnění.....	12
1.2. Rezonance	12
1.3. Youngův modul pružnosti.....	13
1.4. Rychlost zvuku ve dřevě.....	14
1.5. Akustická konstanta	15
1.6. Logaritmický dekrement útlumu.....	15
1.7. Akustický vlnový odpor.....	16
2. Kytara.....	18
2.1. Historie.....	18
2.2. Tvar korpusu	18
2.3. Materiál	19
2.4. Žebrování	20
2.5. Chladniho obrazce	21
2.6. Helmholtzova rezonance.....	21
3. Popis měření	22
3.1. Měřené nástroje.....	22
Klasická kytara firmy Strunal - „Španělka“	22
Furch Yellow Plus SP - OM	22
Furch Green Dc-SR SPE – Dreadnought.....	22
3.2. Postup vizualizace Chladniho obrazců	23
3.3. Měření rychlosti zvuku	24
3.4. Postup měření rezonanční odezvy akustické skříně.....	24
4. Vyhodnocení měření	26
4.1. Klasická kytara firmy Strunal - „Španělka“	26
4.2. Furch Yellow Plus SP – OM.....	31
4.1. Furch Green Dc-SR SPE – Dreadnought.....	34

5. Závěr.....	37
Literatura.....	38

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Obecná ukázka rezonance kmitajícího systému (2)	13
Obr. 1.2: Tlumené kmitání (3)	16
Obr. 2.1: Základní tvary akustických kytar (4).....	19
Obr. 2.2: Ukázka žebrování typu X (8).....	20
Obr. 3.1: Pracovní nákres žebrování kytar Furch	23
Obr. 3.2: Zjednodušené schéma experimentu Chladniho obrazců	24
Obr. 3.3: Zjednodušené schéma měření modální analýzy	25
Obr. 4.1: Mód (00), 110 Hz	28
Obr. 4.2: Mód (01), 230 Hz	28
Obr. 4.3: Mód (00), 250 Hz	28
Obr. 4.4: Mód (11), 310 Hz	28
Obr. 4.5: Mód (21), 440 Hz	28
Obr. 4.6: Mód (22) 820 Hz	28
Obr. 4.7: Mód (01), 230 Hz	28
Obr. 4.8: Mód (04), 590 Hz	28
Obr. 4.9: Graf 1. módu korpusu	30
Obr. 4.10: Graf frekvenční charakteristiky přední desky	30
Obr. 4.11: Graf frekvenční charakteristiky dolní desky	31
Obr. 4.12: Graf frekvenční charakteristiky přední desky	33
Obr. 4.13: Graf frekvenční charakteristiky dolní desky	33
Obr. 4.14: Graf frekvenční charakteristiky přední desky	35
Obr. 4.15: Graf frekvenční charakteristiky dolní desky	36

Seznam tabulek

Tab. 1.1: Průměrná rychlost zvuku vybraných dřevin (1)	14
Tab. 1.2: Akustické konstanty vybraných dřevin (1).....	15
Tab. 1.3: Akustický vlnový odpor vybraných materiálů (1).....	17
Tab. 4.1: Chladního obrazce zadní desky	26
Tab. 4.2: Chladního obrazce horní desky	27
Tab. 4.3: Seznam vlastních rezonančních frekvencí přední desky	29
Tab. 4.4: Seznam vlastních rezonančních frekvencí zadní desky.....	29
Tab. 4.5: Chladního obrazce přední desky.....	31
Tab. 4.6 Chladního obrazce zadní desky	32
Tab. 4.7: Seznam vlastních rezonančních frekvencí přední desky	32
Tab. 4.8: Seznam vlastních rezonančních frekvencí zadní desky.....	33
Tab. 4.9: Chladního obrazce přední desky.....	34
Tab. 4.10: Chladního obrazce přední desky.....	35

ÚVOD

Bakalářská práce se ve spolupráci s Ústavem nauky o dřevě a dřevařských technologiích na Mendelově univerzitě zabývá akustickými vlastnostmi rezonanční skříně. Konkrétně pak korpusu klasické kytary.

Cílem bakalářské práce je seznámit se s akustickými vlastnostmi dřeva a dřevěných skříní. Konkrétně se seznámit s kytarou, jako hudebním nástrojem se svou bohatou historií a širokou škálou typů architektury. Dále popsat historii, materiál a architekturu kytar a následně provést měření vlastních módů korpusu.

První kapitola se zabývá akustickými vlastnostmi dřeva. Stručně je popsán vznik a šíření vlnění a rezonance. Dále byly popsány akustické vlastnosti dřeva, jako jsou rychlost zvuku ve dřevě, Youngův modul pružnosti, logaritmický dekrement útlumu, akustický odpor a akustická konstanta.

Další kapitola popisuje samotnou kytaru. Zabývá se její historií, rozdělením, materiálem, žebrováním, vlastnostmi a experimentálním pokusem Chladiho obrazců.

Ve třetí kapitole jsou popsány postupy měření využitých pro účely této práce.

Čtvrtá kapitola prezentuje naměřené údaje a dává je do souvislostí s praxí. Naměřeným hodnotám je přiřazeno pojmenování podle hudebního názvosloví pro lepší pochopení v praxi.

1. AKUSTICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA

Dřevo jako materiál má díky svým dobrým akustickým vlastnostem velkou škálu využití. Jedním z nich je právě výroba rezonátorů a těl hudebních nástrojů. Akustické vlastnosti dřeva jsou potom ty vlastnosti, které popisují jeho schopnost vést, utlumit nebo zesílit zvuk. (1) Teoretický úvod se zaměří na tyto parametry popisující rezonanční vlastnosti dřeva: rychlost zvuku ve dřevě, Youngův modul pružnosti, logaritmický dekrement útlumu, akustický vlnový odpor a akustická konstanta.

1.1. Vznik vlnění

Pod pojmem zvuk se rozumí jakékoliv mechanické vlnění hmoty ve všech látkových skupenstvích, které je lidské sluchové ústrojí schopno zaznamenat jako zvukový vjem. Základním předpokladem pro vznik zvuku je existence systému, kde na sebe molekuly prostředí vzájemně působí pružnými vazebními silami. Ve vakuu se tedy zvuk nešíří. Vychýlením soustavy z její rovnovážné polohy vznikají kmity anebo vlnění. Kmitá-li systém jako celek, jedná se o kmity. Jestliže kmitání systému není z důvodu různé pružnosti jednotné, jedná se o vlnění. Lidské ucho je schopno zachytit zvukové vlny o frekvenci 16 až 20000 Hz.

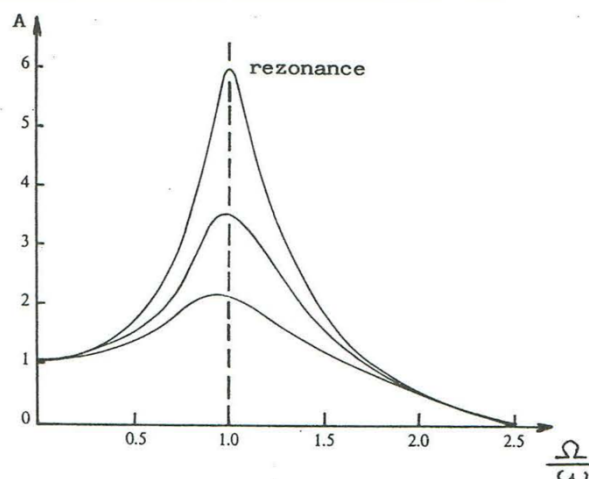
Vzniklá vlna vybuzená kmitem se šíří látkovým prostředím pomocí zhušťování a zředování molekul. Podle směru kmitání molekul vůči směru šíření vlny, rozlišujeme postupné mechanické vlnění na kolmé, podélné a torzní. Zvukovou vlnu popisují tyto základní parametry: frekvence – počet kmitů za sekundu; amplituda – míra vychýlení od rovnovážné polohy; vlnová délka – vzdálenost, kterou urazí vlna za dobu jedné periody; rychlost šíření – dráha, kterou vlna urazí za jednotku času. Rychlost zvukové vlny tedy záleží na frekvenci a vlnové délce podle rovnice

$$c = \lambda \cdot f, \quad (1.1)$$

kde c je rychlost šíření zvuku, λ je vlnová délka, f je frekvence.

1.2. Rezonance

Rezonance dřeva je jeho schopnost zesílit zvuk bez zkreslení. Je-li dřevo vystaveno budícím silám vlnění, systém přejímá toto vlnění jako nucené kmity a dochází k vibracím. Intenzita vibrací dřeva závisí na frekvenci budícího vlnění. Tomuto jevu říkáme rezonance. Dřevo jako hmotný systém má tedy schopnost rozdílné amplitudy rezonance při různé frekvenci. Jen při určitých frekvencích vibrace dřeva vykazují maximální výchylku. Tyto frekvence nazýváme rezonančními nebo vlastními frekvencemi daného systému, jak lze vidět na Obr. 1.1, jinak také označováno jako módy. Vlastní frekvence systému jsou závislé na mnoha faktorech. (1) (2)



Obr. 1.1: Obecná ukázka rezonance kmitajícího systému (2)

1.3. Youngův modul pružnosti

Pružnost je vlastnost materiálu, vrátit se po vychýlení vnějšími silami a následném uvolnění, do svého původního klidového stavu bez jakéhokoliv poškození. Pružnost dřeva tedy znamená, že se při jeho ohýbání, tahu nebo deformaci, jeho tvar navrátí do původního stavu. Z pohledu makrohlediska (posouzení pohým okem) je dřevo považováno za dokonale pružný materiál. Při zkoumání mikrostavby (posouzení vnitřní stavby) dřeva tomu už ale tak není. Při přesném posouzení by už bylo možné najít nenávratné změny v jeho struktuře.

