



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

MODÁLNÍ ANALÝZA KOBYLKY KLASICKÉ KYTARY

MODAL ANALYSIS OF THE CLASSICAL GUITAR BRIDGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Ondečko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hájek, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Adam Onděčko
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Petr Hájek, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Modální analýza kobyly klasické kytary

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kobyly klasické kytary převádí vibrace strun do těla nástroje, které zvuk zesílí a vyzáří do okolí. Protože se jedná o jednu z nejdůležitějších částí nástroje, každý výrobce se snažil navrhnout originální řešení. I v současnosti prochází její tvar neustálým vývojem. Cílem práce bude modální analýza vybraného typu kobyly, například kobyly Schneider, kterou máme k dispozici.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Proveďte rešerši typů kobyly klasických kytar.
- 2) Popište funkci kytary.
- 3) Vytvořte geometrii kobyly klasické kytary.
- 4) Proveďte modální analýzu kobyly.
- 5) Vyslovte závěry, jak mohou vlastní frekvence kobyly ovlivňovat funkci nástroje.

Seznam doporučené literatury:

FLETCHER, Neville H. a Thomas D. ROSSING, 1998. The physics of musical instruments [online]. Second edition. New York: Springer New York. ISBN 978-0-387-21603-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-21603-4

BENADE, Arthur H., 1976. Fundamentals of musical acoustics [online]. New York: Oxford University Press. ISBN 978-0-486-15071-0. Dostupné z: <https://ccrma.stanford.edu/marl/Benade/writings/80s.html>

MORSE, Philip M. a Uno K. INGARD, [b.r.]. Theoretical Acoustics. B.m.: McGraw-Hill.

BÉCACHE, Eliane, Antoine CHAIGNE, Gregoire DERVEAUX a Patrick JOLY, 2005. Numerical simulation of a guitar. Computers & Structures [online]. 83(2–3), 107–126. ISSN 00457949. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruc.2004.04.018

DEBUT, V., J. ANTUNES, M. MARQUES a M. CARVALHO, 2016. Physics-based modeling techniques of a twelve-string Portuguese guitar: A non-linear time-domain computational approach for the multiple-strings/bridge/soundboard coupled dynamics. Applied Acoustics [online]. 108, 3–18. ISSN 0003682X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apacoust.2015.10.029

DERVEAUX, Grégoire, Antoine CHAIGNE, Patrick JOLY a Eliane BÉCACHE, 2003. Time-domain simulation of a guitar: Model and method. The Journal of the Acoustical Society of America [online]. 114(6), 3368–3383. ISSN 0001-4966, 1520-8524. Dostupné z: doi:10.1121/1.1629302

VIALA, Romain, Marco A. PÉREZ, Vincent PLACET, Antonio MANJÓN, Emmanuel FOLTÊTE a Scott COGAN, 2021. Towards model-based approaches for musical instruments making: validation of the model of a Spanish guitar soundboard and characterization features proposal. Applied Acoustics [online]. 172, 107591. ISSN 0003682X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apacoust.2020.107591

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá určením vlastných frekvencií a tvarov kobyľky klasickej gitary a ich vplyvu na funkciu gitary. Princíp funkcie gitary je popísaný kmitaním jednotlivých oscilátorov: struny, vzduchu v dutine tela gitary, vrchnej a spodnej dosky a následne ich funkcii ako celku. V bakalárskej práci sú rozobraté úlohy kobyľky a sú uvedené odlišné typy kobyľiek. Kobyľka je v práci uvažovaná ako samostatná komponenta a ako súčasť vrchnej dosky gitary. Vlastné tvary a frekvencie sú získané využitím modálnej analýzy, výpočtovým modelovaním pomocou metódy konečných prvkov. Vlastné frekvencie sú určené pre 2 typy kobyľiek, ďalej je vyhodnotený vplyv kobyľky na vlastné tvary a frekvencie vrchnej dosky gitary. Vlastné frekvencie kobyľky ovplyvňujú kvalitu a dĺžku tónu oscilujúcej struny, tóny blízke vlastným frekvenciám kobyľky vyznejú hlasnejšie a kratšie ako ostatné. Kobyľka mení tuhostné pomery vrchnej dosky a tak ovplyvňuje jej vlastné tvary a frekvencie.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the determination of the natural frequencies and mode shapes of a classical guitar bridge and their influence on the function of the guitar. The function of the guitar is described by the oscillations of the individual oscillators: the strings, the air in the cavity of the guitar, the top and bottom plates, and then by their oscillation as a system. In the bachelor's thesis the roles of the guitar bridge are discussed and the different types of guitar bridges are presented. In the thesis, the guitar bridge is considered as a separate component and as part of the guitar's top plate. The mode shapes and natural frequencies are obtained using modal analysis with the use of computational modelling using the finite element method. The natural frequencies are determined for 2 types of guitar bridges, the effect of the guitar bridge on the mode shapes and natural frequencies of the guitar top plate is further evaluated. The natural frequencies of the classical guitar bridge affect the tone quality and the duration of oscillation of the string. Tones close to the natural frequencies of the guitar bridge sound louder and last shorter amount of time than the others. The guitar bridge changes the stiffness of the top plate and thus influences its mode shapes and frequencies.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Vlastné frekvencie, vlastné tvary, kobyľka klasickej gitary, modálna analýza

KEYWORDS

Natural frequency, mode shapes, classical guitar bridge, modal analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ONDEČKO, Adam. *Modální analýza kobylky klasické kytary*. Brno, 2024. K dispozici aj z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157295..> Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedúci práce: Ing. Petr Hájek, Ph.D.

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, vypracoval som ju samostatne pod vedením vedúceho práce a s použitím literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú v práci citované a uvedené v zozname literatúry.

Ako autor tejto diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s jej vytvorením som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol neoprávneným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasl. autorského zákona č. 121/2000 Z. z. vrátane možných trestnoprávných dôsledkov.

V Brne dňa 24. 5. 2024

.....
Adam Onděčko

POĎAKOVANIE

Ďakujem hlavne môjmu vedúcemu, Ing. Petrovi Hájkovi Ph.D. za dobré rady a vedenie pri tvorbe bakalárskej práce. Tiež by som chcel poďakovať rodine ktorá mi dala možnosť štúdia a veľmi ma v ňom podporuje. Nakoniec by som chcel poďakovať kamarátom ktorý prechádzali bakalárskym štúdiom spoločne so mnou a pomáhali mi ho zvládnuť ale aj prežiť príjemne.

OBSAH

ÚVOD	15
1 Fyzikálne princípy funkcie gitary	17
1.1 Kmitanie	18
1.2 Konštrukcia gitary	24
1.3 Kobyłka	26
1.4 Funkcia gitary	29
2 Modálna analýza kobyłky gitary	39
2.1 Tvorba geometrie pre modálnu analýzu	39
2.2 Materiál	41
2.3 Vázby a kontaktné spoje	43
2.4 Sieť konečných prvkov	45
2.5 Výsledky modálnej analýzy	48
2.5.1 Kobyłka Schneider	48
2.5.2 Kobyłka nižšej kvality	51
2.5.3 Kobyłka Schneider uvažovaná ako súčasť vrchnej dosky gitary . . .	54
2.5.4 Kobyłka nižšej kvality uvažovaná ako súčasť vrchnej dosky gitary .	56
3 ZHODNOTENIE A DISKUSIA	59
ZÁVER	65
LITERATÚRA	68

ÚVOD

Hudba ako základný element kultúry, dáva svojou neustálou evolúciou impulz k inováciám hudobných nástrojov. Vývoj klasickej gitary je komplexným problémom z dôvodu širokého spektra hudobným možností ktoré je hráč klasickej gitary možný využiť. Pretože má klasická gitara svoje miesto v kompozíciách, kde je súčasťou hudobných zoskupení tak v sólových repertoároch, musia byť jej zvukové charakteristiky dostatočne špecifické a zreteľné, tak aby vyznela spomedzi ostatných hudobných nástrojov ale musia aj pokrývať široké spektrum tónov, tak aby sólové hudobné dielo vyznelo ako plnohodnotný umelecký zážitok.

Výrobcovia klasických gitár sú tak vedený k stálemu vývoju tohto nástroja. Ich cieľom je vytvoriť nástroj ktorý poskytne hráčovi vyvážený zvuk naprieč celým tónovým rozsahom gitary, s čo najväčším dynamickým potenciálom a dĺžkou hraných tónov. Výrobcovia tiež dbajú na estetickú stránku nástroja a jej neporuchovosť po dlhú dobu. Keďže je kobylka klasickej gitary sprostredkovateľom energie medzi strunou, ktorá určuje výšku hraného tónu a vrchnou doskou ktorá je základným komponentom určujúcim farbu a hlasitosť zvuku, môže analýza kobylky viesť k ďalším zlepšeniam klasickej gitary. Schopnosť výpočtového modelovania poskytuje ďalšie možnosti ako posunúť vývoj klasickej gitary vpred.

Cieľom bakalárskej práce je určiť vlastné tvary a frekvencie kobylky klasickej gitary a vyhodnotenie ich významu na funkciu gitary. Funkcia gitary je založená na princípe kmitania komponent oscilačného systému. Správanie týchto komponent je odlišné pri ich kmitaní samostatne oproti tomu ako sa komponenty správajú pri funkcii gitary keď sú spojené do jedného celku. Správanie sa oscilačného systému tak určuje kvalitu zvuku gitary. Ovplyvnená je jeho farba, dĺžka a hlasitosť. Fyzikálne princípy kmitania sú najskôr vysvetlené na všeobecných zjednodušených modeloch a sú následne aplikované na kmitanie jednotlivých komponent klasickej gitary a na jej funkciu ako celku. V práci sú popísané úlohy ktoré kobylka v konštrukcii gitary splňa a sú uvedené jej odlišné varianty. Pretože je kobylka klasickej gitary tvarovo zložitú teleso, na problém určenia vlastných frekvencií je využité výpočtové modelovanie metódou konečných prvkov. Kobylky klasických gitár sú vyrobené z dreva čo prináša ďalšiu komplexnosť problému a to ortotropnosť materiálu.

Výsledky práce by mohli poskytnúť nové poznatky o funkcii kobylky a tak dať ďalšiu možnosť výrobcovi klasickej gitary posunúť kvalitu nástroja vpred.

1 FYZIKÁLNE PRINCÍPY FUNKCIE GITARY

Z pohľadu hráča funguje gitara na jednoduchom princípe menenia dĺžky strún, ktoré následne menia výšku tónov. Hráč uchopením rôznych tvarov akordov alebo stlačením jednotlivých strún na hmatníku mení tóny ktorými gitara práve znie. Druhou rukou, pomocou brnkátka alebo prstami udáva struny do pohybu, dáva tónom požadovaný rytmus. Z fyzikálneho hľadiska sa gitara správa ako systém spojených oscilátorov. Struna udávajúca výšku tónu, budí kobylku a vrchnú dosku gitary, ktoré prenášajú energiu do vzduchovej dutiny, lubov a do jej spodnej dosky. Samotná struna je iba slabým zvukovým zdrojom, efektívne je zvuk vyžiarený cez vibrujúce dosky a cez rezonančný otvor gitary [7]. Systém spojených oscilátorov tak tvorí struna, vrchná doska s kobylkou, vzduchová dutina a spodná doska gitary. Každá z častí dokáže pracovať ako samostatný oscilátor s vlastnými typickými parametrami: **Vlastnými frekvenciami a tvarmi**. Výsledná odozva rezonátoru - (vlastnosť filtrácie a výberu harmonických komponent struny) je závislá na individuálnych charakteristikách oscilátorou a ich vzájomnou interakciou [5]. Výrobca môže návrhom konštrukcie ovplyvniť správanie sa jednotlivých komponent a ich interakciu. Pre pochopenie ako, budú v tejto kapitole najprv vysvetlené niektoré fyzikálne princípy prítomné pri funkcii gitary všeobecne (jednoduché kmitanie, vlastné tvary a frekvencie, kmitanie s viacerými stupňami voľnosti a membrán), následne bude popísaná konštrukcia gitary a nakoniec bude popísaná funkcia jednotlivých častí a ako naladenie určitých parametrov zmení správanie sa systému.

1.1 Kmitanie

Kmitaním podľa [2] rozumieme pohyb, pri ktorom sa kmitajúci objekt pohybuje striedavo okolo svojej rovnovážnej polohy. Tento pohyb je sprevádzaný časovou zmenou hodnoty určujúcej veličiny (napr. výchylky, rýchlosti, zrýchlenia, sily, a pod.), ktorá charakterizuje pohyb objektu a ktorej hodnota je striedavo väčšia alebo menšia než jej priemerná alebo referenčná hodnota.

Voľné kmitanie netlmenej sústavy

Model jednoduchého možného periodického pohybu si vieme predstaviť následovne: hmotný bod sa pohybuje translačným pohybom v jednej osi, jeho zrýchlenie je vzťahované k fixnému bodu a veľkosť zrýchlenia je závislá na vzdialenosti od daného fixného bodu. Tento pohyb nazývame jednoduchý voľný kmitavý pohyb [7]. Príklad systému pohybujúceho sa jednoduchým kmitavým pohybom, je hmotný bod pripevnený k pružine, znázornený na obr. 1. Pohybová rovnica (1) pre tento systém je získaná kombináciou Hookovho zákona pre lineárnu pružinu a Newtonovho druhého pohybového zákona.

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

kde k je tuhosť pružiny [Nm^{-1}], m [kg] je hmotnosť hmotného bodu, x [m] je výchylka z rovnovážnej polohy a $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$ [ms^{-2}].

Rovnica (1) je upravená na tvar

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (2)$$

kde $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ [Hz] je *vlastná uhlová frekvencia netlmenej sústavy*.

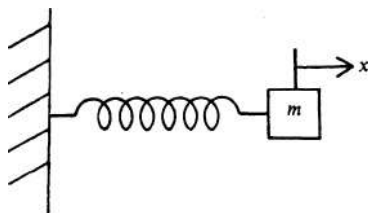
Vlastná uhlová frekvencia netlmenej sústavy [2] je vlastnosť daného telesa (sústavy) a je ovplyvnená jeho tuhosťnými a hmotnosťnými pomermi. Voľne kmitajúce teleso bude po uvedení do pohybu periodicky kmitať práve svojou vlastnou uhlovou frekvenciou.

Vlastná frekvencia f_0 [Hz] udáva, koľko opakovaní pohybu nastane za 1 sekundu.

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (3)$$

Periódá vlastných kmitov T_0 [s] udáva, za akú dlhú dobu sa začne pohyb opakovať.

$$T_0 = \frac{1}{f_0} \quad (4)$$



Obr. 1: Model kmitajúceho telesa na pružine [7]

Príklady jednoduchých oscilátorov

Okrem už zmieneného hmotného bodu na pružine, sú uvedené ďalšie príklady systémov konajúce jednoduchý harmonický pohyb ktoré sú využité na modelovanie funkcie gitary.

Piest pohybujúci sa v pružnom vzduchovom prostredí Piest s hmotnosťou m [kg], ktorý sa môže voľne pohybovať vo valci s plochou S [m²] a dĺžkou L [m] sa správa podobne ako hmotný bod pripevnený na pružine. Tuhostná konštanta vzduchu [Nm⁻¹] uzavreného vo valci sa rovná

$$k = \gamma \cdot p_a \frac{S}{L} \quad (5)$$

kde γ je adiabatická konštanta (pre vzduch rovná 1,41) a p_a [Pa] je atmosferický tlak. Podľa Fletchera a Rossinga [7] sa vlastná uhlová frekvencia systému sa spočíta vzťahom (6).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\gamma \cdot p_a \frac{S}{L \cdot m}} \quad (6)$$

Helmholtzov rezonátor Pre Helmholtzov rezonátor znázornený na obr. 2, hmotnosť vzduchu uzavreného v hrdle nádoby pracuje ako piest a priestor nádoby s objemom V [m³] funguje ako pružina. Hmotnosť vzduchu uzavreného v nádobe je rovná

$$m = \rho L S \quad (7)$$

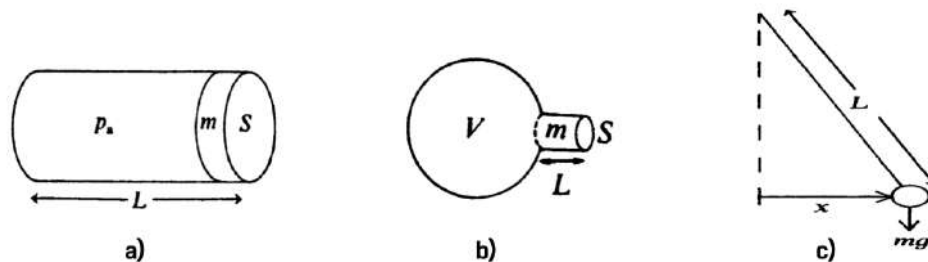
kde L [m] je dĺžka hrdla a S [m²] je plocha prierezu hrdla a ρ [kgm⁻³] je hustota vzduchu. Tuhostná konštanta pre objem V uzavretý v nádobe je rovná

$$k = \frac{\rho S^2 c^2}{V} \quad (8)$$

Kde c [ms⁻¹] je rýchlosť zvuku vo vzduchu. Vlastná uhlová frekvencia systému sa potom vypočíta podľa nasledovného vzťahu.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S c^2}{V L}} \quad (9)$$

Je vhodné podotknúť že podľa vzťahu (9) sa so zväčujúcim sa priemerom hrdla vlastná uhlová frekvencia systému rastie, čo sa prejaví vo vyššej frekvencii produkovaného zvuku [7].



Obr. 2: Príklady jednoduchých oscilátorov: a) piest pohybujúci sa v pružnom vzduchovom prostredí, b) Helmholtzov rezonátor, c) jednoduché kyvadlo [7]

Jednoduché kyvadlo Súčasťou jednoduchého kyvadla je hmotný bod m [kg] pripevnený na lane dĺžky l [m]. Takýto systém koná v gravitačnom poli zeme, po vychýlení z rovnovážnej polohy jednoduchý harmonický pohyb, ktorého vlastnú uhlovú frekvenciu určuje vzťah (10).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (10)$$

kde g [ms^{-2}] je gravitačné zrýchlenie. Pre platnosť toho vzťahu musia byť splnené predpoklady. Hmotnosť lana je zanedbateľná oproti hmotnému bodu, lano musí byť dokonale natiahnuté, nepružné a bez tlmenia, gravitačné pole je homogénne a rovnobežné, výchylka z rovnovážnej polohy je značne menšia oproti dĺžke lana. Vlastná uhlová frekvencia pre jednoduché kyvadlo nie je závislá na hmotnosti hmotného bodu.

Kmitanie s viacerými stupňami voľnosti

Kmitanie s jedným stupňom voľnosti je vhodným modelom na pochopenie niektorých fyzikálnych princípov, v praxi je ale len malé množstvo štruktúr popísateľné týmto modelom. Takmer univerzálne, všetky štruktúry s ktorými sa dostávame do kontaktu, tvoria viac či menej komplikovanú mechanickú sústavu s viac stupňami voľnosti [2]. Takéto sústavy je možné z fyzikálneho hľadiska považovať za množiny hmôt, ktoré sú medzi sebou prepojené pružinami a tlmičmi. Matematický model je tvorený sústavou navzájom prepojených pohybových rovníc, ktorých počet je rovný počtu stupňov voľnosti mechanickej sústavy. Takýto matematický model je možné previesť zo sústavy rovníc na jednu pohybovú rovnicu v maticovom tvare. Pre analýzu kmitania viacstupňových sústav je potrebné definovať pojem **vlastný tvar kmitu**. Pre vysvetlenie tohto pojmu uvažujme sústavu tvorenú pružnými telesami. Každé teleso sústavy môže kmitať nezávisle na ostatných a iba za určitých podmienok, sa všetky telesá budú pohybovať harmonicky s rovnakou frekvenciou. Pokiaľ sa všetky telesá pohybujú s rovnakou frekvenciou, dosahujú maximálnu výchylku v rovnakom čase, aj keď sa nepohybujú v rovnakom smere. Frekvencie, pri ktorých tento stav nastáva nazývame vlastnými frekvenciami sústavy. Týmto frekvenciám náležia odpovedajúce pohyby - **vlastné tvary kmitu**. Sústava má taký počet vlastných frekvencií a vlastných tvarov, koľko má stupňov voľnosti [2]. Vlastné tvary a frekvencie tvoria modálny model sústavy a s tlmením predstavujú modálne parametre. **Modálna analýza** je proces určovania modálnych parametrov. Je realizovateľná na teoretickej alebo experimentálnej báze. Teoretické riešenie spočíva v získaní modálneho modelu z fyzikálneho modelu sústavy na základe numerickej analýzy kmitania sústavy. Experimentálne sa modálne parametre získavajú na základe analýzy funkcií frekvenčných odoziev, ktoré sa získajú meraním na reálnej štruktúre.

Voľné kmitanie netlmenej sústavy s n stupňami voľností Pohybová rovnica netlmenej sústavy s n stupňami voľností pre voľné kmitanie má v maticovej forme tvar

$$[M] \{\ddot{x}\} + [K] \{x\} = 0 \quad (11)$$

kde $[M]$ je matica hmotností, $[K]$ je matica tuhostí, $\{x\}$ je vektor časovo premenných výchyliek.

Homogénne riešenie pohybovej rovnice predpokladáme v tvare

$$\{\ddot{x}(t)\} = \{\ddot{X}\} e^{i\omega t} \quad (12)$$

kde $\{\ddot{X}\}$ je vektor amplitúd funkcie $e^{i\omega t}$.

Pokiaľ je celá sústava schopná kmitať pri jednej frekvencii ω , je možné získať riešenie. Po dosadení predpokladaného homogénneho riešenia (12) do pohybovej rovnice (11) a následnej úprave dostávame.

$$([A] - \lambda[I]) \{X\} = \{0\} \quad (13)$$

kde $[I]$ je jednotková matica, $A = [M]^{-1}[K]$ a $\lambda = \omega^2$.

Vzťah (13) vedie na matematickú úlohu hľadania vlastných čísiel a vlastných vektorov matice $[A]$. Za predpokladu existencie nenulového riešenia, je netriviálne riešenie dané vzťahom

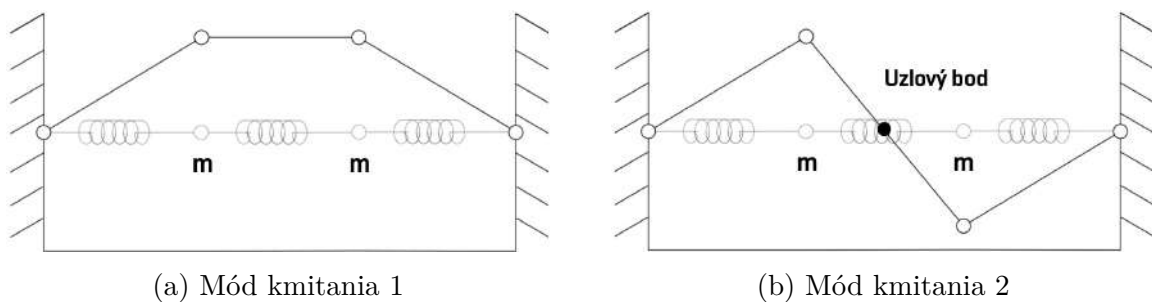
$$\det |[A] - \lambda[I]| = 0 \quad (14)$$

ktorej riešením sú vlastné čísla λ_r , kde $r = 1, 2, \dots, n$. Podľa vzťahu (15) je možné vypočítať vlastné uhlové frekvencie netlmenej sústavy.

$$\omega_{0r} = \sqrt{\lambda_r} \quad (15)$$

Dosadením jednotlivých vlastných čísiel do rovnice (13) získame množinu amplitúd harmonického kmitania $\{X\}$ jednotlivých hmôt, pri danej vlastnej frekvencii. Takýto vlastný vektor sa nazýva **vlastným tvarom/módom kmitu**. Vlastné tvary kmitu systému s 2 stupňami voľnosti sú uvedené na obr. 3.

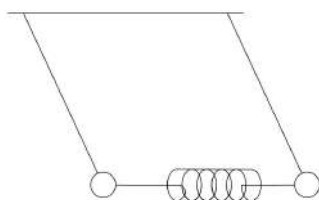
Hodnoty vlastných frekvencií sú exaktné ale vlastné tvary podliehajú neurčitosti mierky [2]. Táto neurčitosť neovplyvňuje ich tvar ale iba ich amplitúdu. Vlastný vektor nie je jednoznačný a preto rovnaký vlastný tvar môže reprezentovať viacero vlastných vektorov. Skutočné amplitúdy kmitov sú závislé na počiatočných podmienkach a na veľkosti a umiestnení pôsobiacich síl.



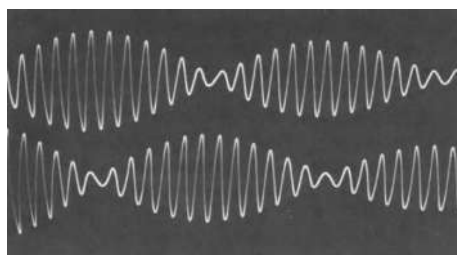
Obr. 3: Módy kmitania sústavy s 2 stupňami voľnosti, upravené podľa [2]

Spriahnuté oscilátory

Model spriahnutého oscilátoru vznikne spojením jednoduchých oscilátorou pomocou pružného člena. V nasledujúcom príklade na obr. 4 sú uvažované dve kyvadlá ktoré bez vzájomného prepojenia kmitajú samostatne, svojou vlastnou frekvenciou ktorá je daná vzťahom (10). Po ich prepojení pružinou nastáva ich vzájomná interakcia. Pokiaľ sú oba hmotné body vychýlené o rovnaké posunutie v kladnom smere, budú sa pohybovať s rovnakou frekvenciou, fázou a amplitúdou. Ak je jeden hmotný bod vychýlený oproti druhému v opačnom smere ale o rovnaké posunutie, hmotné body sa znova pohybujú s rovnakou fázou, frekvenciou ale opačnou amplitúdou. Takéto dva pohyby sú vlastnými módmí spriahnutých oscilátorou. Ak budú počiatkové podmienky pre hmotné body všeobecné (napríklad vychýlime iba jeden hmotný bod) začne proces výmeny energie medzi kyvadlami [7]. Prvé kyvadlo začne kmitať s maximálnou amplitúdou ale progresívne cez pružinu odovzdáva energiu druhému kyvadlu, ktorého amplitúda rastie až dokým sa prvé kyvadlo nezastaví. Tento pohyb je ukázaný na obr. 5 Takto sa proces opakuje. Jednotlivé kyvadlá už nekmítajú svojou vlastnou frekvenciou. Rýchlosť ktorou prenos energie nastáva je vyjadrená frekvenciou ω_c ktorá je závislá na tuhosti pružiny ktorá oscilátory spája. Pokiaľ je tuhosť veľmi malá, prenos energie je tiež nízky a preto sa oscilátory správajú podobne ako keby prepojené neboli, ich vlastné frekvencie budú blízke ich pôvodným (prípade keď kmitajú samostatne). Ak má spájací pružný člen tuhosť vysokú, bude prenos energie veľký, oscilátory sa tak budú pohybovať s vzájomne blízkymi frekvenciami. Medzi dvoma uvedenými extrémami existuje nekonečné množstvo situácií, ktoré vyjadruje väzbový koeficient, ktorý je závislý na tuhosti spájacieho člena a na pôvodných (nespojených) vlastných frekvenciách oscilátorou [5].



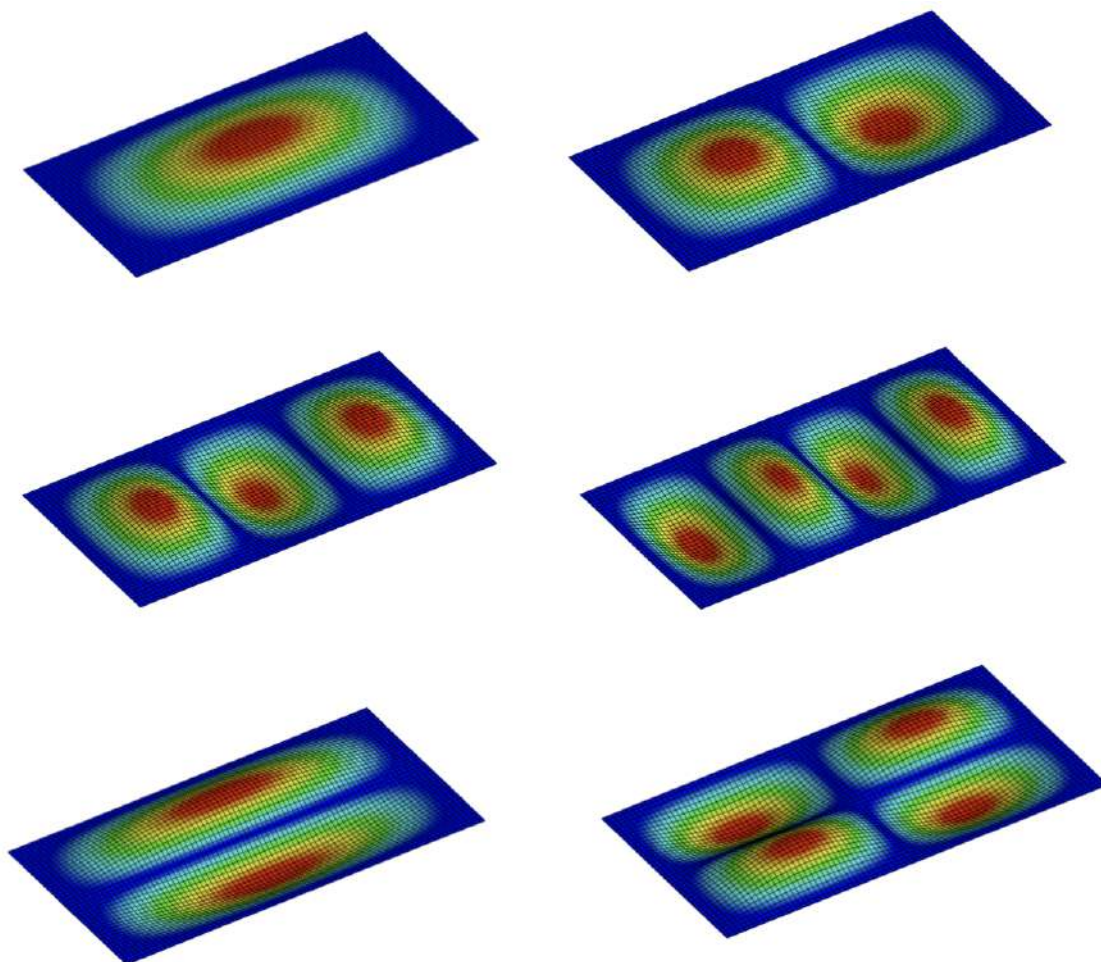
Obr. 4: Spriahnuté kyvadlá, upravené podľa [7]



Obr. 5: Pohyb dvoch spriahnutých oscilátorov (s tlmením), oscilátor A má nulovú počiatkovú výchylku, B nenulovú [7]

Kmitanie membrán

Kmitanie vrchnej a spodnej dosky gitary má podobnosť s kmitaním obdĺžnikových membrán. Pre obdĺžnikové membrány platia isté predpoklady: ťahová sila v membráne leží v smere tangenty k profilu membrány, sila tiaže membrány je malá v porovnaní s ťahovými silami v membráne, deformácia je malá v porovnaní s najmenším rozmerom membrány, membrána kmitá iba priečne [2]. Vlastné tvary a frekvencie sú závislé na zaväzbení membrány, hmotnostnými a tuhostnými pomermi membrány. Vlastné frekvencie nie sú celočíselnými násobkami fundamentálnej frekvencie tak ako je to v prípade obojstranne votknutej struny, rast vlastných frekvencií má komplexný priebeh. Tvary vlastných kmitov sú určené uzlovými priamkami¹ ktoré rozdeľujú segmenty ktoré kmitajú v protifáze. S narastajúcou vlastnou frekvenciou rastie počet uzlových priamok. Značenie (n,m) udáva počet prídavných uzlových priamok n - v pozdĺžnom smere, m - v priečnom smere. Na obr. 6 je uvedených prvých 6 módov kmitania membrány. Frekvencia módou na obr. 6 rastie po riadkoch.

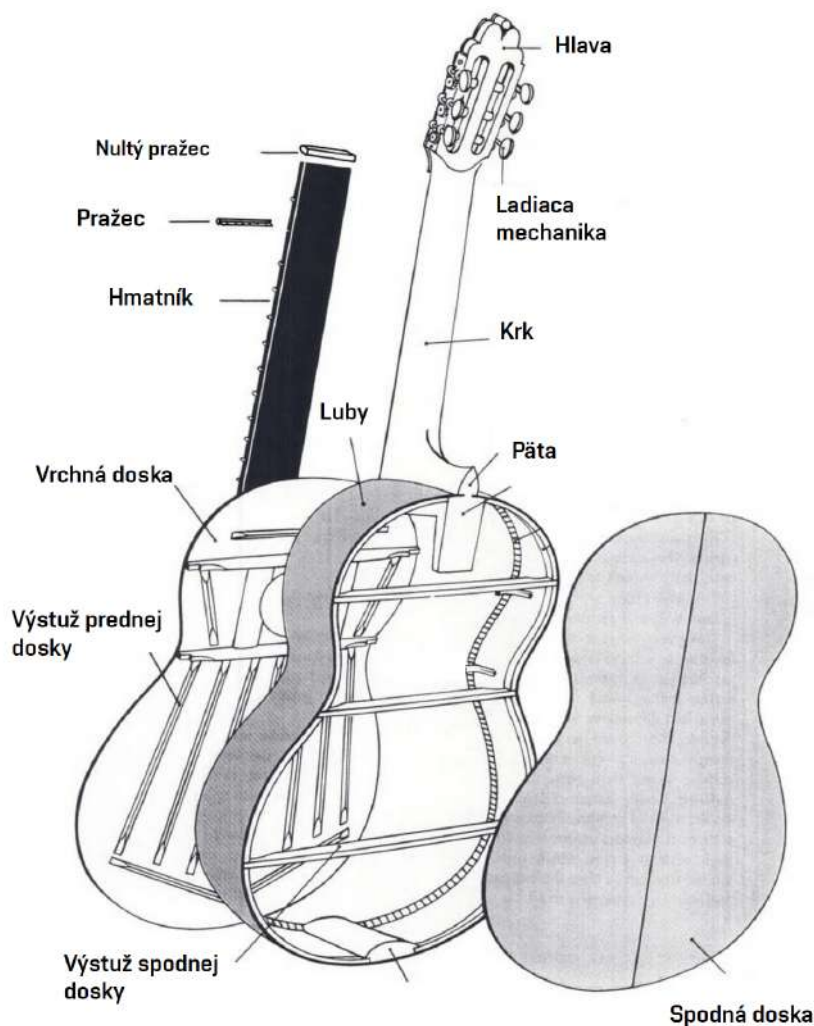


Obr. 6: Módy kmitania obdĺžnikovej membrány votknutej po obvodu, z ľava módy $(0,0), (0,1), (0,2), (0,3), (1,0), (1,1)$

¹Uzlové priamky určujú miesta s nulovou amplitúdou kmitania [1]

1.2 Konštrukcia gitary

Komponenty gitary sú znázornené na obr. 7.