Základními veličinami pro posouzení pružnosti je napětí působící na dřevo a jeho deformace vlivem této síly. Konkrétně potom modul pružnosti, který vyjadřuje vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Podle směru namáhání je rozlišován modul pružnosti E a G . Modul pružnosti E popisuje pružnost při normálovém namáhání (tah, tlak, ohyb) a modul pružnosti G při namáhání tangenciálním (rotace, smyk). Tyto moduly pružnosti se zjišťují experimentálně pomocí zkušebních strojů, které dokážou současně měřit deformaci a působící deformační sílu. (1) Pro modul pružnosti při normálovém zatížení platí vztah:

$$E = \frac{F_u \cdot l}{S \cdot \Delta u_1}, \quad (1.2)$$

kde F_u - síla na mezi úměrnosti (N), l - původní délka tělesa (m), S - plocha na kterou síla F působila (m^2), Δu_1 - absolutní deformace (m). Jednotka modulu pružnosti jsou Pa. Modul pružnosti v tangenciálním směru namáhání se spočte ze vzorce

$$G = \frac{d\tau}{d\gamma} \quad (1.3)$$

Modul pružnosti se u našich domácích dřevin pohybuje v rozmezí 100 až 2000 MPa. V souvislosti s namáháním dřeva deformačním napětím je rozlišována mez úměrnosti a mez pevnosti. Pokud působící napětí nezpůsobí nevratnou plastickou deformaci, napětí

se pohybovalo v mezi úměrnosti. Mez pevnosti je potom to napětí, které způsobí nevratné plastické deformace tělesa.

1.4. Rychlost zvuku ve dřevě

Pod pojmem rychlost zvuku ve dřevě se rozumí rychlost akustických vln v tomto prostředí. Rychlost zvuku ve dřevě je rozdílná pro různé typy dřevin. Je to dáno hustotou materiálu a atmosférickými podmínkami jako je tlak, teplota a vlhkost. Při šíření vlny se vlnoplochy zvětšují a tímto rozptýlením se jejich intenzita zmenšuje. Tento pokles intenzity je dále způsoben absorbcí materiálu. Pro rychlost zvuku ve dřevě platí vztah

$$c = \sqrt{\frac{E}{Q}}, \quad (1.4)$$

kde E je Youngův modul pružnosti, Q je hustota dřeva.

Pokud chceme najít dřevo s nejvyšší rychlostí šíření vlny, hledáme potom takové, které je nejpružnější a má nejmenší hustotou. Rychlost zvuku ve dřevě se dále liší v závislosti na směru šíření vlny. Největší rychlost je ve směru vláken. Proti směru vláken je přibližně 3 až 4krát menší než ve směru vláken. V tabulce níže je uvedeno několik příkladů tohoto anizotropního šíření zvuku v některých z našich domácích dřevin spolu s modulem pružnosti.

Tab. 1.1: Průměrná rychlost zvuku vybraných dřevin (1)

Druh dřeva	Hustota [kg.m ⁻³]	Modul pružnosti E [MPa]		Rychlost zvuku c [m.s ⁻¹]		$c_{rov} : c_{kolmo}$
		Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna	Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna	
smrk	470	11 000	550	4 790	1 072	4,47
jedle	460	11 000	490	4 890	1 033	4,73
javor	630	9 400	915	3 826	1 194	3,21
buk	730	16 000	1 500	4 638	1 420	3,27
dub	690	13 000	1 000	4 304	1 193	3,61

Rozdíl rychlosti v přímém a kolmém směru se různí podle typu dřeva a také podle modulu pružnosti v těchto směrech. Poměr těchto rychlostí vyjadřuje rovnice

$$\frac{c_1}{c_2} = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \quad (1.5)$$

kde c_1 a c_2 jsou rychlosti ve směru a kolmo k vláknům, E_1 a E_2 jsou moduly pružnosti ve směru a kolmo k vláknům.

1.5. Akustická konstanta

Pomocí akustické konstanty dřeva jsme schopni posoudit rezonanční vlastnosti dřeva, a to kolik energie z celkové přijaté, je dřevo schopno vyzářit do okolí. Tedy míra užitečné energie. Ta je závislá na hustotě materiálu a jeho pružnosti. Čím menší hustota a větší pružnost, tím dochází k menším ztrátám energie vnitřním třením a tím je větší podíl energie vyzářené do okolního vzduchu. Akustickou konstantu nebo i jinak řečeno konstantu vyzařování K_A lze spočítat ze vztahu

$$K_A = \sqrt{\frac{E}{Q^3}} \quad (1.6)$$

kde E je dynamický modul pružnosti, Q je hustota dřeva.

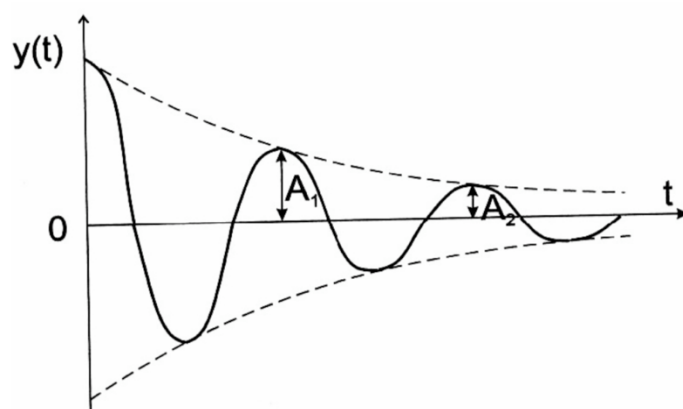
Dobré rezonanční dřevo musí splňovat podmínku akustické konstanty větší než $12 \text{ m}^4 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Z tabulky akustických konstant různých materiálů uvedené níže vyplývá, že jako rezonanční materiál je nejvhodnější rezonanční smrk. Rozdíl akustické konstanty u jádra a bělí je zanedbatelný. O tom více v kapitole Materiál.

Tab. 1.2: Akustické konstanty vybraných dřevin (1)

Druh dřeva	Vlhkost [%]	Hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	Modul pružnosti [MPa]	Akustická konst. [$\text{m}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]
Rezonanční smrk	10	420	11000	12
Borovice	10	500	15000	11
Jasan	10	700	15000	6,5
Buk	10	750	14000	6
Bříza	10	630	14000	7,5
Javor	12	700	11000	5,8

1.6. Logaritmický dekrement útlumu

Pokud přestane působit na rozrezonovaný systém budící síla, vlivem vnitřní třecí síly působící proti pohybu mechanické soustavy (označujeme jako *kapacita tlumení*) dochází k tlumení kmitů. Energie vln je z části vyzářená do okolí a z části se přemění na teplo. Amplitudy za sebou jdoucích vln se zmenšují, až se soustava dostane do své klidové polohy. Toto kmitání označujeme jako tlumené.



Obr. 1.2: Tlumené kmitání (3)

Ukazatelem této ztráty je logaritmický dekrement útlumu, který je logaritmem podílu amplitud dvou po sobě jdoucích vln, jak je patrné z Obr. 1.2. Vzorec zapíšeme jako

$$A = \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (1.7)$$

kde A_1 a A_2 jsou amplitudy dvou po sobě jdoucích vln.

1.7. Akustický vlnový odpor

Akustický vlnový odpor Z udává odpor prostředí proti šíření rovinné akustické vlny a je tedy závislý na hustotě dřeva a rychlosti šířící se vlny. Vztah pro výpočet se zapíše jako

$$Z = Q \cdot c = Q \sqrt{\frac{E}{Q}} \quad (1.8)$$

kde Z je akustický vlnový odpor [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$], E je modul pružnosti [Pa], Q je hustota dřeva [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

V tabulce níže je srovnání akustického vlnového odporu vybraných materiálů. Z tohoto srovnání je patrné, že akustické vlastnosti dřeva jsou takřka nenahraditelné.

Tab. 1.3: Akustický vlnový odpor vybraných materiálů (1)

Materiál	Akustický vlnový odpor [kg·m ⁻² ·s ⁻¹].10 ⁵
Ocel	395
Bronz	168
Mosaz	234
Olovo	82,5
Jedle	20
Buk	22
Voda	14
Guma	10
Vzduch	0,004

Na tlumení zvuku se podílí vnitřní tření materiálu a dále také tlumení jeho vyzařováním do okolí. Poměr, jakým se tyto dva způsoby tlumení podílejí na celkovém tlumení, záleží na hustotě dřeva. U částí hudebních nástrojů, které slouží jako radiátor, je potom pochopitelně požadováno malé tlumení vnitřním odporem materiálu a velké tlumení vyzařováním – *radiací zvuku*. Tlumení zvuku radiací γ (m².s.kg⁻¹) se spočítá podle vzorce

$$\gamma = \frac{c}{Q} = Q^{-1} \sqrt{\frac{E}{Q}} \quad (1.9)$$

2. KYTARA

Kytara je hudební nástroj patřící do skupiny strunných, drnkacích nástrojů. Jedná se o akordický nástroj (možno hrát jednohlasně i vícehlasně) s doznívajícím tónem. Postupem času se tenot nástroj rozvíjel a vznikalo mnoho různých typů. V první části se tato kapitola zaměří na historii a rozdělení základních typů kytary. Dále bude následovat popis materiálu a žebrování moderní klasické akustické kytary.

2.1. Historie

Historie kytary je velmi bohatá. Do známé podoby, jak vypadá dnes, se vyvíjela po dlouhá staletí. První zmínky o nástrojích, které jsou podobné dnešní kytaře a jsou považovány za její předchůdce, je možno nalézt už v 13. století. Prameny pro tyto informace jsou starodávne obrazy a církevní literatura. Její tvar, velikost, počet strun a ladění se v průběhu času různě měnilo.

Významný moment v tomto vývoji přinesl rok 1833, kdy Christian Frederick Martin založil vlastní manufakturu na výrobu kytar Martin & Company. Tím nástroj značně zpopularizoval a dále v padesátých letech tohoto století začal pro své kytary používat žebrování typu „X“, které je v různých modifikacích používáno až dodnes.

Dalším významným jménem je Španělský Antonio Torres Jurado (1817-1892), který v druhé polovině 19. století optimalizoval architekturu těla klasické kytary. Jeho kytara, dnes také známá jako „španělka“, měla větší a širší tělo a hlavně precizně odlazenou architekturu žebrování. Toto žebrování typu „vějíř“ a celkově i architektura celé kytary podle Torrese, se stala standardem pro výrobu klasických kytar až dodnes.

2.2. Tvar korpusu

Dnes se moderní akustická kytara rozlišuje na dva základní typy. První je klasická kytara (jinak také španělská) a druhý je akustická kytara. Samozřejmě, že i klasická kytara je z pohledu způsobu šíření zvuku akustická kytara. Z pohledu moderního názvosloví pojem akustická kytara ale znamená specifický typ kytar. Klasická se od akustické liší hlavně širším hmatníkem (klasická cca 53 mm, akustická 42 mm) a nylonovými strunami. Tyto dva základní typy se potom dále dělí na další podtypy podle parametrů, jako jsou velikost a tvar těla.

Modely klasické kytary se dále dělí už jen podle velikosti. Jejich označení se zapisuje ve zlomkovém tvaru: 1/4, 1/2, 3/4, 7/8 a plná velikost 4/4.

U moderní akustické kytary je dělení o něco rozmanitější. Různé požadavky umělců a touha výrobců po vyjímčnosti v průběhu let přinesly několik různých architektur. Na Obr. 2.1 je vidět několik základních typů moderní akustické kytary.



Obr. 2.1: Základní tvary akustických kytar (4)

2.3. Materiál

Výběr materiálu použitého pro výrobu hudebního nástroje má hlavní podíl na výsledné kvalitě akustických vlastností nástroje. Konkrétně u kytary má potom nejzásadnější vliv výběr horní – rezonanční desky. Ta má na svědomí největší část celkové barvy zvuku kytarového korpusu. Na výsledném zvuku se dale podílí nejen rezonance zadní desky, ale i luby a krk s hmatníkem.

Pro výrobu rezonanční desky je vyhledáváno dřevo s minimálním vnitřním třením a maximální konstantou vyzařování. Tím docílíme maximální přenos energie do vzduchu. Vhodným materiálem pro horní desku kytary je tedy měkké a pružné dřevo. Nejčastěji používané materiály jsou rezonanční smrk a cedr, vytěžené radiálním řezem, tedy rovnoběžně ve směru vláken přes střed. Výběr mezi těmito materiály určují požadavky na výsledný zvuk produktu. Cedr je méně pevný, lehký a křehký. Rozrezonování takovéto desky je rychlé. Zvuk potom bývá lehce tichší, barevný a komorní. Za nejlepší akustický materiál pro rezonanční desku je ale považován rezonanční smrk, který se vyznačuje silným a jasným zvukem.

Rezonanční smrk se od obyčejného liší speciálními podmínkami, ve kterých vyrůstá. Vybírá se ze stromů rostoucích v horských lesích anebo ze severních svahů hor tak, aby šířka ročního kruhu byla v rozmezí 1 až 4 mm a aby podíl letního přírůstku v letokruhu byl v rozmezí 5 až 20 %. Konkrétně firma Strunal hledá vhodné stromy v nadmořské výšce až nad 900 metrů. (5) Za dobrou alternativu smrku se ještě považuje jedle.

Čím hustší letokruhy, tím má smrkové dřevo lepší akustické vlastnosti a tím má i na trhu vyšší hodnotu. Běžný standard je 6 ročních kruhů na 1 cm. Dále je pro ideální materiál vyhledáván strom s kruhovým průřezem, rovnými vlákny a minimální rotací. Další nutností je zdraví a čistota dřeva, tedy že kmen na minimální požadované délce a průměru neobsahuje suky. Podle Požgaj a spol. se jedná o délku 3 m a průměr 38 cm. Rotace snižuje modul pružnosti a tím konstantu vyzařování. Přibližně sedmi procentní točivost snižuje konstantu vyzařování o šest procent. Přibližná doba růstu takovýchto stromů je 150 až 160 let.

Dále potom záleží na délce a kvalitě sušení dřeva. Sušením se předchází vzniku vnitřního napětí a tedy možnosti vzniku vnitřních prasklin, které by zhoršily akustické vlastnosti dřeva. Běžně se dřevo suší přirozeným sušením 3 až 5 let. Pro nejprestižnější kusy hudebních nástrojů ale může být doba sušení i 30 let. (5)

Rozdíl akustických vlastností mezi jádrem a bělí stromu je zanedbatelný. Což v praxi znamená, že strom bývá buď využitelný v celé své šíři nebo vůbec. Jádro je ta část kmene,

kteřá je fyziologicky mrtvá. Na pohled je tmavší. Tato část kmene už není schopna přenosu vody a živin, slouží pouze jako opora stromu. Běl je vnější část kmene mezi jádrem a kůrou, kterou probíhá zásobování vodou a rozpuštěnými minerály od kořenů k listům. Rozdíl mezi jádrem a bělí spočívá pouze v schopnosti vést vodu. (6) (1)

2.4. Žebrování

Vlastnosti ozvučné desky jsou po materiálu dále ovlivněné žebrováním. Na výrobu žeber se používá stejného materiálu, z jakého je rezonanční deska. Připevnění je provedeno lepením. Žebrování se stará o pevnost horní desky, aby nedocházelo k jejímu borcení v okolí krku a kobyly, kde je pochopitelně největší pnutí vlivem tahové síly strun, a zároveň o distribuci vln z okolí kobyly do celé desky. Žebrování tedy musí splňovat požadavky na vyvážení mechanického zatížení a přitom pozitivně ovlivnit rezonanční vlastnosti desky. Příčky žeber ve směru anebo blížící se směru tahu strun zabezpečují převážně rozložení této tahové síly vlnění. Příčky kolmé k vláknům rezonanční desky slouží k vyrovnání rozdílu modulu pružnosti ve směru a kolmo k vláknům.

Rozmístění a rozměry žeber se různí podle výrobců. Každý má svou vlastní architekturu. Nejrozšířenějším typem je žebrování typu "X". Vyvinutí tohoto systému je obecně připisováno firmě C. F. Martin & Co v padesátých letech 19. století a dodnes je v různých modifikacích používán většinou výrobců. Do té doby byl nejrozšířenějším typem "Vějíř". Tento typ žebrování optimalizovaný Španělským kytarářem Antoniem de Torres Juradem, zůstává do dnes téměř nepozměněn a je dále využíván. Je ale až na pár výjimek použitelný pouze pro kytary s nylonovými strunami, jelikož není dostatečně pevný pro tah kovových strun.

K finálnímu lazení rezonanční desky dochází postupným zbrušováním jednotlivých žeber v místech, kde nedochází k výraznému namáhání a tím tedy i k zvýšení schopnosti mechanického kmitání. Přesné údaje ohledně rozměrů si ale každý výrobce přísně chrání.



Obr. 2.2: Ukázka žebrování typu X (8)

2.5. Chladniho obrazce

Ernst Chladni (1756 až 1827) byl Německý fyzik, který je považován za zakladatele moderní akustiky. V Jedné ze svých významných prací popsal pomocí uzlových čar rychlosti zvuku v různých plynných prostředích. Ty se na rezonující desce zobrazují pomocí jemného prášku tím, že při rezonanci dochází k odskakování prášku z míst tam, kde jsou kmitny a k shlukování tam, kde jsou uzly. Tím se na povrchu vytvořily čáry uzlů. Deska je schopna rezonance na všech frekvencích. Tyto obrazce se ale tvoří pouze při rezonančních frekvencích daného rezonátoru. Tímto způsobem jsme schopni určit frekvence vlastních módů rezonanční desky a vizualizovat její vlnění. Tento experiment se využíval při vývoji hudebních nástrojů pro “doladování” akustických skříní, tak aby jejich vlastní módy byly na požadovaných frekvencích. Dnes je tento starý způsob zjednodušen moderními technologiemi. Vizualizaci Chladniho obrazců lze zobrazit pomocí softwarových nástrojů a tím i celý experiment zjednodušit. Jednotlivé módy potom označujeme jako $M(x,y)$, kde x je počet uzlových čar na ose x a y je počet uzlových čar na ose y . (2)

2.6. Helmholtzova rezonance

Na celkové rezonanci ozvučné skřínky se podílí i rezonance vzduchového objemu skříně. Tato rezonance má stěžejní význam pro basové tóny kytary. Obecně je lazena v rozsahu 100 až 120 Hz.