Obr. 7: Konštrukcia gitary, upravené podľa [17]

Vrchná doska

Vrchná doska je jedným z troch hlavných oscilátorov gitary, jej dizajn má teda kritický vplyv na výsledný produkovaný zvuk. Vrchná doska mení vibrácie vytvorené strunami na vlastnú osciláciu, ktorá je dostatočná na to aby vytvorila akustickú zmenu tlaku do okolitého prostredia. Vrchná doska neamplifikuje pôvodnú osciláciu pretože samotná doska nie je zdrojom energie. Hrúbka vrchnej dosky sa pohybuje medzi 2 - 2,5 mm [5]. Pre správnu funkciu vrchnej dosky je dôležitý pomer medzi jej tuhosťou a váhou. Dosiahnutie požadovanej tuhosti je preferované použitím správne navrhnutých výstuží oproti zväčšeniu hrúbky vrchnej dosky. Drevo pre túto komponentu musí prejsť starnúcim procesom dlhým niekoľko rokov. Za tento čas doska stratí značnú časť svojej vnútornej vlhkosti, a začne proces polymerizácie živice obsiahnutej v dreve. Bežným materiálom je napríklad smrekové drevo alebo cédar [5]. Vrchná doska je vyrobená zlepením dvoch dosiek.

Luby

Luby plnia funkciu spájacieho člena medzi vrchnou a spodnou doskou. Z akustického uhlu pohľadu, reprezentujú periférnu väzbu medzi týmito dvoma členmi. Spolu tvoria telo gitary. Ich priemerná výška je približne 10 centimetrov, a spolu s doskami gitary uzatvárajú objem vzduchu o veľkosti pohybujúcej sa okolo 1800cm^3 [5]. Materiály používané pre luby sú tvrdé dreva ako napríklad: palisander, orech, mahagón, javor [19].

Spodná doska

Podobne ako vrchná doska, aj spodná doska je jedným z hlavných oscilátorov, podieľajúcim sa vo veľkej miere na tvorbe výsledného zvuku. Spodná doska je vyrobená prevažne z rovnakého dreva ako sú luby danej gitary, jej priemerná hrúbka je 2 mm [5]. Ako vrchná tak aj spodná doska je vytvorená zlepením dvoch dosiek, podľa dostupnosti správneho dreva, sa môže skladať aj z troch alebo viacerých častí. Pre spodnú dosku je typický vydutý tvar, ktorý je dosiahnutý prilepením zakrivených výstuží z vnútornej strany.

Krk

Krk gitary spĺňa najmä statické úlohy, marginálne sa ale podieľa na celkovej farbe zvuku nástroja. Krk gitary je vyrobený najčastejšie z mahagónu, cédaru alebo javoru. Pre zvýšenie odolnosti proti skrúteniu, je do krku vložená výstuž vyrobená z tvrdého dreva (ebenu alebo palisandru) [5].

Hlava

Na vrchnom konci krku sa nachádza hlava gitary. Jej úlohou je ukotvenie strún, ktoré sú pomocou ladiacej mechaniky napnuté. Na hlave gitary sa nachádza nultý pražec ktorý vedie struny k príslušným ladiacim mechanikám a určuje výšku strún nad hmatníkom. Hlava je súčasťou krku a v prípade klasických gitár je voči nemu zakrivená o $11^\circ - 12^\circ$ [5].

Hmatník

Väčšina kvalitných nástrojov má hmatník vyrobený z ebenu. Hmatník môže byť rovný alebo tvarovaný tak aby bola dosiahnutá požadovaná výška strún nad hmatníkom. Pražce sú na hmatníku rozmiestnené pravidlom osemnástich. Struna je rozdelená na 18 častí a následne je prvý pražec umiestnený v $\frac{1}{18}$ od nultého pražca [17]. Následne je dĺžka struny rozdelená na 18 častí od prvého pražca a ďalší pražec sa umiestní v $\frac{1}{18}$ od prvého pražca. Takto sa systém vkladania pražcov opakuje.

Struny

Klasická gitara má 6 strún ($E_2, A_2, D_3, G_3, B_3, E_4$) ($f = 82, 110, 147, 196, 247, 330$ Hz). Výškové struny (E, B, G) sú vytvorené z nylonového monofilamentu, basové struny sú tvorené tenkým medeným drôtom navinutým na nylonové jadro [11]. Oproti kovovým strunám majú nylonové struny plastový pocit na dotyk, sú mäkšie a majú jemnejší zvuk.

1.3 Kobyłka

Úlohou kobyłky je ukotvenie strún a prenos energie z kmitajúcich strún na vrchnú dosku gitary. Pri dizajne kobyłky je potrebné dbať na jej váhu, tuhosť a správnu polohu voči nultému pražcu a hmatníku. Pri zanedbaní niektorých parametrov môže byť kobyłka zodpovedná za ztráty energie a zhoršenie akustických parametrov gitary [6]. Flexibilný materiál kobyłky by vytváral nechcené energetické ztráty, materiál ktorý je príliš ťažký by negatívne vplýval na hlavné módy kmitania vrchnej dosky [5]. Materiál používaný pre kobyłky tak musí byť dostatočne ľahký a tuhý. Najčastejšie používanými materiálmi sú palisander a ebenové drevo. Výber medzi týmito dvoma možnosťami je rozhodnutý estetickými vlastnosťami gitary. Výrobcovia gitár sa často snažia použiť rovnaké drevo pre hmatník, povrchovú vrstvu hlavy alebo rozetu rezonančného otvoru, čím dosahujú ucelený estetický dojem [6]. Súčasťou kobyłky je aj sedlový pražec ktorého materiálové charakteristiky majú spĺňať rovnakú funkciu ako materiál kobyłky. Materiály používané pre sedlové pražce sú hlavne: kosť a slonovina [17]. Je ale možné použitie iných dostatočne tvrdých materiálov ako rohovina, perleť alebo sklo z estetických dôvodov [6]. Pre masovo vyrábané klasické gitary, ktorých cena má byť čo najnižšia, sú používané sedlové pražce vyrobené z plastu. Príklad kobyłky bežného dizajnu je uvedený na obr. 8.



Obr. 8: Kobyłka klasickej gitary Yamaha [20]

Krídla kobyłky

Ťahová sila strún musí byť vedená do tela gitary, z tohto dôvodu musí mať kobyłka krídla. Pomerne častá porucha gitár je formovanie trhlín na vrchnej doske gitary v miestach ukončenia krídiel kobyłky. Pravdepodobnosť tejto poruchy rastie s klesajúcou dĺžkou krídiel kobyłky [6]. V praxi sa rozpätie kobyłky pohybuje od 185-195 mm. Z dôvodu zníženia možnosti vytvorenia trhlín sa hrúbka koncov krídiel upraví na rovnakú alebo menšiu hrúbku, ako je hrúbka vrchnej dosky gitary. Dĺžka krídiel má vplyv aj na hlavné módy kmitania vrchnej dosky. Kobyłka z dlhými krídlami bude tlmiť módy kmitania (1,0) a (2,0). Pre zmenšenie tohto tlmenia je vhodné zmenšiť rozpätie kobyłky na 180 mm, čo je možné pokiaľ je lepený spoj prevedený korektne [6]. Skoro všetky dizajny krídiel kobyłky

sú symetrické, väčšinou tenké s prierezom (30x3mm) a s zaoblenými okrajmi. Výnimkou je dizajn Dr. Kashu, ktorý do svojej gitary implementoval nesymetrickú kobylku ktorá je širšia na strane basových strún a tenšia na strane strún vyšších tónov. Príklad takejto kobylky je na obr. 9. Takto vytvorená kobylka by mala zlepšiť prenos energie tým že basové noty prenáša na ľavú stranu vrchnej dosky a vysoké tóny na pravú stranu vrchnej dosky. Kobylka bola navrhnutá tak aby mala čo najmenšiu váhu, čím sa zlepšila jej schopnosť reakcie na impulzy struny [15]. Funkcia tohto dizajnu je zlepšená ak je hrúbka alebo výstuž vrchnej dosky tiež nesymetrická. Pokiaľ je vrchná doska vytvorená ako vypuklá s oblúkovým profilom majú krídla kobylky funkciu tento oblúk udržiavať. Táto funkcia je dosiahnuteľná ak je tuhosť kobylky vyššia ako tuhosť vrchnej dosky. Aby bola ale dosiahnutá požadovaná čo najväčšia homogénnosť flexibility vrchnej dosky, musí byť hmotnosť ktorú kobylka pridáva kompenzovaná lokálnym zmenšením hrúbky vrchnej dosky [6]. Pre gitary s rozšíreným rozsahom² je vhodné zväčšiť dĺžku basových strún z dôvodu zachovania rovnakého napnutia jednotlivých strún. Toto je možné dosiahnuť kobylkou ktorá je naklonená, tenké struny zostávajú na svojom pôvodnom mieste ale basové struny sú posunuté smerom od hlavy gitary. Príklad takejto kobylky je uvedený na obr. 10.



Obr. 9: Nesymetrická kobylka Kascha [18]

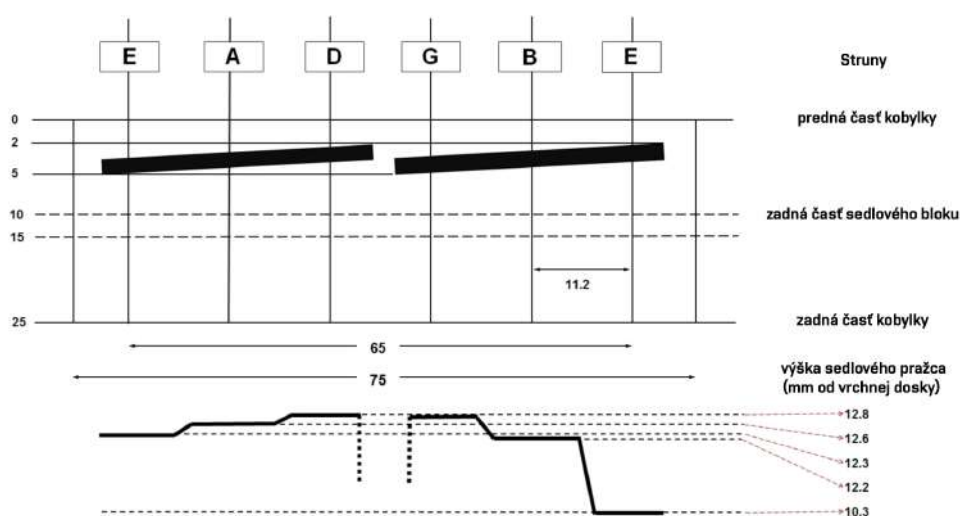


Obr. 10: Kobylka pre gitaru s rozšíreným rozsahom [13]

²Pre rozšírenie rozsahu sa pridáva siedma alebo ôsma struna (B_1, E_1).

Kompenzácia sedlovým pražcom

Pre dosiahnutie rovnomerného temperovaného ladenia³, je potrebné nastaviť exaktnú vzdialenosť medzi nultým pražcom a kobylkou gitary, dĺžku struny kompenzovať. Pri stlačení struny o hmatník a pražec je vplyvom ťahových síl frekvencia struny mierne zvýšená. Toto vytvára komplexný problém keďže toto zvýšenie je rozdielne, v závislosti o ktorý pražec práve hráč strunu opiera. Individuálne struny majú tiež rozdielnu tuhosť čo tak tiež vplýva na rozdielnu potrebu kompenzácie. Podľa štúdie Grega Bayersa [3] je vhodné použiť: kompenzáciu zväčšením vzdialenosti medzi sedlovým a nultým pražcom, čo má za následok predĺženie struny a kompenzáciu zmenšením vzdialenosti medzi sedlovým a nultým pražcom ale zvýšenie výšky sedlového pražca čím sa relatívna dĺžka stlačenej struny zväčší. Schéma kompenzácie pomocou sedlového pražca je uvedená na obr. 11.



Obr. 11: Schéma kompenzácie pomocou sedlového pražca, rozmery v mm, upravené podľa [6]

Výška sedlového pražca

Zmena výšky sedlového pražca ovplyvňuje hlasitosť produkovaného zvuku, podľa meraní Berta Eendebaka [6] sa pri zvýšení výšky sedlového pražca o 10 mm zvýši hlasitosť produkovaného zvuku o 10 dB. Zvýšením sedlového pražca o 10mm sa voľná⁴ struna predĺži o približne 0.25 mm, zmena energie struny je teda zanedbateľná, zlepši sa ale efektívnosť prenášania energie na vrchnú dosku. Zvýšenie sedlového pražca je ale obmedzené schopnosťou kobylky zniesť záťaž vytváranú strunami, kobylka by sa pri nadmernom zaťažení odtrhla od vrchnej dosky gitary. Zväčšenie výšky sedlového pražca má aj efekt na výšku strún oproti hmatníku, čo môže (pozitívne aj negatívne) ovplyvniť pocit hráča pri hre.

³Hudba západnej spoločnosti je prevažne založená na používaní rovnomerného temperovaného ladenia, ktoré zachováva konštantný pomer $2^{\frac{1}{12}}$ medzi frekvenciami poltónov [8]. Takýto systém dáva možnosť hrať vo všetkých 12 hudobných kľúčoch, pričom každý znie rovnako naladený.

⁴Je myšlená struna keď nie je sláčaná o pražec

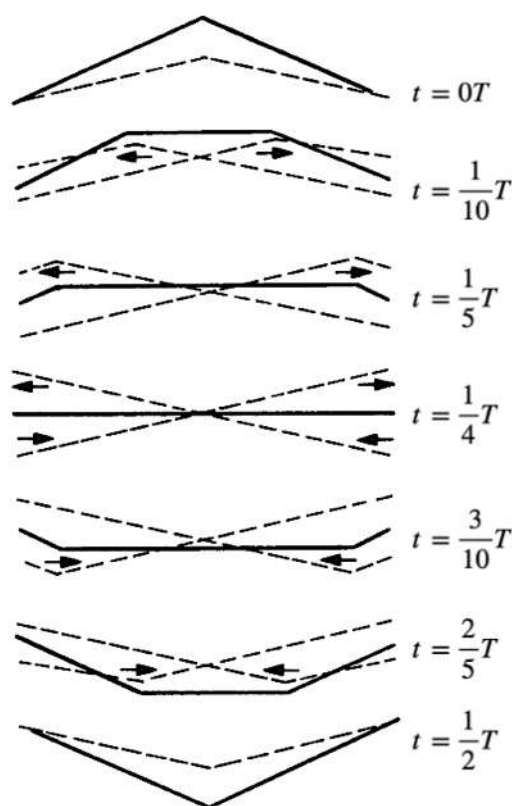
1.4 Funkcia gitary

Ideálna struna Struna je natahnutá a upevnená na dvoch koncoch (v kobyľke a nultom pražci), ktoré sú uvažované ako dokonale tuhé a nepohyblivé. Proces uvedenia struny do pohybu prebieha následovne. Nepohybujúca sa struna je posunutá zo svojej rovnovážnej polohy koncom prsta alebo brnkátkom a je následne pustená. Takto sú vytvorené 2 pohybujúce sa vlny, jedna smerom k nultému pražcu a druhá smerom k kobyľke gitary. Po dorazení ku koncom sa vlny odrážajú, pohybujú sa opačným smerom a navzájom sa približujú [5]. Rýchlosť šírenia vlny c [ms^{-1}] v ideálnej strune bez ztrát závisí na jej fyzikálnych vlastnostiach a jej stavu napnutosti podľa vzťahu (16).

$$c = \sqrt{\frac{T}{\rho A}} \quad (16)$$

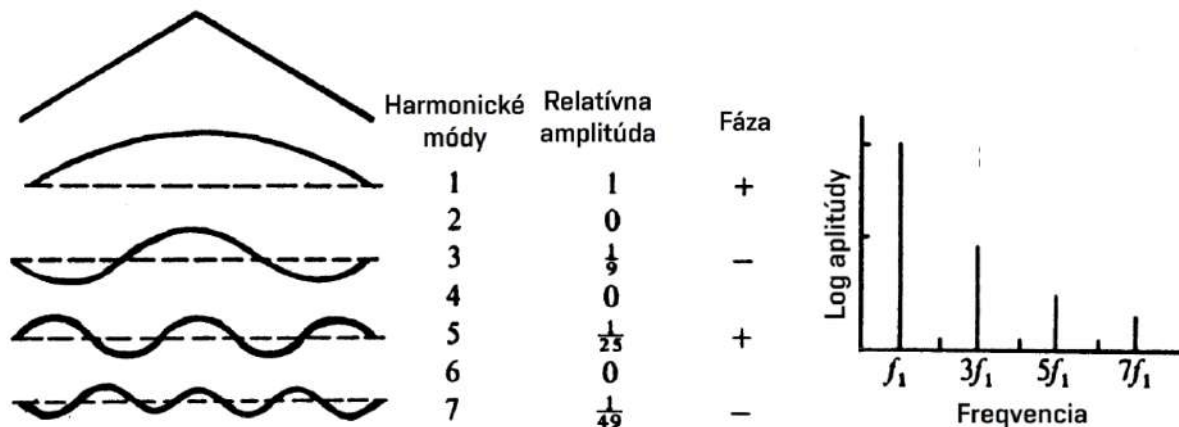
kde T [N] je sila pôsobiaca na napnutú strunu, A [m^2] je prierez v osovom smere a ρ je hustota materiálu [1].