Jestliže máme dutinu o objemu V s otvorem o poloměru R , pak můžeme Helmholtzovu frekvenci stanovit podle vzorce

$$f = \frac{c_t}{2\pi} \sqrt{\frac{2R}{V}} \quad (2.1)$$

kde c_t je rychlost zvuku při teplotě t . (2)

3. POPIS MĚŘENÍ

Cílem bakalářské práce je analyzovat akustické vlastnosti několika dřevěných skříní s různou architekturou a materiálem při určitých atmosférických podmínkách a dále uvést tyto data do souvislosti s praxí. Pomocí buzení konstantním umělým signálem byla sledována rezonanční odezva frekvenční přenosové charakteristiky. Pomocí Chladniho obrazců byly zobrazeny vlastní rezonanční módy horní i dolní desky. Tyto dva měření se nevzájem doplňují. Kdyby byla měřena pouze přenosová charakteristika, nebylo by z ní možné jednoznačně vyčíst, kde daný mód konkrétně vzniká. Při měření kytar, kde byly natažené struny, byly tyto struny ztlumeny.

3.1. Měření nástroje

Pro účely této práce budou měřeny tři různé typy akustických kytar.

Klasická kytara firmy Strunal - „Španělka“

Tento korpus akustické kytary byl pro tuto práci poskytnut Mendelovou univerzitou v Brně, konkrétně ústavem nauky o dřevě. Jedná se o korpus klasické kytary plné velikosti (4/4). Tato rezonanční skříň je vyrobena českou firmou Strunal.

Krom názvu výrobce ke kytarovému korpusu nebyly doloženy žádné další informace o modelu, a ani samotné tělo kytary nebylo nijak označeno. S určením materiálu tedy pomohlo několik odborníků z Mendelovy univerzity z Lesnické a dřevařské fakulty na základě vizuálního posouzení jeho struktury. Tento odhad pro účely bakalářské práce zprostředkoval Bc. Patrik Nope na půdě Mendelovy univerzity v Brně. Přední deska kytary byla označena jako rezonanční smrk a dřevo použité pro zadní desku a luby bylo odhadnuto jako dub. Žebrování je typu vějíř. Měřeno bylo pouze tělo korpusu, jelikož krk s hmatníkem nebyl dodán.

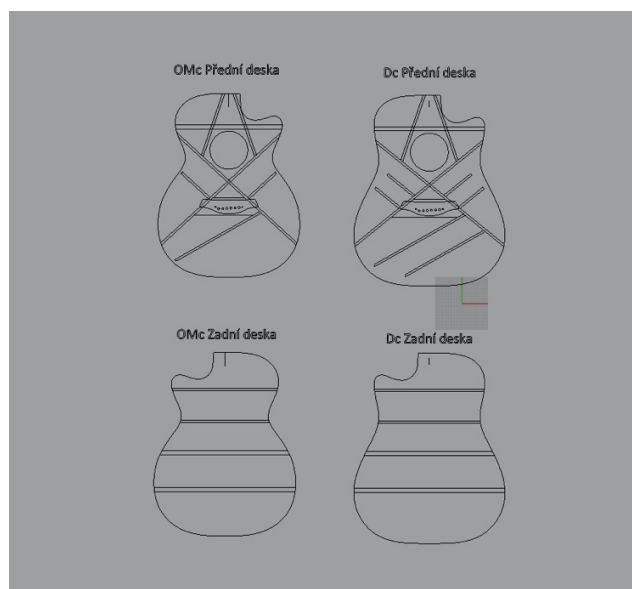
Furch Yellow Plus SP - OM

Jedná se o celomasivní kytaru ve vysoce špičkovém provedení české firmy Furch. Přední rezonanční deska je vyrobena ze smrku sitka, pocházejícího ze Severní Ameriky. Přednost tohoto dřeva je pravidelnost let, která zaručuje velmi přesné lazení. Zadní deska a luby jsou vyrobeny z afrického padouku, který je zvukově vyrovnaný s mírným zvýrazněním výšek. Povrch nástroje je dále upravován technologií Full-Pore High-Gloss Finish vyvinutou přímo firmou Furch. Zvuková vyrovnanost ve frekvenčním spektru je charakteristickým rysem pro typ těla Orchestra model. Žebrování je typu X, viz Obr. 3.1.

Furch Green Dc-SR SPE – Dreadnought

Třetí měřený nástroj je kytara dodaná opět firmou Furch ve tvaru Dreadnought. Tento typ architektury se vyznačuje mohutnými basy a cinkavě pronikavými výškami. Těchto vlastností je docíleno díky větším rozměrům a vlastnostmi použitých materiálů. Přední deska je opět ze smrku sitka. Zadní deska a luby jsou vyrobeny z indického palisandru. I u tohoto modelu je povrch upravován speciální technologií firmy Furch pro zabezpečení

odolnosti a zlepšení rezonančních vlastností dřeva. I zde je použito žebrování typu X, viz Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Pracovní nákres žebrování kytar Furch

3.2. Postup vizualizace Chladního obrazců

Vizualizace vibrací rezonanční desky pomocí chladního obrazců probíhala pro kytaru klasickou kytru Strunal na půdě Výzkumného centra Josefa Ressela Brno-Útěchov. V těchto prostorech bylo experiment prováděn při 20 °C a 60% relativní vlhkosti vzduchu.

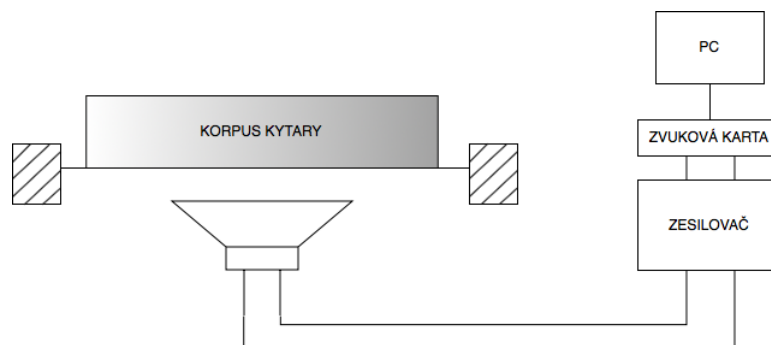
Další kytary byly měřeny v nahrávacím studiu FEKT při 21 °C a 40% relativní vlhkosti. Měřený korpus byl vždy před měřením minimálně několik hodin uskladněn v těchto prostorech, aby vlastnosti měřeného nástroje byly po celou dobu neměnné.

Jak je možné vidět na Obr. 3.2, korpus kytary byl umístěn v těsné blízkosti nad reproduktor (cca 10 cm). Uchycení bylo provedeno pomocí dvou tenkých provázků přivázaných na vyvýšenou konstrukci kolem reproduktoru. Korpus byl na tyto natažené provázky volně položen.

Pro akustické buzení kytarového těla byl použit sinusový signál generován softwarovým generátorem z počítače v programu Logic Pro X. Pro D/A převod byla použita jednoduchá zvuková karta Yamaha AG 06. Pro zesílení signálu byl použit zesilovač značky Show typu PSA-3450.

Postup samotného experimentu je následovný. Na horní desku akustické skříně se v rámci možností rovnoměrně nasype jemný prášek nebo drobné krystalky. V případě této práce byl využit cukr krystal. Potom se začne generovat sinusový signál o intenzitě přibližně 90 dB na zvolené frekvenci. Ta je přeladována, dokud se nenarazí na frekvenci, při které začnou krystalky na desce akustické skříně viditelně skákat vlivem vibrací způsobené rezonancí. Na této frekvenci se přeladování zastaví a nechá krystalky vibrací uspořádat do konkrétních Chladního obrazců. Výsledný obraz a frekvence módu se zaznamená a změří jeho velikost. Tento postup se opakuje, dokud nejsou nalezeny

všechny rezonanční frekvence a jejich obrazce kmitání v rozsahu přibližně od 70 Hz do 900 Hz, což zhruba odpovídá frekvenčnímu rozsahu kytary.



Obr. 3.2: Zjednodušené schéma experimentu Chladního obrazců

3.3. Měření rychlosti zvuku

Důležitým parametrem, od kterého se dá odvodit mnoho dalších vlastností je rychlost zvuku. Jeden z nedestruktivních způsobů měření rychlosti zvuku ve dřevě je kontaktní měření ultrazvukovým zařízením. Jeho princip spočívá v měření času průchodu ultrazvukové vlny materiálem.

Při tomto měření bylo použito zařízení Fakopp UltraSonic timer, který měří čas zpoždění mezi jeho dvěma sondami. Ty jsou v tomto případě kontaktní a proto se přiloží na měřenou desku v konkrétní vzdálenosti. Frekvence těchto přitlačných sond je 45kHz a odstup od jednotlivých impulzů jsou dvě sekundy. Ze vzdálenosti a zjištěného času jsme schopni vypočítat rychlost zvuku.

Tento způsob měření se ale prokázal jako nevyhovující pro potřeby této práce z důvodu povrchové úpravy dřeva. Zobrazovaný čas nebyl čas průchodu dřevem, ale pouze vrstvou laku na povrchu. K tomuto závěru se dospělo na základě faktu, že čas zpoždění vykazoval velké odchylky podle síly přitlačení sondy na povrch a ani nevykazoval známky izotropní vlastnosti materiálu. Rychlost zvuku ve dřevě kolmo a ve směru vláken se nijak zásadně nelišila.

Tím se narazilo na problém, že rychlost zvuku takového vzorku akustické skříně kytary nelze změřit nedestruktivním způsobem. Nezbyvá tedy nic jiného, než se spolehnout na přesnost odhadu dřeva a hodnot uvedených v odborné literatuře.

3.4. Postup měření rezonanční odezvy akustické skříně

Pro měření frekvenčního spektra rezonanční odezvy akustické skříně je nezbytné, aby měřená odezva nebyla ovlivněna jakýmkoli nežádoucími, rušivými zvuky. Těch může být v běžných prostorech nespočet. Například ventilace vzduchotechniky, šum aut na ulici, kroky v místnosti o patro výš, atd. Dále je nutné se vyvarovat nežádoucímu vlivu vlastní akustiky místnosti.

Aby se předešlo jakémukoliv rušení, měření musí probíhat v komoře akusticky odizolované od okolí a uvnitř akusticky mrtvé. Pro tyto důvody měření vlastních módů

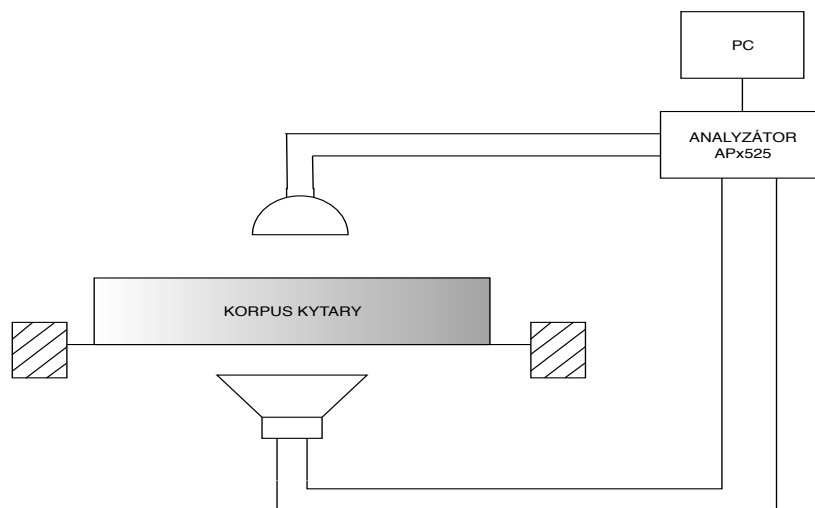
probíhalo v bezdrazové místnosti na půdě Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně.

Princip měření je podobný jako u měření Chladního obrazců. Budící signal postupně přeladován, jen v tomto případě se rezonanční odezva zaznamenává měřicím mikrofonom a zapisuje do tabulky. Pro celé měření bylo využito analyzačního zařízení firmy Audio Precision a měřícího zařízení firmy BRÜEL & KJÆR.

Opět se kytarový korpus, umístěn naležato v těsné blízkosti (cca 5 cm) nad reproduktorem, budí sinusovým signálem. Ten je generován softwarovým generátorem ovládaným z PC v programu APx500. Nad korpusem je umístěn měřící mikrofون ve výšce 20 cm nad deskou a namířen kolmo na střed desky kytary. Snímaný signál je zobrazován rovněž na PC v programu APx500.

Frekvenční analýza se provádí manuálně a to tak, že se frekvence signálu přeladuje a postupně se hledají ve frekvenčním spektru špičky hladiny intenzity akustického tlaku – vlastní rezonanční frekvence. Když je objeven mód, do tabulky se zaznamená jeho frekvence, amplituda a také amplitudy frekvencí v jeho okolí tak, aby byl dostatek bodů pro vykreslení rezonanční křivky. Pro všechny naměřené frekvence se znovu proměří hladina akustického tlaku bez kytary. Tyto hodnoty nám orientačně slouží jako korekce nevyrovnaného spektra reproduktoru.

Měření probíhalo při 22 °C a 30% relativní vlhkosti.



Obr. 3.3: Zjednodušené schéma měření modální analýzy

Seznam použité techniky:

- Reproduktor Event 20/20 bas V3
- Analyzátor zvukových signálů APx525
- Převodník BRÜEL & KJÆR, Nexus
- Měřící mikrofون BRÜEL & KJÆR, Typ 2669

4. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Tato kapitola shrnuje naměřená data a uvádí je do souvislostí. Vizualizací uzlových čar pomocí Chladniho obrazců byly určeny vlastní rezonanční módy akustické skříně v rozsahu 70 až 1000 Hz. Mimo tento rozsah měřit nebylo zapotřebí, protože u běžné kytary je nejnižší tón E, kterému odpovídá frekvence 82,41 Hz a nejvyšší h^2 s frekvencí 987,80 Hz. Rezonanční frekvence nemusí být určeny dokonale přesně. Při které frekvenci skáče prášek nejintenzivněji, lze určit s přesností přibližně ± 1 Hz.

Celková rezonance je dána interferencí dílčích rezonancí různých částí kytarového těla a strun. Dochází tedy nejen ke chtěným součtům, ale i k nechtěným rozdílům a tedy k úbytkům. Tyto místa označujeme jako tzv. vlčí tóny. Zabránit se jim nedá. Jedinou snahou je, aby frekvence těchto vlčích tónů nebyla shodná s frekvencemi tónů lazení. Anebo, pokud možno, aby se dílčí rezonance navzájem kompenzovaly.

4.1. Klasická kytara firmy Strunal - „Španělka“

V hledaném rozsahu bylo nalezeno na dolní desce 14 a na horní 15 módů. V následující tabulce jsou uvedeny módy, jejich frekvence a nejbližší tón jim odpovídající.

Tab. 4.1: Chladniho obrazce zadní desky

Pořadí módu	Frekvence [Hz]	Nejbližší tón (jeho frekvence [Hz])
1.	78	Dis (78)
2.	105	Gis (104)
3.	130	c (131)
4.	170	e (165)
5.	230	ais (233)
6.	320	e^1 (330)
7.	350	f^1 (349)
8.	390	g^1 (392)
9.	426	gis^1 (415)
10.	520	c^2 (523)
11.	590	d^2 (587)
12.	630	dis^2 (622)
13.	760	g^2 (784)
14.	820	gis^2 (831)

Tab. 4.2: Chladniho obrazce horní desky

Pořadí módu	Frekvence [Hz]	Nejbližší tón (jeho frekvence [Hz])
1.	84	E (82)
2.	110	A (110)
3.	146	d (147)
4.	230	ais (233)
5.	250	h (267)
6.	310	dis ¹ (311)
7.	320	e ¹ (330)
8.	340	f ¹ (350)
9.	390	g ¹ (392)
10.	440	a ¹ (440)
11.	490	h ¹ (494)
12.	510	c ² (523)
13.	580	d ² (587)
14.	820	gis ² (831)

Z tabulek Chladniho obrazců lze vyčíst poměrně dobré rozložení vlastních módů. Součástí měření ale nebylo zaznamenání intenzity budícího signálu, proto i když jsou Chladniho obrazce rozloženy ve frekvenčním spektru rovnoměrně, není možno určit, jaký zisk na jakých pásmech rezonanční skřín přídává. Zaznamenání intenzity by bylo v tomto měření nebylo možné, protože probíhalo v akusticky neuzpůsobené místnosti.

Na základě frekvencí módů jsme schopni odhadovat hlavně čistotu a tonalitu výsledného zvuku. Tato rezonanční skřín vykazuje mnoho netonálních rezonancí. Dá se tedy očekávat, že výsledný zvuk, který by vyzařovala, nebude moc čistý a průrazný, ale spíše méně konkrétní, komorní, hutný ve frekvenčním spektru a konkrétní tón zaoblený. Tento popis ale odpovídá obecným vlastnostem klasické kytary, takže je vše v naprostém pořádku. Žebrování typu vějíř totiž neposkytuje úplně přesné možnosti nalazení kytarové desky. Na následujících fotkách jsou zobrazeny vybrané obrazce přední i zadní desky. Všechny další obrázky jsou v příloze na externím nosiči.



Obr. 4.1: Mód (00), 110 Hz



Obr. 4.2: Mód (01), 230 Hz



Obr. 4.3: Mód (00), 250 Hz



Obr. 4.4: Mód (11), 310 Hz



Obr. 4.5: Mód (21), 440 Hz



Obr. 4.6: Mód (22) 820 Hz



Obr. 4.7: Mód (01), 230 Hz



Obr. 4.8: Mód (04), 590 Hz

Pomocí přesného měření hladiny akustického tlaku rezonance konkrétních frekvencí spektra je už možné předpovědět zvukový charakter nástroje a to podle toho, jaký mají rezonanční módy zisk. Přední deska vykazuje celkem 8 rezonančních frekvencí a zadní 6, jak je možné vyčíst z tabulek. Nultý mód je rezonanční frekvence vzduchového objemu uvnitř korpusu.