Pri vzájomnom strete vln nastáva interferencia, ich odchýlky z rovnovážnej polohy sa sčítajú, na strune vytvoria miesta s nulovou amplitúdou (uzly) a maximálnou amplitúdou (kmitne). Výsledkom je komplexný pohyb struny ktorý závisí ako na jej mechanických vlastnostiach, tak na podmienkach excitácie tohto pohybu [5].



Obr. 12: Časová analýza pohybu struny rozpohybovanej v jej strede, prechádzajúca polovicou cyklu pohybu. upravené podľa [7]

Výsledný tvar struny v určitý okamžik je daný súčtom vlastných tvarov kmitu v danom momente, pričom každý mód môže zaujať navzájom odlišnú fázu v čase, nezávisle od ostatných⁵ [7]. Vlastné tvary ktoré môže táto struna nadobúdať určujú uzly (pri kobyľke a nultom pražci). Prvý vlastný tvar má podobu polvlny. Každý ďalší tvar pridáva na strunu jeden uzol a rozdeľuje ju na identicky dlhé časti. Prvý mód nazývame fundamentálny a struna sa pri ňom pohybuje prvou vlastnou frekvenciou pohybu. Následujúce harmonické frekvencie majú veľkosť celočíselného násobku fundamentálnej frekvencie [5]. Význam módov ale nie je rovnocenný. Ako vidieť na obr. 13, amplitúdy jednotlivých harmonických frekvencií sú odlišné, a ich vzájomný pomer vytvára charakteristickú farbu zvuku. [5] Za určitých podmienok je možné niektoré harmonické frekvencie potlačiť. Pri vychýlení struny zo svojej rovnovážnej polohy v mieste uzlu harmonickej frekvencie sa tento mód nevytvorí. Napríklad ak rozpoľujeme strunu v polovici jej dĺžky (mieste uzlu 2. módu kmitu), tak bude tento mód potlačený. Struna musí mať v tomto mieste najväčšiu amplitúdu a preto budú z vlastných frekvencií chýbať všetky tie, ktoré majú v polovici dĺžky struny uzol tj. štvrtý, šiesty atd. Fázy jednotlivých módov budú také, aby vytvorili v strede dĺžky najväčšiu amplitúdu vychýlenia [7]. Energia fundamentálnej frekvencie je 9 krát väčšia oproti energii 3. harmonickej frekvencii a 25 násobkom energie 5. harmonickej frekvencie [1]. Amplitúdy jednotlivých vlastných frekvencií rovnako závisia na mieste brnknutia. Pri hre bližšie pri kobyľke sa zväčšuje účasť vyšších harmonických frekvencií na celkovej farbe, zvýši sa ich amplitúda, zvuk sa stáva jasnejším a agresívnejším, naopak pri hre bližšie pri rezonančnom otvore je zvuk vyváženejší a mäkkší [5].



Obr. 13: Frekvenčná analýza struny rozpoľovanej v strede jej dĺžky, nepárne módy oscilácie sa s príslušnou amplitúdou a fázou sčítajú a vytvoria tak konečný tvar pohybu struny, upravené podľa [7]

⁵Hľadanie spektra vlastných módou struny je vykonané pomocou frekvenčnej alebo Furierovej analýzy [7]

Reálna struna

Pri uvažovaní ideálnej struny zanedbávame niektoré faktory ktoré na strunu pôsobia. V nasledujúcej časti textu budú tieto faktory vysvetlené.

V reálnej strune sa stojaté vlnenie nevytvorí v alternujúcu a nekonečne trvajúcu osciláciu ale toto kmitanie progresívne zanikne vplyvom tlmenia a struna sa tak znova dostane do svojej rovnovážnej polohy. Tlmenie struny je zapríčinené tromi ztrátovými mechanizmami. Vnútorne tlmenie, tlmenie okolitým vzduchom a prenosom energie do podpôr [5].

Vnútorne tlmenie Pri pohybe struny, sa na mikroskopickej úrovni v dôsledku viskoelasticity materiálu, struna predlžuje a jej priemer v dôsledku klesá a opačne skrakuje a jej priemer rastie. Tieto zmeny spotrebúvajú energiu struny ktorá je vyžiarená vo forme tepla [4]. Tento typ tlmenia má malý vplyv na kovové struny ale je významným faktorom pri tlmení nylonových strún. Čím častejšie tento jav nastáva tým je oscilácia utlmená rýchlejšie, z čoho plynie že kmitanie struny s nižšou frekvenciou bude mať svoj čas trvania dlhší oproti vyšším frekvenciám. Dĺžka nižších tónov hraných na gitare bude tak dlhšia ako vyšších [5].

Tlmenie okolitým vzduchom Oscilujúca struna nie je dobrým zvukovým žiaričom. Dôvodom je správanie struny ako dipólového zdroju, vytvárajúcu zhustenie vzduchu pred sebou a zriedenie vzduchu za sebou pri jej pohybe okolitým prostredím. Pretože je jej priemer malý tieto 2 efekty sa do veľkej miery vyrušia. Interakcia struny zo vzduchom je ale napriek tomu zásadná. Viskózný tok vzduchu okolo struny môže mať za určitých podmienok veľký podiel na jej tlmení [7]. Podľa Chaigne a Kergomard [4] sú straty vplyvom okolitého vzduchu podstatné pre pohyb s vyššou frekvenciou, a ich účinok môže byť potlačený využitím materiálov s vyššou hustotou.

Prenos energie Reálna struna je ukotvená na podporách ktoré nie sú dokonale tuhé. Nultý pražec zostáva relatívne nepohyblivý ale kobylka s telom gitary (tvoriaca rezonátor) vykonáva kmitavý pohyb ktorý je strunou vyvolaný. Na kobylku sa tak prenáša časť energie struny [5].

Interakcia struny a kobylky gitary

V momente, keď vlna dosiahne kobylku gitary, predtým ako sa vlna odrazí späť, pôsobí na kobylku silovým impulzom. Vlastnosti impulzu (amplitúda a dĺžka trvania) sú dané stavom pohybu struny, amplitúdou a frekvenciou fundamentálnych a harmonických módou kmitania [5]. Ako je uvedené v predchádzajúcej časti textu kobylka nie je dokonale tuhá a tak sa vlna neodrazí úplne. Z dôvodu pohyblivosti rezonátoru sa vlna odrazí iba čiastočne a jej zostávajúca časť je prijatá kobylkou. Časť energie je tak presunutá zo struny na rezonátor. Pri postupnom tlmení struny sa efekt impulzov sily pôsobiacich na kobylku stráca a po ustálení struny už ďalej rezonátor neovplyvňujú.

Jednou z charakteristických vlastností rezonátoru je jeho odpor. Ten dáva do vzťahu silu pôsobiacu na kobylku F_k a rýchlosť ktorou sa rezonátor pohybuje v_k [5].

$$Z_r = \frac{F_k}{v_k} \quad (17)$$

Ak sa v následku silového pôsobenia, kobylka s rezonátorom pohybujú rýchlejšie, sústava má väčšiu tendenciu oscilovať. Kladiet malý rezonančný odpor. Opačne ak je rýchlosť

malá aj pri veľkých silových pôsobeniach, je odpor veľký a sústava je tuhá. V tomto prípade sila nespôsobuje na kobyľke žiadne posunutie. Odpor rezonátoru závisí na jeho mechanických vlastnostiach a na interakcii pohybujúceho sa systému. Odpor odpovedá určitým frekvenciám, pre niektoré je veľký a pre iné malý. Malý odpor je kladený pre **rezonančné frekvencie oscilátoru**. Pre tieto frekvencie má oscilátor väčšiu tendenciu energiu zo struny prijať. Antirezonančné frekvencie sú také pri ktorých sa rezonátor nerozpohybuje a energia sa tak vráti do struny naspäť. Podobným odporom disponuje aj struna

$$R_c = \frac{T}{c} \quad (18)$$

kde c je rýchlosť šírenia vlny (16) a T [N] je sila v osovom smere struny [5]. Tento charakteristický odpor struny je nezávislý na frekvencii, a je rovnaký pre všetky módy kmitania.

Koeficient odrazu ρ reprezentuje odrazenú časť vlny k kontraste s vlnou prichádzajúcou [5].

$$\rho = \frac{R_c - Z_r}{R_c + Z_r} \quad (19)$$

Pre antirezonancie je koeficient odrazu rovný -1. Prichádzajúca vlna sa úplne odrazí, znamienko (-) značí že vlna bude mať opačnú orientáciu. V dôsledku odporu kobyľky, sa harmonická informácia struny (komponenty ich fundamentálnych a harmonických módov) filtrujú, niektoré tak zaniknú skôr ako ostatné [5].

Komponenty oscilačného systému

Oscilácia vzduchu v dutine gitary

Vzduch ktorý je obsiahnutý v dutine gitary sa správa ako osobitný kmitajúci systém. Oscilácia vzduchu v dutine je výsledkom propagácie tlakových zmien v médiu. Takýto systém má parametre (**vlastné frekvencie a tvary**) ktoré sú určené fyzikálnymi vlastnosťami média a tvarom a veľkosťou nádoby v ktorej sa médium nachádza. Vlastné tvary oscilácie vzduchu sa správajú podobne ako vlastné tvary membrány s voľným koncom. Kmitajúci vzduch nie je v tangenciálnom smere obmedzený stenami tela gitary, čo zapríčiniť absenciu uzlovej priamky po jej okrajoch [5]. Pri oscilácii na fundamentálnej frekvencii sa systém správa podobne ako Helmholtzov rezonátor. Vyššie harmonické módy sa podobajú na stojace vlnenie v obdĺžnikovej nádobe [7]. Pre následujúce teoretické určenie módov kmitania uvažuje správanie sa systému ako dutiny s tuhými stenami [1].

Helmholtzova rezonácia V dôsledku že vlastná frekvencia Helmholtzovho rezonátoru (9) nezávisí na tvare nádoby, môže byť tento vzťah po úprave použitý pre výpočet fundamentálnej frekvencie vzduchu oscilujúceho v tele gitary. Vzduch zaujíma vlastný tvar (0,0) a jeho vlastná frekvencia sa pohybuje medzi (176-121 Hz). Frekvencia je závislá na objeme vzduchu obsiahnutého v dutine gitary a s rastúcim objemom klesá [5].

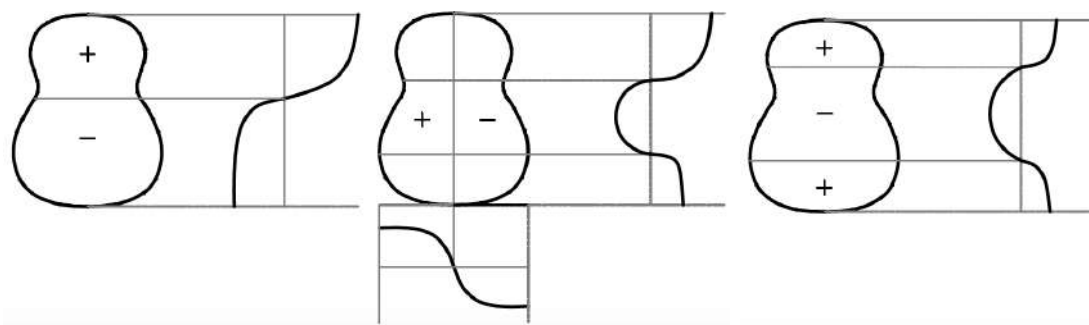
Mód (0,1) Prvý harmonický mód pridáva priečnu uzlovú priamku tesne pod najužšie miesto tela gitary. Obr. (14a) ilustruje maximum tlakovej vlny ktorá sa šíry smerom pozdĺžnej osi dutiny gitary. Pohyb vlny zaujíma tvar podobný strune s voľnými koncami. Dva vzduchové objemy pod a nad uzlovou priamkou kmitajú v navzájom opačných fázach. V dôsledku asymetrie tela gitary je tlakové maximum väčšie nad uzlovou priamkou kde je objem menší [5]. Vlastná frekvencia je vypočítateľná podľa vzťahu $f = \frac{c}{2l}$ kde c je rýchlosť zvuku vo vzduchu a l je pozdĺžne rozpätie dutiny. Fletcher a Rossing [7] udávajú vlastnú frekvenciu tohto módu 383 Hz.

Mód (1,0) Ďalší relevantný mód oscilácie pridáva pozdĺžnu uzlovú priamku, takto je objem dutiny rozdelený na pravú a ľavú časť ktoré kmitajú v protifáze. Tento mód definuje priečnu polvlnovú rezonanciu. Tvar kmitania má 2 uzlové body na pozdĺžnej osi [5]. Pre moderné gitary sa táto rezonancia pohybuje v rozmedzí (550-600 Hz). Vlastný tvar kmitania uvedený na obr. (14b).

Mód (0,2) Mód (0,2) s dvoma priečnymi uzlovými priamkami rozdeluje dutinu na 3 objemy kmitajúce v alternujúcich fázach. Dĺžka tlakovej vlny je rovná pozdĺžnemu rozmeru tela gitary. Vlastná frekvencia pre tento mód sa pohybuje v okolí 722 Hz [7]. Vlastný tvar uvedený na obr (14c).

Vyššie harmonické tvary Vzduch v dutine gitary môže zaujať nekonečné množstvo tvarov kmitov ktoré sú určené priečnymi a pozdĺžnymi uzlovými priamkami. Ich podiel na výslednej funkcii gitary s rastúcou frekvenciou klesá.

Po navrhnutí tela gitary už výrobca nedokáže vlastné tvary a frekvencie oscilujúceho vzduchu ovplyvniť. Pri optimalizácii návrhu spodnej a vrchnej dosky ale berie na ohľad spojenie týchto oscilačných systémov.



(a) Múd (0,1) $f = 395$ Hz (b) Múd (1,0) $f = 580$ Hz (c) Múd (0,2) $f = 725$ Hz

<

Obr. 14: Múdy kmitania vzduchu v dutine gitary, upravené podľa [5]

Oscilácia vrchnej dosky

Vrchná doska gitary osciluje veľkým počtom módov a im príslušným vlastným frekvenciami. Vlastné tvary kmitu nižších frekvencií majú podobnosť s vlastnými tvarmi obdĺžnikovej membrány zmienenej v podkapitole (1.1) [7]. V dôsledku zložitosti tvaru vrchnej dosky gitary nie sú vlastné tvary a frekvencie spočítateľné analyticky, na ich vyhodnotenie sa preto využívajú dve hlavné metódy a to: experimentálne meranie, ktoré umožní vyhodnotenie módov kmitania konkrétnych reálnych komponent a určenie vlastných frekvencií virtuálnym modelom pomocou metódy konečných prvkov. Výhodou modelovania pomocou metódy konečných prvkov je možnosť zmeny parametrov (materiálových charakteristík, väzieb alebo tvaru komponent) a následné vyhodnotenie týchto zmien. Experimentálne metódy dávajú presnejšie výsledky ktoré s väčšou určitosťou odrážajú módy kmitania pre danú komponentu. Nie sú zaťažované neurčitostou niektorých charakteristík ktoré do matematického modelu zadávame (napr. Youngov modul pružnosti, hustota materiálu, Poissonov pomer) [5].

Vlastné tvary a frekvencie sú odlišné v závislosti na ich zaväzbení. Pri testovaní sa uplatňuje model s voľným, votknutým a podopretým okrajom [7]. Reálna väzba medzi vrchnou doskou a lubmi gitary sa nespráva ako dokonale votknutá ani podopretá ale v ich rozmedzí. V dôsledku elasticity oboch komponent je umožnená určitá pohyblivosť po obvode vrchnej dosky. Táto väzba je ovplyvnená konštrukčnými parametrami (prevedením spoja medzi lubmi a vrchnou doskou alebo počtom a tvarom priečných výstuží) [5]. V nasledujúcich príkladoch budú uvedené módy kmitania vypočítané modelom s votknutým okrajom alebo módy zistené experimentálne. Na obr. 15 sú znázornené experimentálne zistené módy kmitania klasickej gitary, ktorá je prilepená k znehybneným lubom.

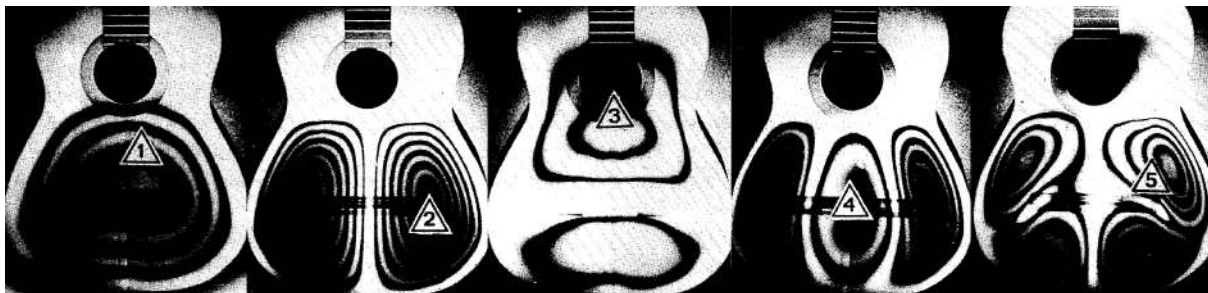
Mód (0,0) Múd (0,0) je hlavným módom oscilácie vrchnej dosky gitary. Okrem nepohyblivého okraja nemá tento tvar žiadne uzlové priamky. Táto vlastná frekvencia spolu s Helmholtzovou frekvenciou (zmienenou v predchádzajúcej podkapitole (1.4)) hrá zásadnú rolu v určení hlavných rezonancií gitary [5]. Fletcher a Rossings [7] udávajú frekvenciu pre tento mód 163 Hz.