Tab. 4.3: Seznam vlastních rezonančních frekvencí přední desky

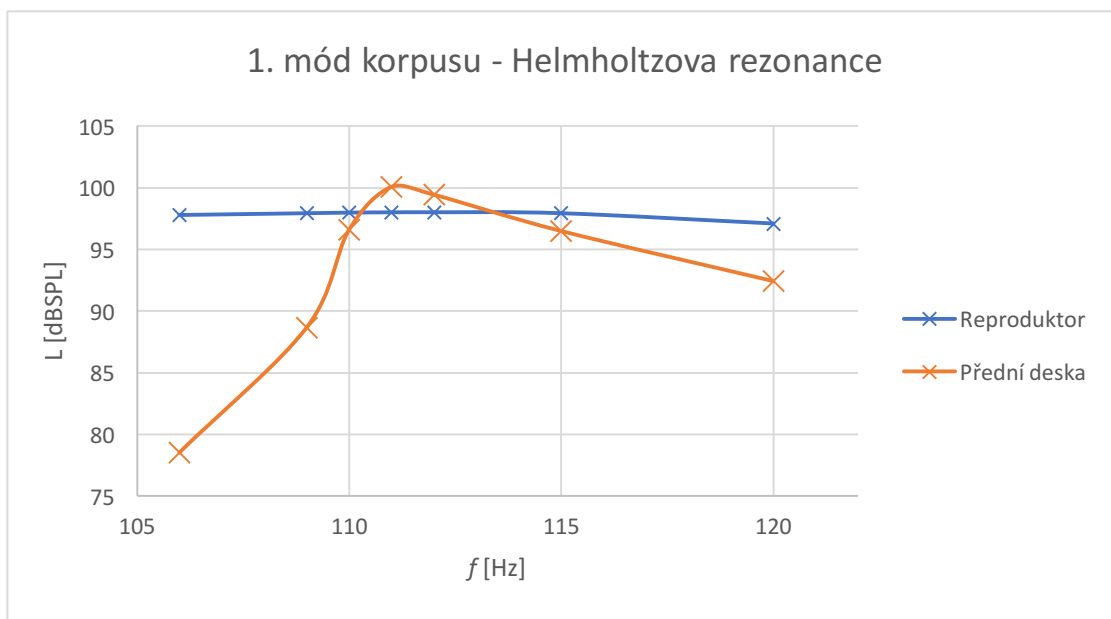
Pořadí	f [Hz]
0.	111
1.	225
2.	257
3.	309
4.	345
5.	394
6.	440
7.	585
8.	819

Tab. 4.4: Seznam vlastních rezonančních frekvencí zadní desky

Pořadí	f [Hz]
0.	116
1.	228
2.	240
3.	316
4.	349
5.	588
6.	625

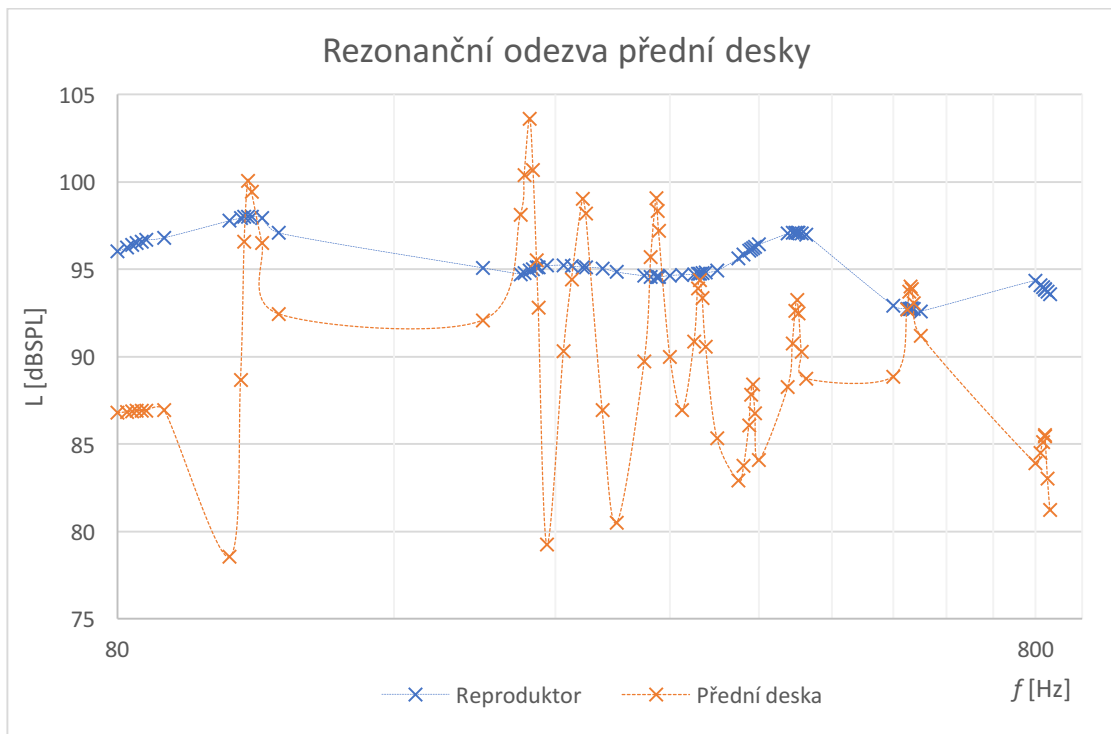
U přední desky se většina významných módů shlukuje ve středním frekvenčním pásmu. V basech nalezneme pouze jednu rezonanční frekvenci, která je rezonancí vzduchové dutiny korpusu. To znamená, že v basech bude zvuk nevyvážený a jen tón v rozmezí 110 až 115 Hz bude „vyrážet“. Jedná se o tón A. Tento mód je zobrazen v grafu níže.

V blízkosti téměř každého výraznějšího rezonančního kmitočtu lze zaznamenat v jeho blízkosti značný pokles. Je-li tělo buzeno frekvencí blízkou některému z těchto výraznějších rezonančních kmitočtů, dochází. Tomuto jevu se říká vlk. Tento jev je nežádoucí, nicméně tomu nelze úplně zabránit.

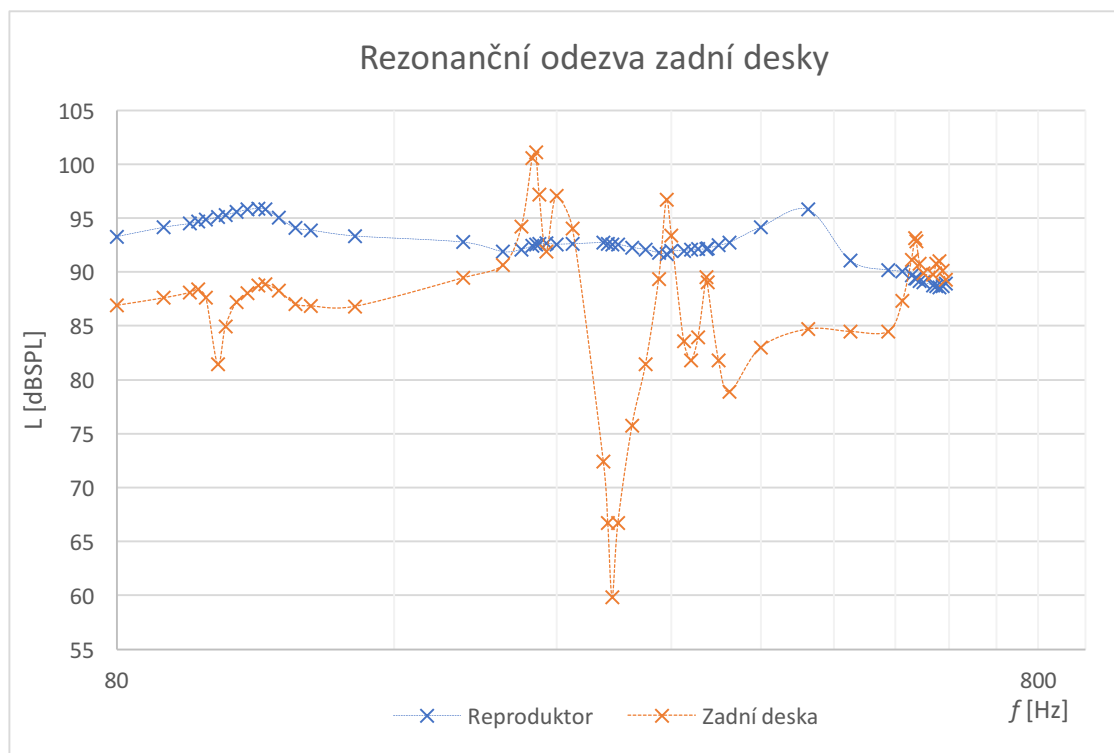


Obr. 4.9: Graf 1. módu korpusu

Tyto ostré výkyvy přední desky jsou ale kompenzovány zadní deskou, která se v basech chová o poznání vyrovnaněji. Na následujících dvou grafech je zobrazeno celé spektrum přední i zadní desky.



Obr. 4.10: Graf frekvenční charakteristiky přední desky



Obr. 4.11: Graf frekvenční charakteristiky dolní desky

Na základě zhodnocení všech měření je možno určit, kde daná rezonance vzniká. Měřené kytarové tělo jako celek má první rezonanční mód na kmitočtu 111 Hz. Tento mód vzniká hlavně Helmholtzovou rezonancí vzduchového objemu uvnitř korpusu. Druhý mód je prvním rezonančním módem přední i zadní desky přibližně na frekvenci 225 Hz. Třetí mód je na frekvenci 240 Hz a stará se o něj zadní deska. Čtvrtý mód s frekvencí 257 Hz se vytváří pouze na přední desce. Dále následuje poměrně značný propad na frekvenci 276, která odpovídá tónu cis^1 . Dále potom následují další módy desek a vzdušného proctor, jak je možno vidět v grafech.

4.2. Furch Yellow Plus SP – OM

Doložené Furchové kytary mají o poznání méně konkrétní kresbu Chladniho obrazců. Rezonance těchto korpusů je totiž velice komplexní. Experimentálním měřením Chladniho obrazců byly prokázány tyto rezonanční módy přední a zadní desky.

Tab. 4.5: Chladniho obrazce přední desky

Pořadí módu	Frekvence [Hz]	Nejbližší tón (jeho fekvence [Hz])
1.	110	A (110)
3.	230	ais (233)
4.	265	h (257)
5.	430	gis^1 (415)

Tab. 4.6 Chladniho ozobrazce zadní desky

Pořadí módu	Frekvence [Hz]	Nejbližší tón (jeho frekvence [Hz])
1.	90	F (87)
2.	110	A (110)
3.	195	g (196)
4.	218	a (220)
5.	290	d ¹ (293)
6.	350	f ¹ (349)
7.	370	fis ¹ (370)
8.	380	g ¹ (392)
9.	428	a ¹ (440)
10.	480	h ¹ (494)
11.	612	dis ² (622)
12.	620	dis ² (622)
13.	700	f ² (698)
14.	740	fis ² (740)

Tonalita rezonančních kmitočtů je o poznání lepší než u klasické kytary. Výsledkem je tedy čistější a konkrétní zvuk.

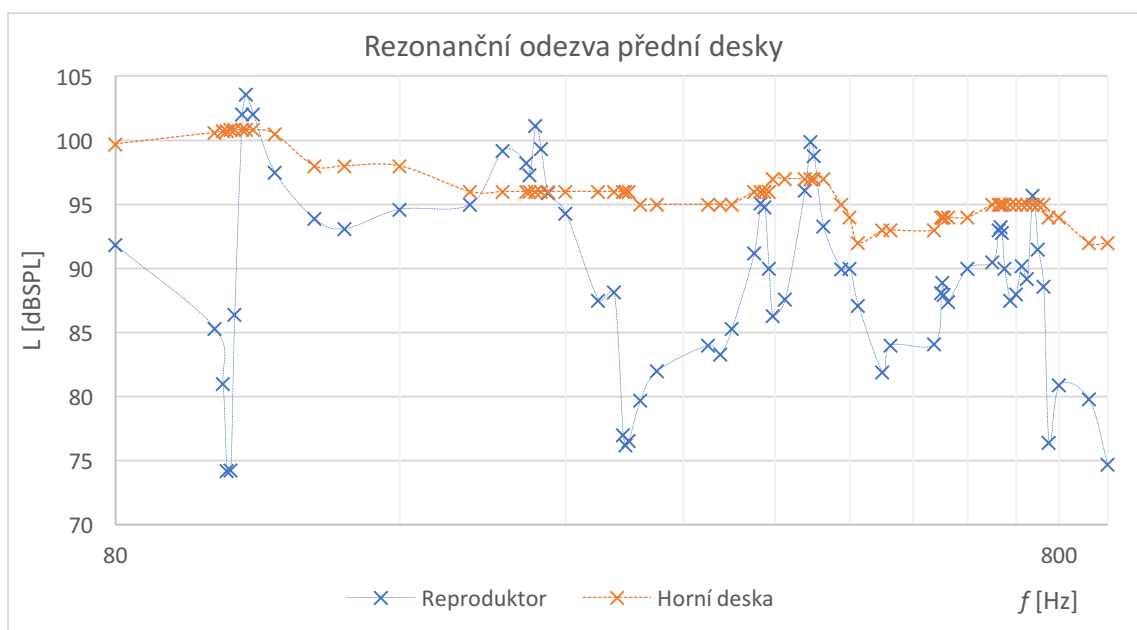
Pomocí měření spektální analýzy bylo zobrazeno chování přední a zadní desky ve spektru. Módy s jejich frekvencema jsou zaznamenány v tabulkách.

Tab. 4.7: Seznam vlastních rezonančních frekvencí přední desky

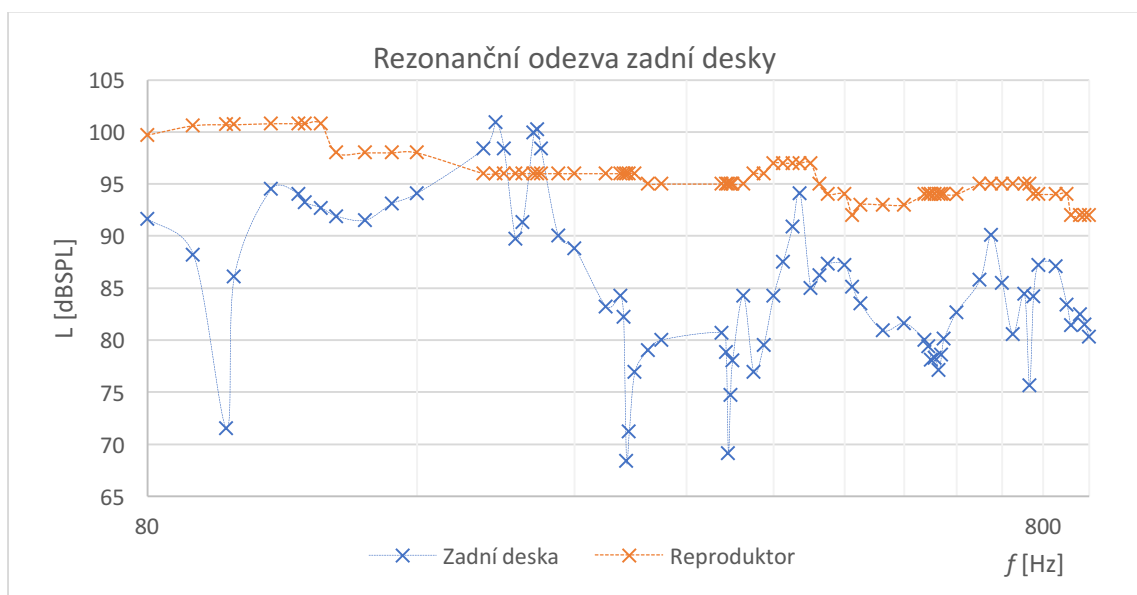
Pořadí	f [Hz]
0.	110
1.	206
2.	223
3.	270
4.	340
5.	380
6.	436
7.	694
8.	750

Tab. 4.8: Seznam vlastních rezonančních frekvencí zadní desky

Pořadí	f [Hz]
0.	110
1.	196
2.	218
3.	270
4.	370
5.	428
6.	700



Obr. 4.12: Graf frekvenční charakteristiky přední desky



Obr. 4.13: Graf frekvenční charakteristiky dolní desky

Kytara typu OM je obecně považována za zvukově velmi vyrovnanou kytaru. Po srovnání výsledků měření je vidět, že i tato kytara má značné propady ve spektru. Jak už ale bylo zmíněno, módy jsou lazeny poměrně přesně a proto kytara zní stále pořád konkrétně a díky rovnoměrnému rozložení módů ve spektru vyrovnaně. Vlčí tóny desek se ve většině případech kompenzují. Pouze v jednom případě vzniká kritická situace a to na frekvenci 277 Hz, kde je tón cis^1 . Tento tón bude oproti okolním tónům o poznání slabší.

Celkový zvuk není pouze čistý, jasný a rovnoměrný napříč frekvenčním spektrem, ale také i příjemně hřejivý. To je způsobeno intenzitou módů. Čím je rezonance dřevěného korpusu větší, tím více doplňuje cinkavý a charakterově prázdný zvuk strun svou bohatým barvou. U tohoto modelu

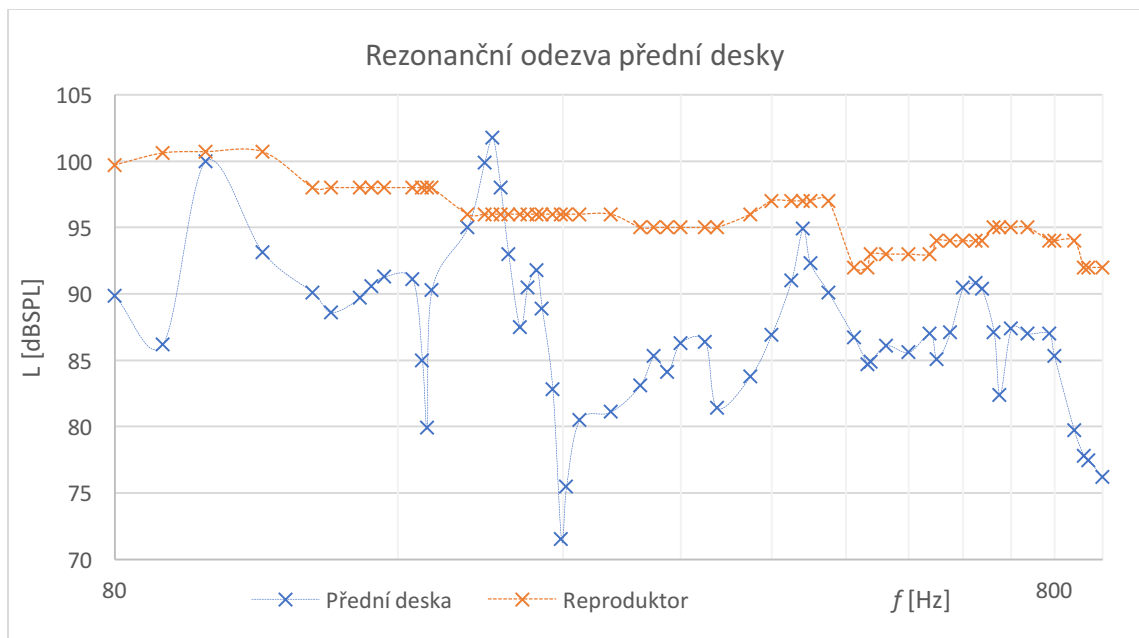
4.1. Furch Green Dc-SR SPE – Dreadnought