Mód (1,0) Tento mód je odlišený pozdĺžnou uzlovou priamkou. Tento mód môže efektívne prispievať k zvukovému žiareniu vrchnej dosky pokiaľ je výstužami vytvorená asymetria medzi pomerom hmotnosti a plochy pravej a ľavej časti [5]. Táto frekvencia sa pohybuje v okolí 300 Hz.

Mód (0,1) Pre mód (0,1) sa priečna uzlová priamka nachádza v blízkosti kobyľky gitary. Typické vlastné frekvencie sa pohybujú od 380 do 480 Hz. Túto rezonanciu podporuje prítomnosť kobyľky a priečných výstuží.

Mód (2,0) Vlastná frekvencia je v rozmedzí od 550 - 600 Hz. Dve uzlové priamky sú vedené pozdĺž tela gitary. Je možná väzba medzi módom kmitania vzduchu (1,0) pokiaľ majú 3 kmitajúce plochy v súčte pozitívny efekt na pravý a ľavý mód kmitania objemu vzduchu [5].

Mód (1,1) Hlavné oscilujúce plochy sa koncentrujú v nižšej časti tela gitary ktorú rozdeľuje pozdĺžna uzlová priamka. Kmitajúce fázy tvoria mriežkovú štruktúru. Tento mód môže vhodne interagovať s módom kmitania vzduchu (0,2) [5]. Vlastné frekvencie sa pohybujú v rozmedzí 580 - 640 Hz [7].

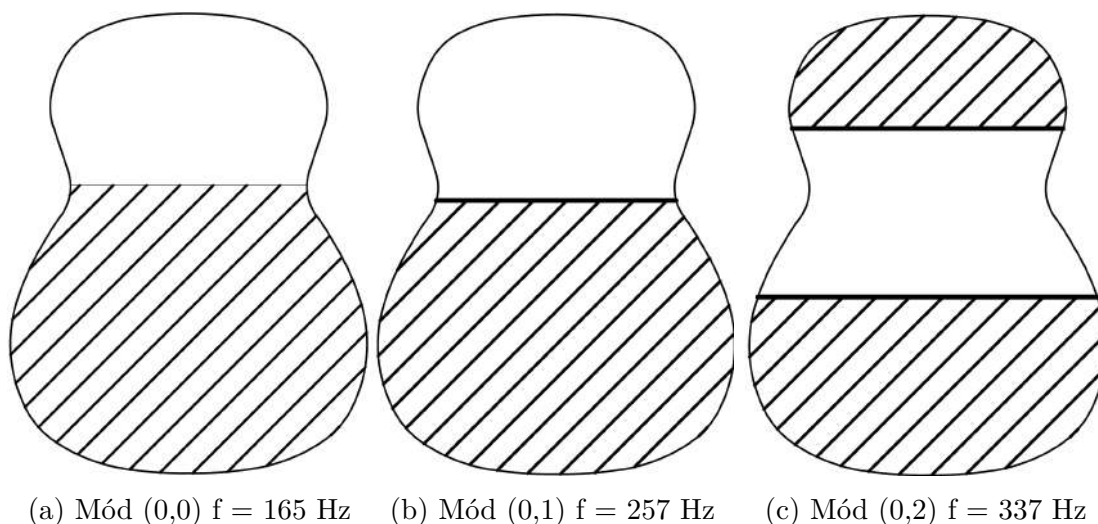


Obr. 15: Módy kmitania vrchnej dosky klasickej gitary zistené experimentálne [12]

S narastajúcou frekvenciou sa vrchná doska rozdeľuje na progresívne viac zmenšujúcich sa častí, ktorých energia sa zhromažďuje v dolnej časti gitary. Tvary kmitov sú jasne definované pre nižšie a stredné frekvencie do približne 800 Hz. Nad túto hranicu majú módy tendenciu zblížovať sa - sú produkované excitáciou 2 alebo viacerých módov blízko seba a tak vytvárajú kontinuálnu rezonančnú plochu [5].

Oscilácia spodnej dosky

Spodná doska sa z pohľadu kmitania správa podobne ako vrchná, jej vlastné tvary nižších frekvencií sa podobajú na tvary obdĺnikovej membrány. Tak ako oscilácia vrchnej dosky tak aj oscilácie spodnej, interaguje s kmitaním vzduchu v dutine gitary, znova najmä s najnižším módom (Helmholtzovou rezonanciou). Výstuž spodnej dosky je od vrchnej odlišná a preto budú hlavné módy kmitania odlišné a posunuté v frekvencii. Elastické správanie spodnej dosky ovplyvňujú typické priečne výstuže, ohyb v priečnom smere je takmer znemožnený. Všetkým hlavným tvarom kmitu tak chýba pozdĺžna uzlová priamka [5]. 3 hlavné módy kmitania a ich príslušné vlastné frekvencie pre model s votknutými okrajmi sú uvedené na obr. 16.



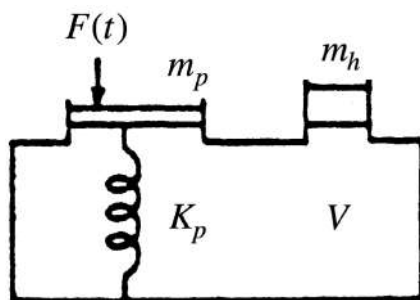
(a) Múd (0,0) $f = 165$ Hz (b) Múd (0,1) $f = 257$ Hz (c) Múd (0,2) $f = 337$ Hz

<

Obr. 16: Módy kmitania spodnej dosky, upravené podľa [5]

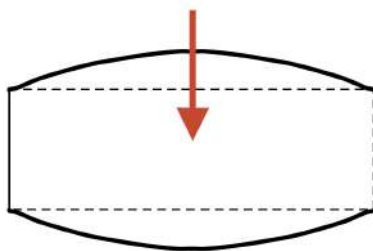
Model spriahnutých oscilátorov

Po prilepení prednej a zadnej dosky k lubom vzniká spojením komponent objekt s novými špecifickými vlastnosťami (vlastné tvary kmitu a frekvencie, ich amplitúdy a tlmiaci proces). Globálne správanie takéhoto nového systému závisí na správaní individuálnych komponent ale nie je im odpovedajúce. Konečnú funkciu systému určujú interakcie medzi elementárnymi oscilujúcimi komponentami. Schématické znázornenie spriahnutého oscilátoru je na obr. 17 [12].



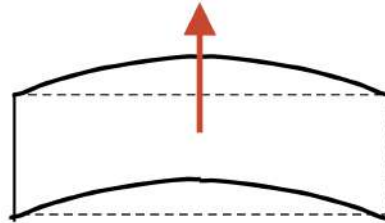
Obr. 17: Schéma modelu gitary pracujúceho ako systém spriahnutých oscilátorov. Kmitajúce struny pôsobia silou $F(t)$ na vrchnú dosku gitary ktorej hmotnosť a tuhosť sú reprezentované m_p a K_p . Vzduchový piest s hmotnosťou m_h predstavuje masu vzduchu v rezonančnom otvore gitary. Vzduch obsiahnutý v dutine (V) gitary pracuje ako druhý pružný člen. upravené podľa [7]

Frekvenčná odozva systému je charakterizovaná radom rezonancií a antirezonancií ako na obr. (20). Správanie sa rezonátoru je pre nízke a stredné frekvencie definované dvomi evidentnými rezonanciami. Nižšia sa pohybuje v rozmedzí 90 - 110 Hz, vyššia v rozmedzí 180 - 220 Hz všeobecne o oktávu vyššie oproti nižšej. Tieto dve rezonancie sa vyskytujú v každej gitare nezávisle na jej charakteristikách pretože sú závislé na základnej konštrukcii rezonátoru, ktorá je pre všetky klasické gitary rovnaká (predná a zadná doska s vzduchom v dutine) [5]. Prvá rezonancia je nazývaná **rezonancia vzduchu** a jej pohyb je znázornený na obr. 18. Vrchná a spodná doska sa pohybujú v proti fázy (keď sa vrchná doska pohybuje nahor tak sa spodná pohybuje nadol) čo zapríčiní že sa objem dutiny gitary zväčší a vzduch tak prúdi do vnútra tela. V opačnom prípade sa dutina gitary znižuje a vzduch prúdi von. Pohyb vzduchu je oproti vrchnej doske v proti fázy. Pre tento prípad pohyb dosiek znižujú tuhosť vzduchu obsiahnutého v dutine, čo má za následok zníženie rezonančnej frekvencie - z pôvodnej Helmholtzovej rezonancie na rezonanciu vzduchu. Cuzzucoli a Garrone udávajú posun zo 129 Hz na 93 Hz [5].



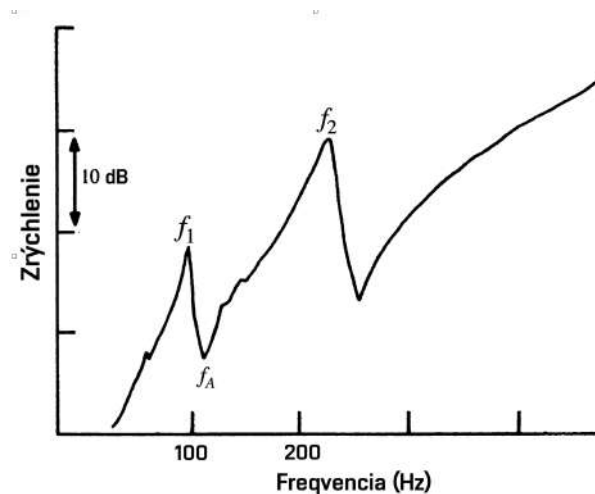
Obr. 18: Pohyb gitary a vzduchu pri prvej rezonancii [5]

Pre druhú rezonanciu (nazývanú **rezonancia vrchnej dosky**) sa sa vrchná a spodná doska pohybujú vo fáze (obe sa pohybujú nahor v ten istý čas) obr. 19. Vzduch v tomto prípade prúdi v rovnakom smere ako sa pohybuje vrchná a spodná doska. Dva zdroje zvuku sú tak v rovnakej fáze, z toho dôvodu bude druhá rezonancia sprevádzaná silným žiarením zvuku [7]. Vzduch v dutine správajúci sa ako pružina pôsobí proti pohybu vrchnej a spodnej dosky čo zapríčini zvýšenie rezonančnej frekvencie vrchnej dosky. Druhá rezonančná frekvencia sa zvýšila zo 153 Hz ⁶ na 213 Hz udávajú Cuzzucoli a Garrone vo svojom meraní [5].



Obr. 19: Pohyb gitary a vzduchu pri druhej rezonancii [5]

Medzi týmito dvomi prípadmi (prvá a druhá rezonancia) leží opačný extrém. Tento prípad nastane keď je rýchlosť vrchnej dosky rovnaká ale opačná k rýchlosti pohybu vzduchu. Rýchlosť aj posunutie z rovnovážnej polohy vrchnej dosky sú tak nulové. Tento bod sa vyskytuje v okolí Helmholtzovej rezonancie. Na obr. 20 je znázornený ako antirezonancia medzi f_1 a f_2 . Pre túto frekvenciu je žiarenie zvuku skoro nulové.



Obr. 20: Rezonancie gitary [7]

⁶Táto frekvencia odpovedá votknutej vrchnej doske ktorá kmitá vo voľnom vzduchu (bez dutiny tela gitary.)

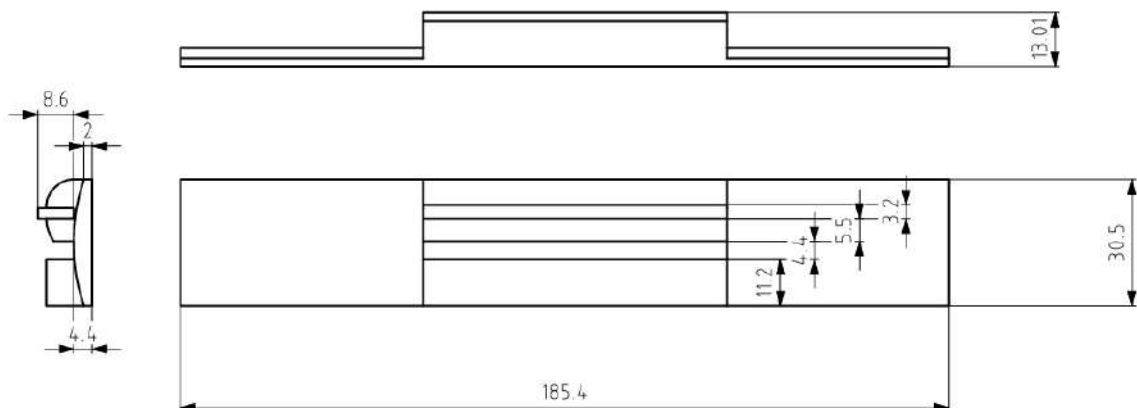
2 MODÁLNA ANALÝZA KOBYLKY GITARY

2.1 Tvorba geometrie pre modálnu analýzu

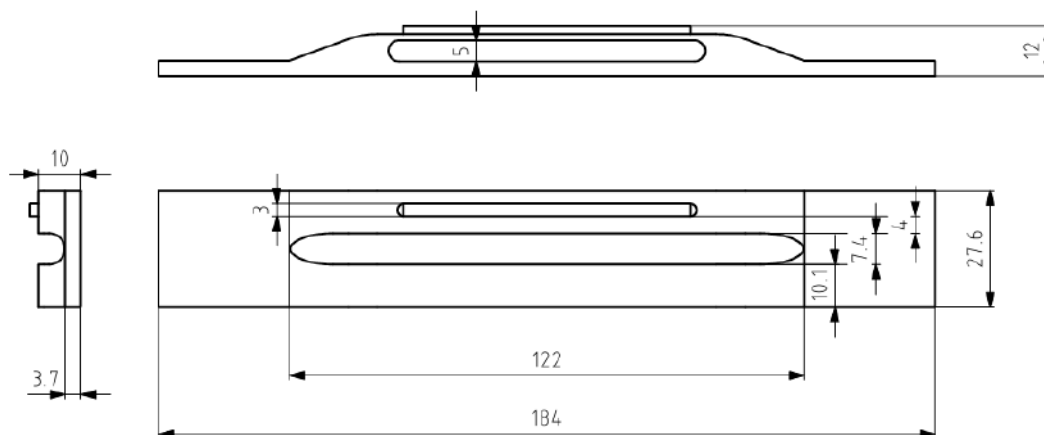
Pre dosiahnutie výsledkov, ktoré odpovedajú do čo najväčšej miery realite, je rozhodujúce správne navrhnutie geometrie daného problému. Pre modálnu analýzu bol vytvorený model kobyľky so sedlovým pražcom a model vrchnej dosky tela gitary.

Kobyľka Schneider a kobyľka nižšej kvality

Vytvoreniu geometrického modelu, predchádzalo manuálne zmeranie rozmerov kobyľky Schneider. Súčasť je relatívne jednoduchá, skladá sa iba z jedného kusu dreva a preto bolo s dostatočnou presnosťou možné zmerať jej rozmery iba pomocou posuvného meradla. Na obr. 21 sú vidieť základné rozmery kobyľky, tvarové prvky ako polomery boli vo virtuálnom modeli navrhnuté tak, aby vizuálne odpovedali reálnej kobyľke. Na základe nameraných rozmerov bol vytvorený 3D model v programe Autodesk Inventor. Model sedlového pražca je oproti realite zjednodušený, drážky pre správne smerovanie strún nie sú vytvorené. Takéto malé tvarové prvky by komplikovali sieť konečných prvkov a výsledky by zásadne neovplyvnili. Model sedlového pražca je vytvorený ako kváder s rozmermi $(90 \times 3,2 \times 8,6)$ mm. Z dvoch komponent bola vytvorená zostava, ktorá tvorí geometriu kobyľky. Kobyľka bola nainportovaná do geometrie programu Ansys Workbench vo formáte .step. Rovnaký proces vytvárania geometrie bol použitý pre kobyľku nižšej kvality získanej z relatívne lacnejšieho modelu gitary. Na obr. 22 sú uvedené jej základné rozmery.



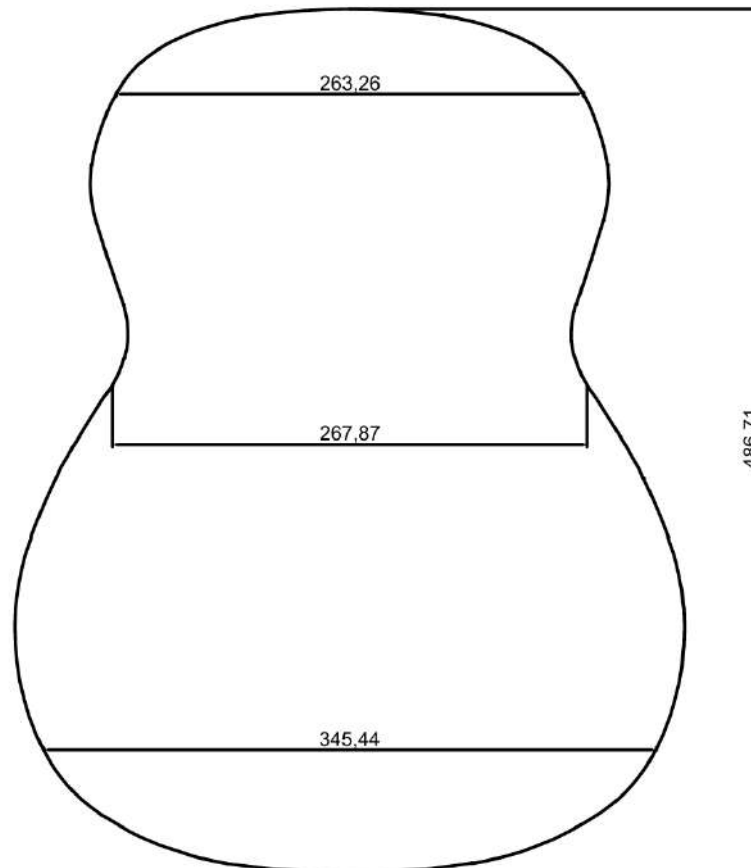
Obr. 21: Rozmery kobyľky Schneider (mm)



Obr. 22: Rozměry kobylinky nižší kvality (mm)

Vrchná deska gitary

Tvar gitary nie je presne definovaný a líši sa medzi výrobcami tvarom aj veľkosťou. Pôvodný návrh tvaru tela býva väčšinou kreslený rukou a preto nie je jednoducho popísateľný. Výrobcom udávajú základné rozmery ako dĺžka tela alebo šírku v najužšom a najširšom mieste. Tieto rozmery nie sú pre vytvorenie modelu dostačujúce. Obrys vrchnej dosky je v technických kresliciach programoch nutné definovať pomocou kriviek, tieto krivky ale nie sú jednoducho zmerateľné. Obrys vrchnej dosky bol nakreslený z dát pre profil gitary Garrone prevzatý z [5]. Rozmery tejto gitary odpovedajú gitare veľkosti 4/4. Tieto dáta boli získané pomocou počítačového spracovania, ktoré napravilo chyby vytvorené pri ručnom kreslení. Polovičný profil je tvorený 16 krivkami definovanými absolútnymi súradnicami stredu, začiatku a konca jednotlivých kriviek, vyjadrené v centimetroch. Ďalej je definovaná ich konkávnosť (vnútorná -, vonkajšia +) [5]. Obrys tela bol vytvorený v programe Autocad a bol vložený do geometrie programu Ansys. V editore geometrie Design modeler bol z náčrtu obrysu vytvorený povrch. Do tohto povrchu bola ešte vytvorená diera reprezentujúca rezonančný otvor gitary. Základné rozmery vrchnej dosky sú uvedené na obr. 23.



Obr. 23: Rozmery vrchnej dosky (mm)

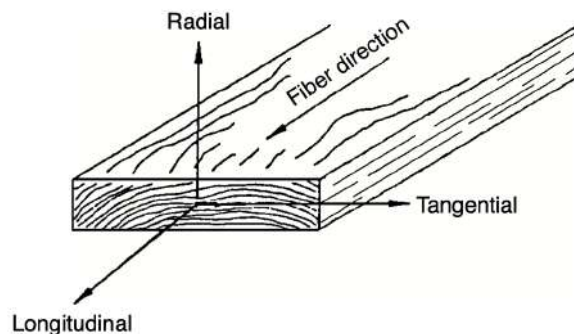
2.2 Materiál

Vo výpočtovom modeli bol pre komponenty vyrobené z dreva použitý ortotrópny model materiálu. Materiálové charakteristiky dreva (poissonova konštanta, modul pružnosti v ťahu, modul pružnosti v šmyku) sú uvedené v tabuľke 1, hustota palisandru je $900 \text{ [kgm}^{-3}\text{]}$ [16], hustota smrekového dreva je $470 \text{ [kgm}^{-3}\text{]}$ [14].

Tabuľka 1: Materiálové charakteristiky pre palisander(a) [16] a smrekové drevo [14] (b), (moduly pružnosti v MPa)

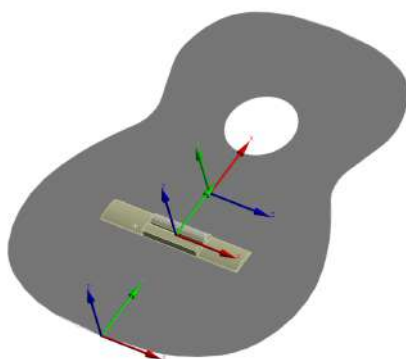
	$E_l(E_x)$	$E_t(E_z)$	$E_r(E_y)$	$\mu_{LR}(\mu_{xy})$	$\mu_{lt}(\mu_{xz})$	$\mu_{rt}(\mu_{yz})$	$G_{lr}(G_{xy})$	$G_{lt}(G_{xz})$	$G_{rt}(G_{yz})$
a)	13700	589,1	1068	0,372	0,467	0,435	876,8	835,7	41,1
b)	12000	900	500	0,604	0,641	0,297	700	700	40

Ortotrópny model materiálu má rozdielne tuhostné vlastnosti v závislosti na troch hlavných osiach. Drevo má najväčšiu tuhosť v smere rovnobežnom s pozdĺžnym natočením vlákien. Radiálny smer určuje prírastok letokruhov štruktúre dreva. Tangenciálny smer je na oba zmienené kolmý. Usporiadanie hlavných osí určujúce materiálové charakteristiky dreva sú znázornené na obr. 24.



Obr. 24: Hlavné osy dreveného materiálu [14]

Poissnove konštanty vyjadrujú ako sa teleso zdeformuje v smere kolmom na smer zataženia. Označenie poissnovej konštanty μ_{LR} vyjadruje vzťah deformácie v radiálnom smere pri zatažení v smere pozdĺžnom [14]. Hlavné osy kobyľky Schneider sú priradené na základe vizuálneho zhodnotenia. Pozdĺžna os smeru vlákien je približne rovnobežná s najväčším rozmerom kobyľky, radiálny smer je určený na základe štruktúry letokruhov a tangenciálny smer je na ne kolmý. Priradené smery sú znázornené na obr. 26. Podobným postupom sú priradené hlavné osy vrchnej dosky. Program ansys workbench pracuje v kartézskom súradnicovom systéme (xyz). Hlavné osy materiálového modelu dreva sú priradené odpovedajúcim osám súradnicového systému programu Ansys, odpovedajúce materiálové charakteristiky sú uvedené v zátvorkách v tab. 1. Materiály sú priradené komponentom, palisander modelu kobyľky a smrekové drevo vrchnej doske gitary. Pre sedlový pražec je použitý izotropný materiálový model plastu z knižnice materiálov Ansys. Pre zabezpečenie správneho správania sa orthotropného materiálu sú vytvorené lokálne súradnicové systémy pre kobyľku a vrchnú dosku, ktoré sú voči globálnemu natočené tak aby odpovedali materiálovým vlastnostiam v daných smeroch. Lokálne súradnicové systémy sú umiestnené do ťažísk daných komponent, a sú znázornené na obr. 25.



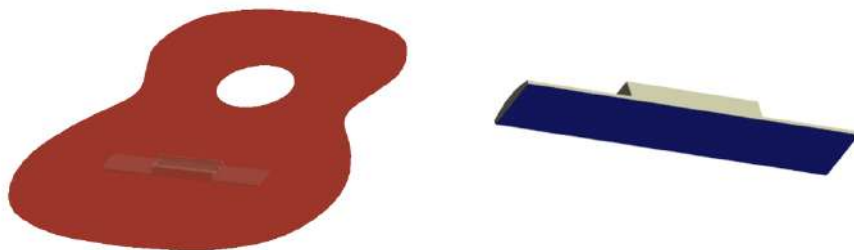
Obr. 25: Lokálne súradnicové systémy



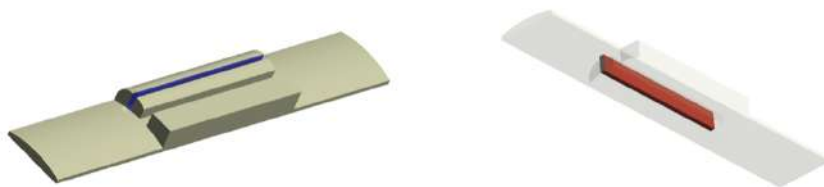
Obr. 26: Hlavné osy kobyľky schneider

2.3 Väzby a kontaktné spoje

Pre namodelovanie lepených spojov medzi sedlovým pražcom a kobyľkou a vrchnou doskou gitary a kobyľky, sú použité kontakty typu *bonded*. Kontakt typu *bonded* zamedzuje vzájomnému oddeleniu objektov a ich vzájomnému klzaniu [10]. Kontakty sú aplikované na plochy ktorými sa komponenty stýkajú, sú tak vytvorené kontaktné páry medzi vonkajšími plochami sedlového pražca a štrbinou v kobyľke a medzi vrchnou plochou dosky a spodnej časti kobyľky. Kontakt medzi kobyľkou a seldovým pražcom bude aplikovaný pre obe modálne analýzy. Kontaktné spoje sú zobrazené na obr. 28, 27.



Obr. 27: Spoj vrchnej dosky a kobyľky



Obr. 28: Spoj kobyly a sedlového pražca

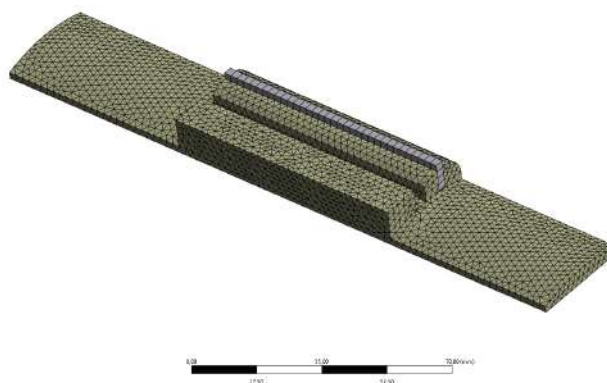
Pre modálnu analýzu samostatnej kobyly nie je zamedzený žiaden stupeň voľnosti. Keďže je kobyly uložená na vrchnej doske, ktorá sa správa elasticky, uvažujeme že je po vybudení kmitavého pohybu strunou kobyly schopná voľného pohybu okolo svojej rovnovážnej polohy. Z tohto dôvodu nebude samostatná kobyly zaväzbená. Pre výpočtový model s uvažovaním kobyly a vrchnej dosky ako vzájomného kmitajúceho systému je zamedzené posunutie po okraji vrchnej dosky. Väzba *Fixed Support* je aplikovaná na 32 hrán po okraji vrchnej dosky ktoré vytvárajú jej geometriu. V práci je uvedené že skutočná väzba medzi vrchnou doskou a lubmi sa správa v rozmedzí votknutia a podopretia, táto skutočnosť je zohľadnená v hodnotení výsledkov.

2.4 Sieť konečných prvkov

Samostatná kobyľka

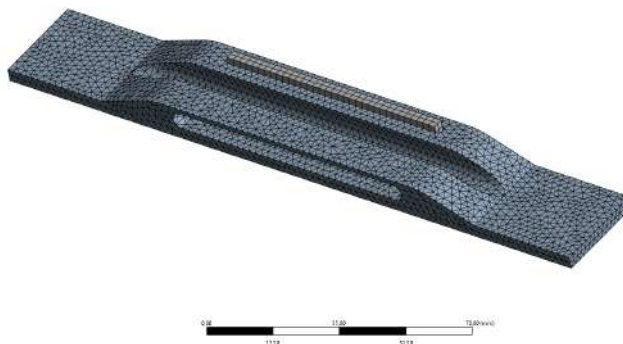
Pre výpočet vlastných frekvencií voľnej kobyľky je použitá 3D Modálna analýza. Kobyľka je tvorená 2 komponentami (kobyľkou a sedlovým pražcom) ktorých sieť bola zhustená pomocou funkcie body sizing, aplikovaná samostatne na 2 komponenty. Pre obe analýzy sú použité lineárne prvky. Stupne voľnosti pre jednotlivé typy prvkov sú uvedené v tabuľke 2.

Pre kobyľku Schneider bola sieť zhustená z pôvodnej veľkosti prvku 9,4171 mm na 2.15 mm pre kobyľku aj sedlový pražec. V modálnej analýze sú použité prvky typu SOLID186, SOLID187, CONTA174, TARGE170. Počet prvkov je 29872 a počet uzlov 48573. Sieť konečných prvkov je znázornená na obr. 29.



Obr. 29: Sieť konečných prvkov kobyľky Schneider

Pre kobyľku nižšej kvality bola sieť zhustená z pôvodnej veľkosti prvku 9,2931 mm na 2.05 mm pre kobyľku aj sedlový pražec. V modálnej analýze sú použité prvky typu: SOLID185, CONTA174 a TARGE170. Počet prvkov je 29773 a počet uzlov 7684. Sieť konečných prvkov je znázornená na obr. 30.

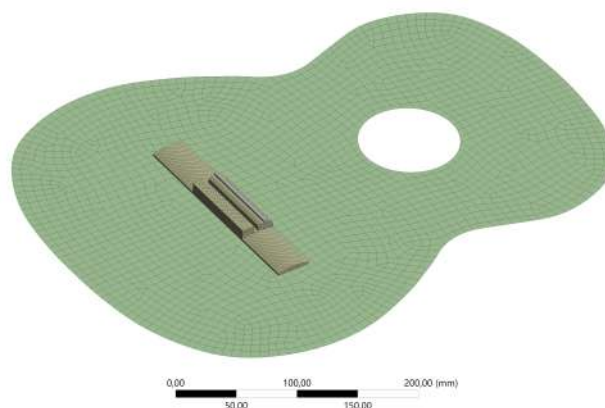


Obr. 30: Sieť konečných prvkov kobyľky nižšej kvality

Kobyłka ako súčasť vrchnej dosky

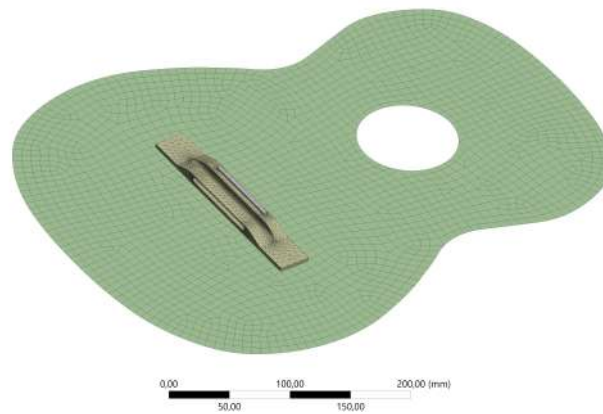
Pre výpočet vlastných frekvencií voľnej kobyľky je použitá 3D Modálna analýza. Vrchná doska je modelovaná ako 2D plocha typu shell s hrúbkou 3mm. Kobyľka a sedlový pražec sú modelované ako 3D teleso. Pre obe analýzy sú použité lineárne prvky. Stupne voľnosti pre jednotlivé typy prvkov sú uvedené v tabuľke 2. Model geometrie je symetrický rovinou YZ, symetria ale nemôže byť vo výpočtovom modeli použitá. Pri výpočte s použitím symetrického modelu má každý mód kmitania pozdĺžnu uzlovú priamku idúcu cez stred vrchnej dosky (rovinou symetrie), takto sa ale reálna komponenta nespráva. Sieť konečných prvkov bola navrhnutá tak aby vrchná doska mala hustotu prvkov pre oba modely rovnakú. Sieť kobyľky a sedlového pražca bola následne nastavená tak, aby mohol byť model spočítateľný študentskou verziou programu Ansys Workbench ktorý limituje počet použiteľných prvkov.

Pre výpočtový model vrchnej dosky s kobyľkou Schneider bola sieť vrchnej dosky zhustená funkciou Face sizing z pôvodnej veľkosti prvku 9,3166 mm na 8 mm. Sieť kobyľky a sedlového pražca bola zhustená na veľkosť prvku 3 mm. V modálnej analýze sú použité prvky typu SOLID186, SOLID187, CONTA174, TARGE170, SHELL181. Počet prvkov je 14081 a počet uzlov 22904. Sieť konečných prvkov je znázornená na obr. 31.



Obr. 31: Sieť konečných prvkov vrchnej dosky s kobyľkou Schneider

Pre výpočtový model vrchnej dosky s kobyľkou nižšej kvality bola sieť vrchnej dosky zhustená funkciou Face sizing z pôvodnej veľkosti prvku 8,3434 mm na 8 mm. Sieť kobyľky a sedlového pražca bola ponechaná v základom nastavení. V modálnej analýze sú použité prvky typu SOLID186, SOLID187, CONTA174, TARGE170, SHELL181. Počet prvkov je 28634 a počet uzlov 43573. Sieť konečných prvkov je znázornená na obr. 32.