Tab. 4.9: Chladniho obrazce přední desky

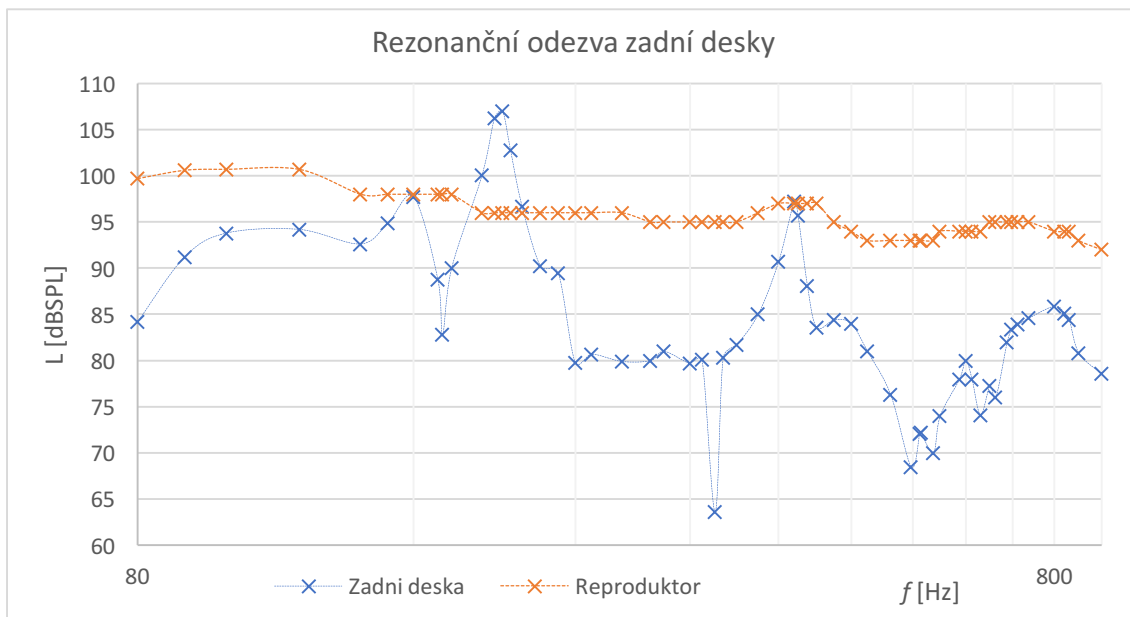
Pořadí módu	Frekvence [Hz]	Nejbližší tón (jeho frekvence [Hz])
1.	94	G (98)
2.	202	g (196)
3.	225	a (220)
4.	310	dis^1 (311)
5.	340	f^1 (349)
6.	430	a^1 (440)
7.	450	a^1 (440)
8.	640	dis^2 (622)

Tab. 4.10: Chladniho obrazce přední desky

Pořadí módu	Frekvence [Hz]	Nejbližší tón (jeho frekvence [Hz])
1.	94	G (98)
2.	172	F (175)
3.	200	g (196)
4.	230	ais (233)
5.	240	h (245)
6.	265	c ¹ (261)
7.	320	dis ¹ (311)
8.	340	f ¹ (349)
9.	420	gis ¹ (415)
10.	470	ais ¹ (466)
11.	680	dis ² (622)
12.	720	fis ² (740)



Obr. 4.14: Graf frekvenční charakteristiky přední desky



Obr. 4.15: Graf frekvenční charakteristiky dolní desky

Po zhodnocení spektrální analýzy a chladního obrazců je vidět, že kytara typu Dreadnought hraje hlasitě a mohutně v basech a méně podporuje výšky. Výsledný zvuk je proto mohutný v basech a pronikavý ve výškách, jelikož vysoké frekvence strun nejsou až tak podpořeny hřejivou barvou rezonance těla. “Nalazení” rezonančních desek je poměrně nepřesné. Toto ještě více napomáhá méně čitelnému a robustnímu zvuku. Díky těmto vlastnostem je tato kytara vhodná pro doprovod ve skupině více nástrojů.

5. ZÁVĚR

Akustická kytara je poměrně složitý nástroj. Její zvuk je ovlivněn nespočtelným množstvím různých aspektů. Cílem bakalářské práce bylo popsat akustické vlastnosti konkrétních rezonančních skříní za konkrétních podmínek. K dispozici byly tři různé vzorky kytarového korpusu, poskytnuté Mendelovou univerzitou v Brně a firmou Furch.

Teoretický úvod se zaměřil na vybrané akustické vlastnosti dřeva, pomocí kterých bude možno popsat v následné bakalářské práci změny způsobené vlhostí. Dále se zaměřil na samotnou kytaru jako nástroj. Stručně byla popsána historie a rozdělení typů akustických kytar. Další částí teoretického rozboru byl popis materiálu, který se využívá pro stavbu kytar a význam žebrování. Závěr teoretického úvodu se zaměřil na experiment Chladniho obrazců a teorii Helmholtzova rezonátoru.

Před měřením bylo vizuálním posouzením určeno, z jakého materiálu se korpus kytary skládá. Přední deska byla určena jako rezonanční smrk a zadní jako dub.

V postupu měření byly vysvětleny způsoby a postupy daných měření. Konkrétně pro tuto práci byly vykonány tři měření.

Prvním měřením byla vizualizace rezonančních obrazců pomocí Chladniho experimentu. Všechny nalezené obrazce byly fotograficky zaznamenány, jejich frekvence zapsány a uvedeny do souvislosti v praxi.

Dále byl proveden pokus o změření rychlosti dřeva. Na poskytnutém vzorku se ale mohly provádět pouze nedestruktivní měřicí metody. Rychlost zvuku se proto mohla měřit pouze kontaktně. Tento způsob byl ale nevyhovující z důvodu lakování na povrchu kytary.

Třetím měřením bylo podrobné analyzování frekvenčního spektra rezonanční odezvy. Toto měření je pro tuto práci stěžejní, jelikož přesně popsalo vlastní frekvence horní a dolní desky korpusu. Díky těmto informacím je dále možné přesnější popsání výsledného zvuku nástroje.

Výstupem práce je popsání akustických vlastností kytarového korpusu pomocí Chladniho obrazců a modální analýzy.

LITERATURA

1. **Požgaj, A. – Chovanec, D. – Kurjatko, S. – Babiak, M.:** *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vydání. Bratislava : Príroda, 1997. 80-07-00960-4.
2. **Václav, Sýrový.** *Hudební akustika*. 3. vydání. Praha : Akademie múzických umění, 2013. 978-80-7331-127-8.
3. **Trojáková, Gabriela.** docplayer.cz. *docplayer.cz*. [Online] Mendelova univerzita v Brně. [Citace: 21. 12 2019.] <https://docplayer.cz/42807743-Logaritmicky-dekrement-tlumeni-dreva.html>.
4. **Kejmar, Tomáš.** frontma.cz. *Audio Partner*. [Online] [Citace: 21. 12 2019.] <https://frontman.cz/je-lepsi-klasicka-nebo-akusticka-kytara> .
5. **Procházka, Jakub.** bussinesinfo.cz. [Online] [Citace: 21. 12 2019.] <https://www.businessinfo.cz/clanky/strunal-zije>.
6. **Redakce.** MeziStromy. [Online] [Citace: 21. 12 2019.] Anatomická stavba dřeva
Zdroj: <https://www.mezistromy.cz/vlastnosti-dreva-a-drevostaveb/stavba-dreva-cast-1-2/odborny>.
7. **Edwinson.** <http://edwingsonguitar.com>. [Online] [Citace: 21. 12 2019.] http://edwingsonguitar.com/Design_Philosophy/Entries/2013/9/18_Soundboard_Bracing_and_Tuning.html.
8. **Redakce.** Hudební scéna. [Online] [Citace: 21. 12 2019.] <https://www.hudebni-scena.cz/clanek/jak-se-vyrabi-kytarova-deska-107>.
9. **Procházka.** *guitar-makers.com*. [Online] [Citace: 21. 12 2019.] <http://www.guitar-makers.com/www/zebrovani.php>.

Seznam příloh

Příloha 1 – Tabulky naměřených hodnot v externím souboru Tabulky.xls na přiloženém médiu

Příloha 2 – Fotografie Chladniho obrazců na externím médiu