Obr. 32: Sieť konečných prvkov vrchnej dosky s kobyľkou nižšej kvality

Tabuľka 2: Počet stupňov voľnosti [9]

Typ prvku	Stupne voľnosti	Počet s.v.
SOLID186	UX, UY, UZ	3
SOLID187	UX, UY, UZ	3
SOLID185	UX, UY, UZ	3
CONTA174	UX, UY, UZ	3
TARGE170	UX, UY, ROTZ	3
SHELL181	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	6

2.5 Výsledky modální analýzy

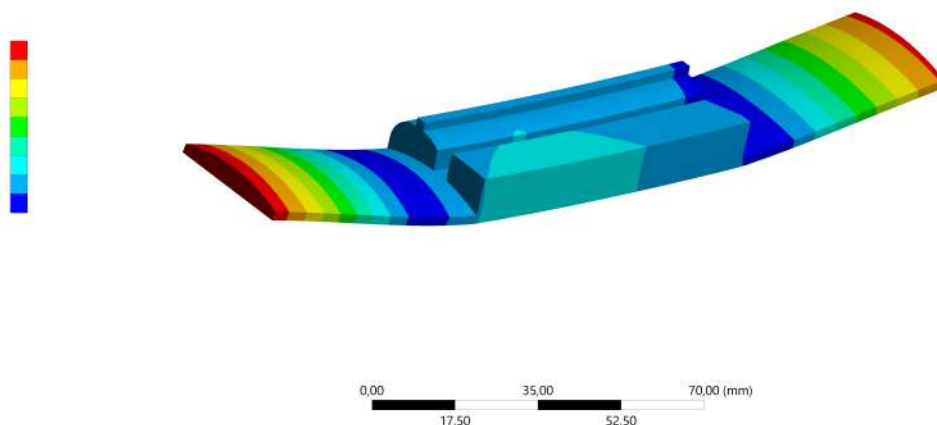
V následující části textu sú uvedené výsledky modální analýzy (módy kmitania a frekvencie). Farebná stupnica odpovedá: tmavo modrá - nulovej deformácii, červená - maximum deformácie. Maximum je pre každý tvar kmitu rozdielne, farebná stupnica je pre každý prípad relatívna z dôvodu názornejšieho určenia miesta maximálnej deformácie.

2.5.1 Kobyłka Schneider

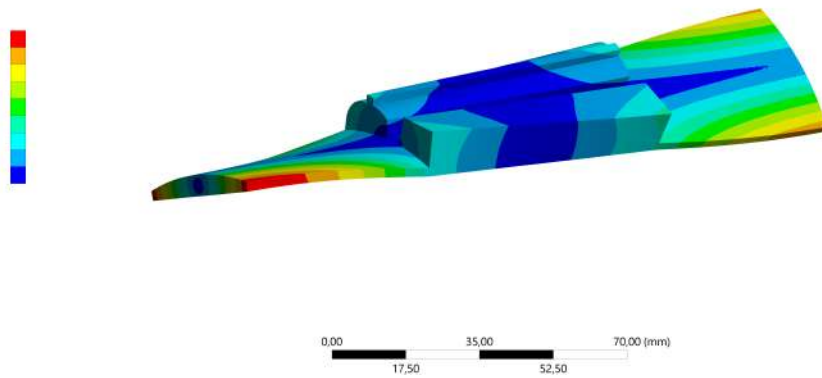
Na obr. (33-40) sú uvedené módy (7-14) kmitania kobyłky Schneider. Príslušné vlastné frekvencie sú uvedené v popise obrázkov. Z dôvodu uvažovania nezaväzbenej kobyłky vychádza prvých 6 módov nulových. Vlastné frekvencie všetkých vypočítaných módov sú uvedené v tabuľke 3.

Tabuľka 3: Vlastné frekvencie kobyłky Schneider

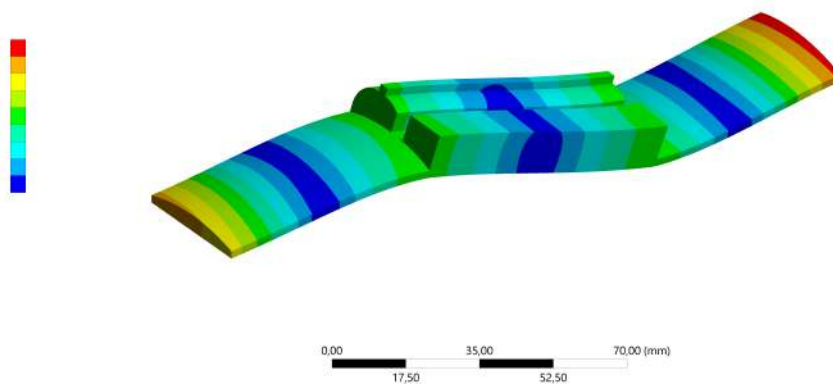
Mód	7	8	9	10	11	12	13
f (Hz)	483,45	707,22	824,21	1021,10	1470,00	1790,90	2157,50
Mód	14	15	16	17	18	19	20
f (Hz)	2385,80	2493,60	2690,00	2744,40	2999,4	3069,8	3582,7



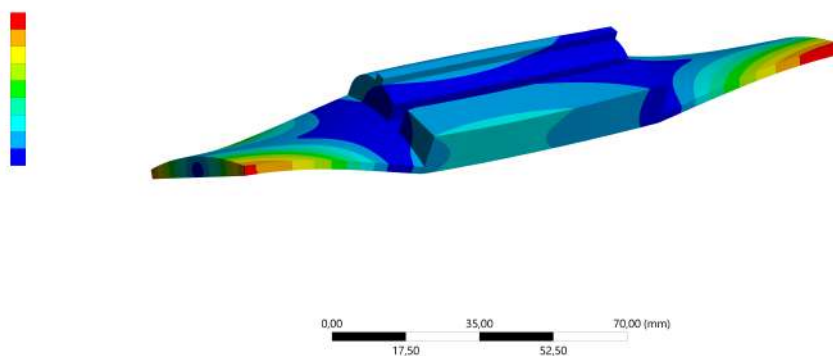
Obr. 33: Mód kmitania 7 kobyłky Schneider, $f = 483,45$ Hz



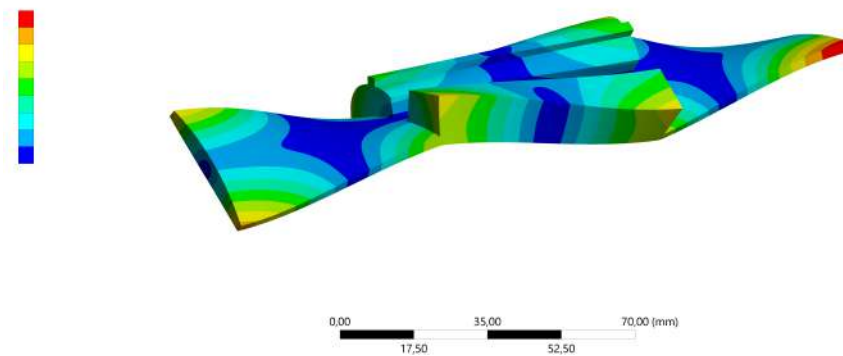
Obr. 34: Múd kmitania 8 kobyly Schneider, $f = 707,22$ Hz



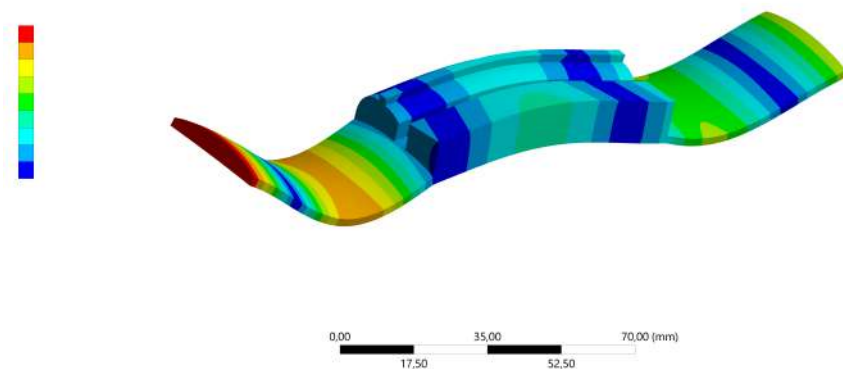
Obr. 35: Múd kmitania 9 kobyly Schneider, $f = 824,21$ Hz



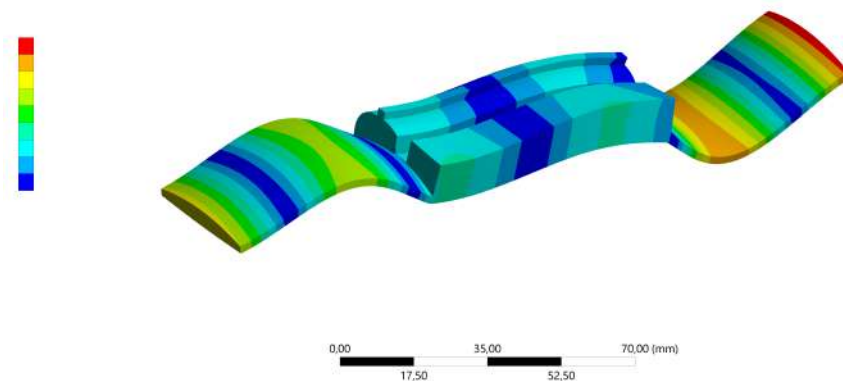
Obr. 36: Múd kmitania 10 kobyly Schneider, $f = 1021,10$ Hz



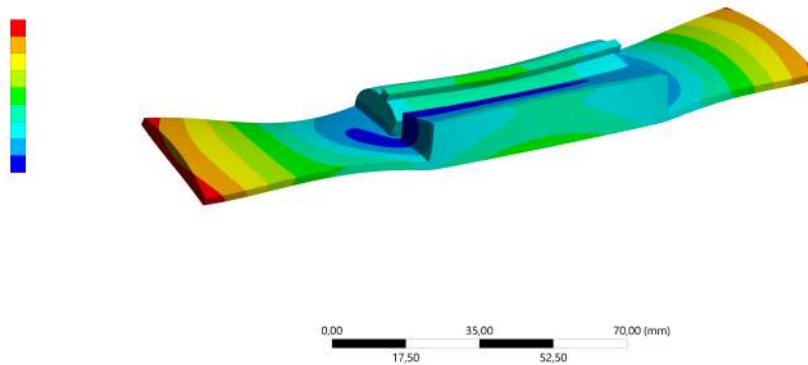
Obr. 37: Mód kmitania 11 kobyvky Schneider, $f = 1470,00$ Hz



Obr. 38: Mód kmitania 12 kobyvky Schneider, $f = 1790,90$ Hz



Obr. 39: Mód kmitania 13 kobyvky Schneider, $f = 2157,500$ Hz



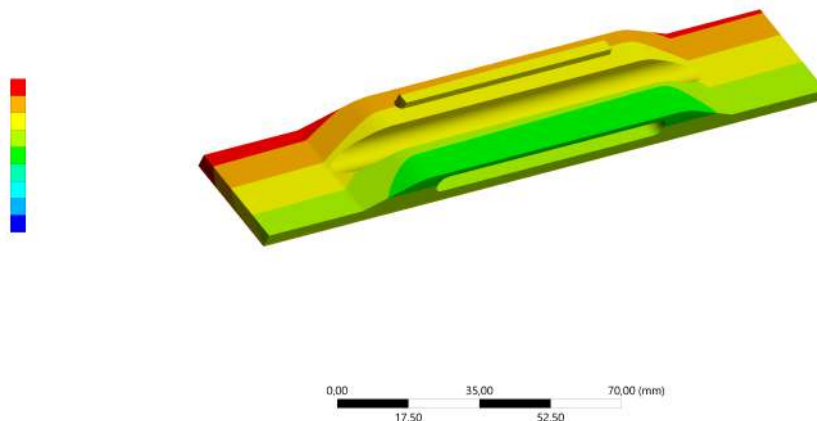
Obr. 40: Mód kmitania 14 kobyľky Schneider, $f = 2385,80$ Hz

2.5.2 Kobyľka nižšej kvality

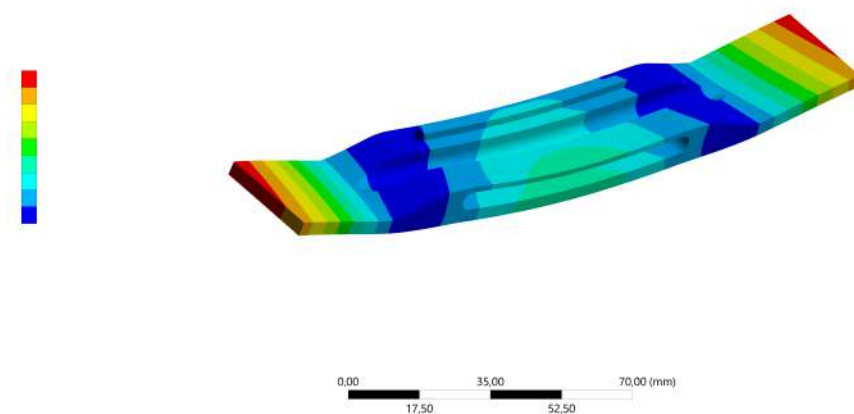
Na obr. (41-48) sú uvedené módy (7-14) kmitania kobyľky nižšej kvality. Príslušné vlastné frekvencie sú uvedené v popise obrázkov. Z dôvodu uvažovania nezaväzbanej kobyľky vychádza prvých 6 módov nulových. Vlastné frekvencie všetkých vypočítaných módov sú uvedené v tabuľke 4.

Tabuľka 4: Vlastné frekvencie kobyľky Schneider

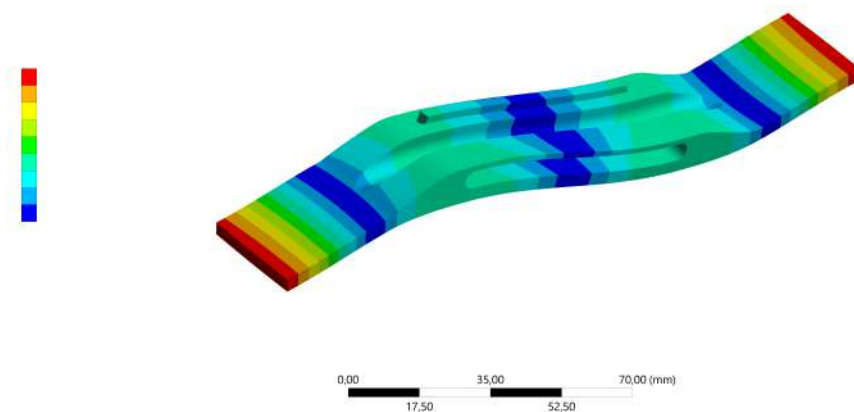
Mód	7	8	9	10	11	12	13
f (Hz)	588,12	706,77	1041,7	1287,6	1616,70	1651,7	2230,3
Mód	14	15	16	17	18	19	20
f (Hz)	2293,50	2395,20	2621,60	2981,40	3099,1	3225,2	3243,6



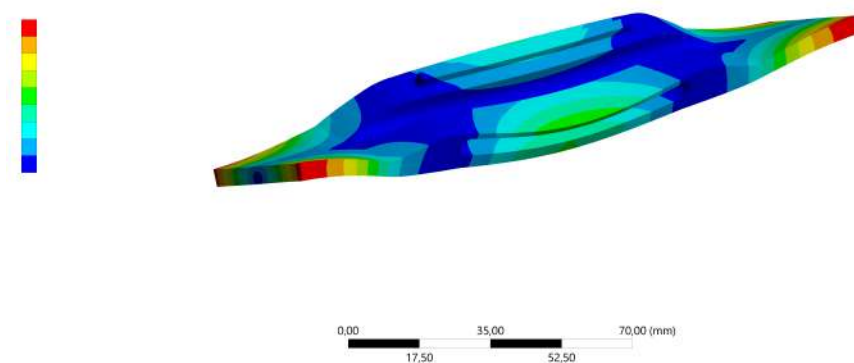
Obr. 41: Mód kmitania 7 nižšej kvality, $f = 483,45$ Hz



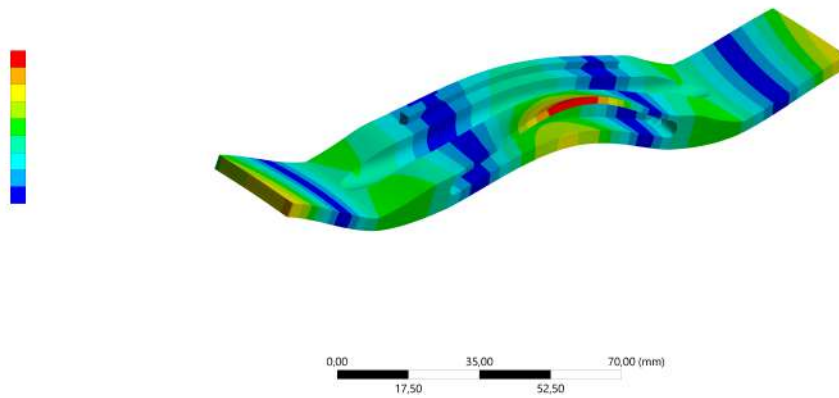
Obr. 42: Mód kmitania 8 nižšej kvality, $f = 707,22$ Hz



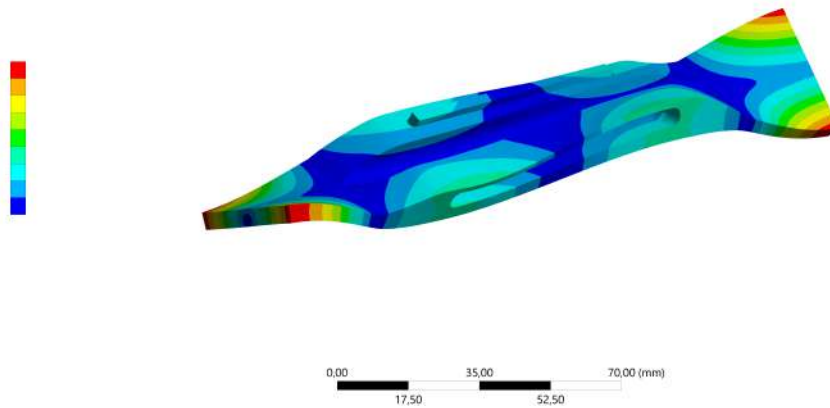
Obr. 43: Mód kmitania 9 nižšej kvality, $f = 824,21$ Hz



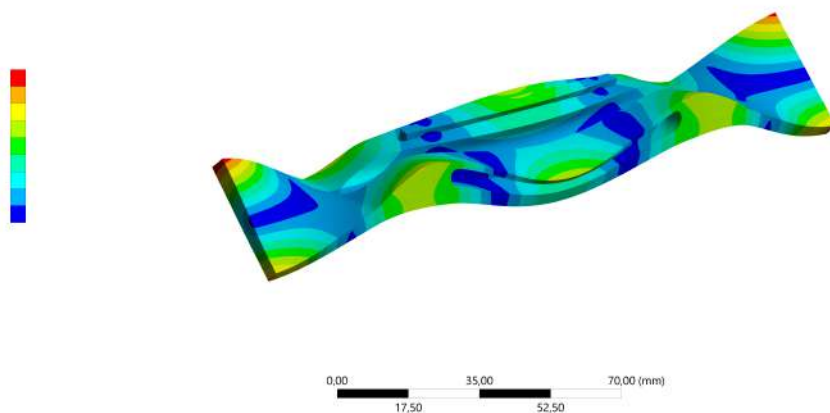
Obr. 44: Mód kmitania 10 nižšej kvality, $f = 1287$,Hz



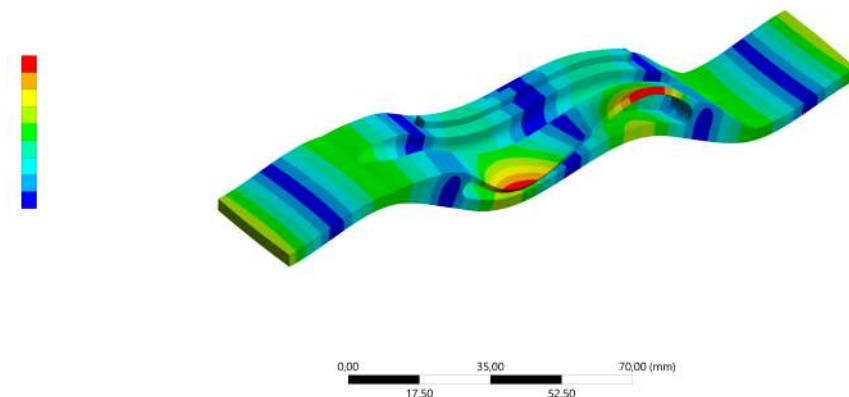
Obr. 45: Mód kmitania 11 nižšej kvality, $f = 1616,7$ Hz



Obr. 46: Mód kmitania 12 nižšej kvality, $f = 1651,7$ Hz



Obr. 47: Mód kmitania 13 nižšej kvality, $f = 2230,3$ Hz



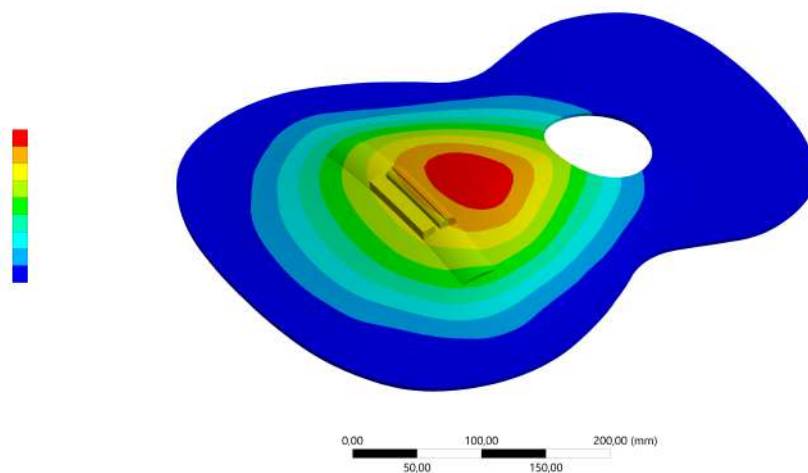
Obr. 48: Mód kmitania 14 nižšej kvality, $f = 2293,5$ Hz

2.5.3 Kobyłka Schneider uvažovaná ako súčasť vrchnej dosky gitary

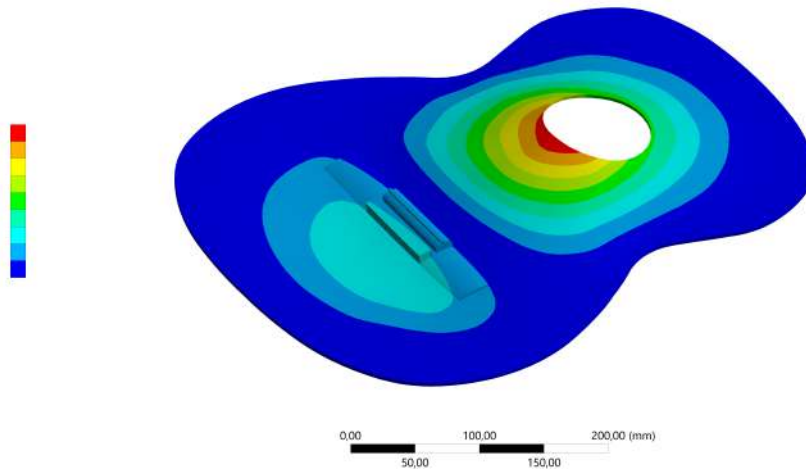
Na obr. 49-53 sú uvedené hlavné módy kmitania modelu vrchnej dosky s kobyľkou Schneider. Príslušné vlastné frekvencie sú uvedené v popise obrázkov. Vlastné frekvencie všetkých vypočítaných módov sú uvedené v tabuľke 5.

Tabuľka 5: Vlastné frekvencie vrchnej dosky s kobyľkou Schneider

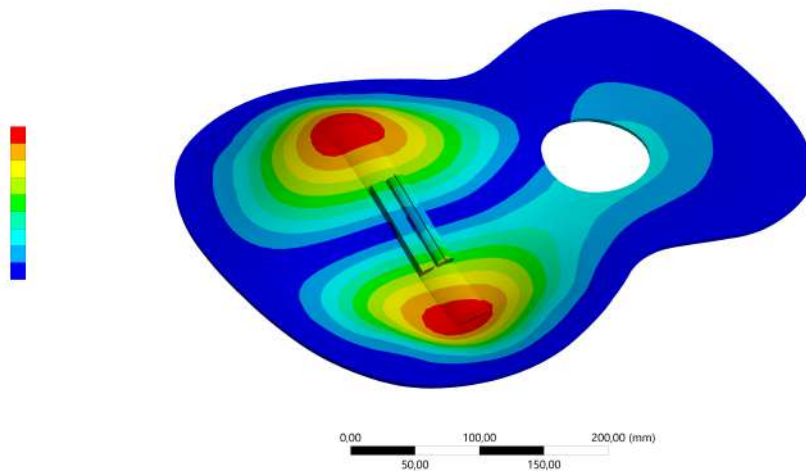
Mód	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f (Hz)	116,07	208,88	266,05	282,85	351,12	380,12	427,93	511,05	515,46	586,54
Mód	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
f (Hz)	620,28	662,69	689,05	708,68	742,59	819,89	829,76	867,95	879,64	939,82



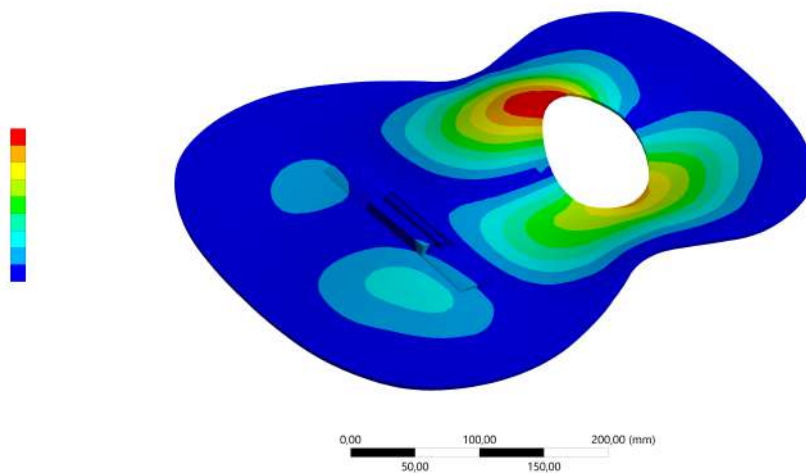
Obr. 49: Mód kmitania (0,0) vrchnej dosky gitary, $f = 116,07$ Hz



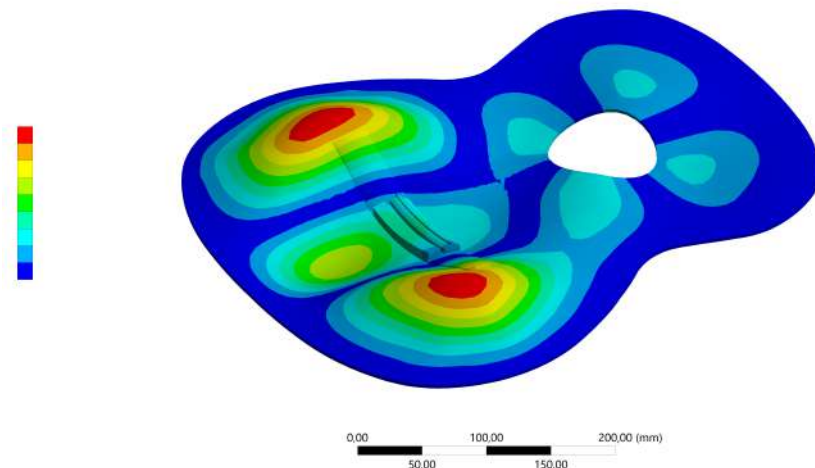
Obr. 50: Mód kmitania (0,1) vrchnej dosky gitary, $f = 208,88$



Obr. 51: Mód kmitania (1,0) vrchnej dosky gitary, $f = 266,05$ Hz



Obr. 52: Mód kmitania (1,1) vrchnej dosky gitary, $f = 351,12$ Hz



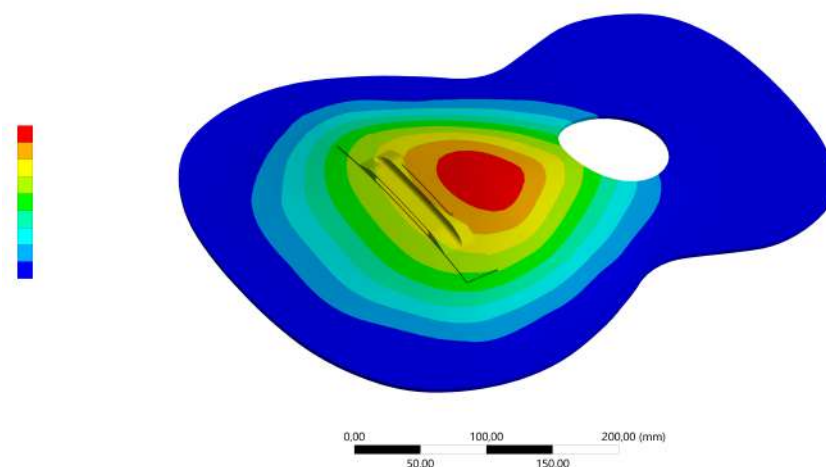
Obr. 53: Mód kmitania (2,0) vrchnej dosky gitary, $f = 511,46$ Hz

2.5.4 Kobyłka nižšej kvality uvažovaná ako súčasť vrchnej dosky gitary

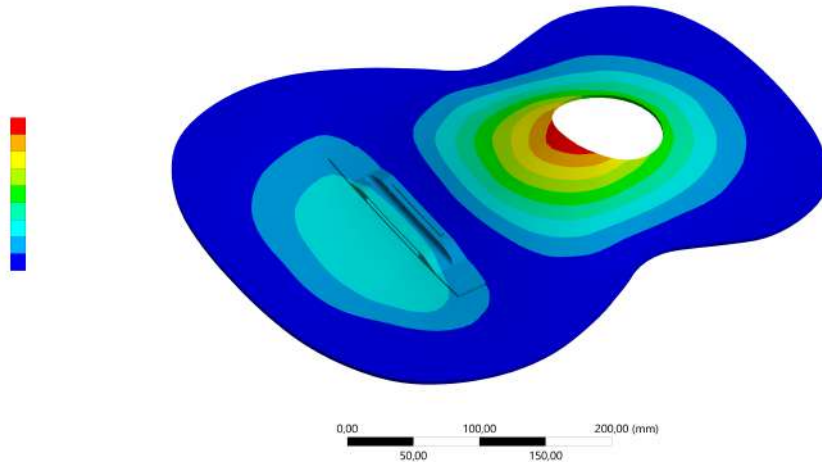
Na obr. 54-54 sú uvedené hlavné módy kmitania modelu vrchnej dosky s kobyľkou Schneider. Príslušné vlastné frekvencie sú uvedené v popise obrázkov. Vlastné frekvencie všetkých vypočítaných módov sú uvedené v tabuľke 6.

Tabuľka 6: Vlastné frekvencie vrchnej dosky s kobyľkou Schneider

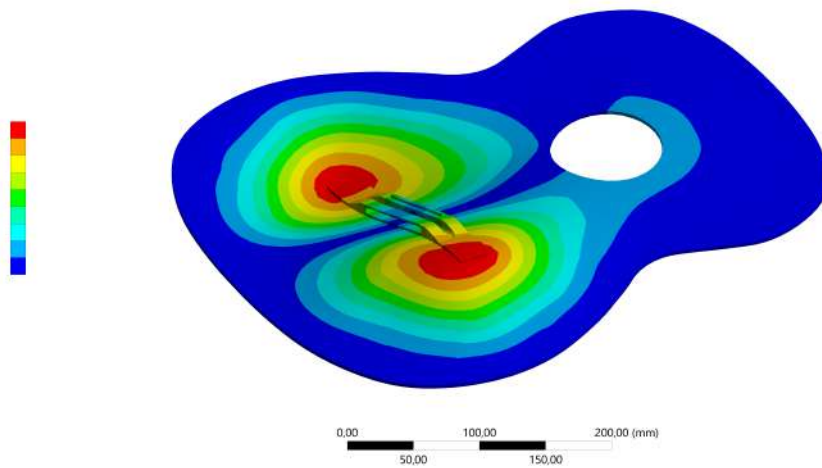
Mód	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f (Hz)	122,78	214,61	268,69	280,94	363,82	380,65	421,12	513,71	550,94	582,28
Mód	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
f (Hz)	622,38	666,79	693,92	728,92	751,61	813,86	827,09	874,20	892,02	849,19



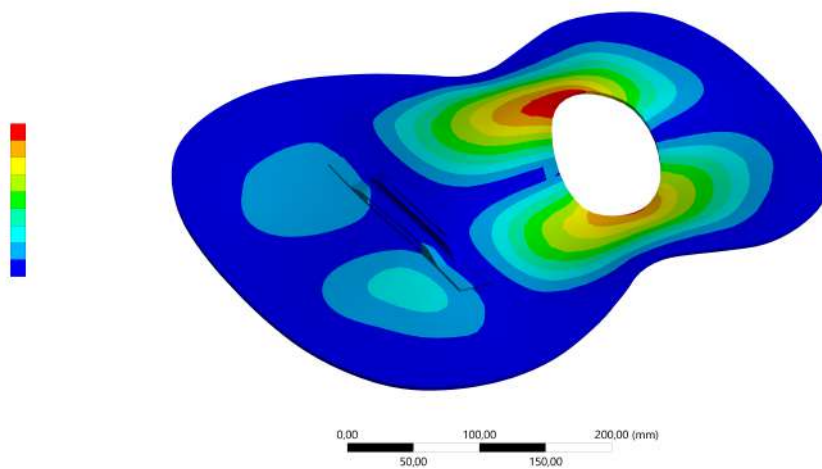
Obr. 54: Mód kmitania (0,0) vrchnej dosky gitary, $f = 122,78$ Hz



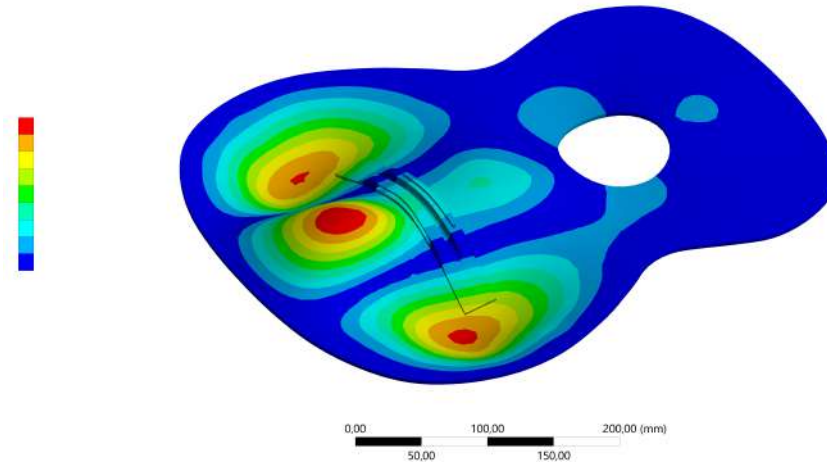
Obr. 55: Mód kmitania (0,1) vrchnej dosky gitary, $f = 268,69$



Obr. 56: Mód kmitania (1,0) vrchnej dosky gitary, $f = 214,61$ Hz



Obr. 57: Mód kmitania (1,1) vrchnej dosky gitary, $f = 363,82$ Hz

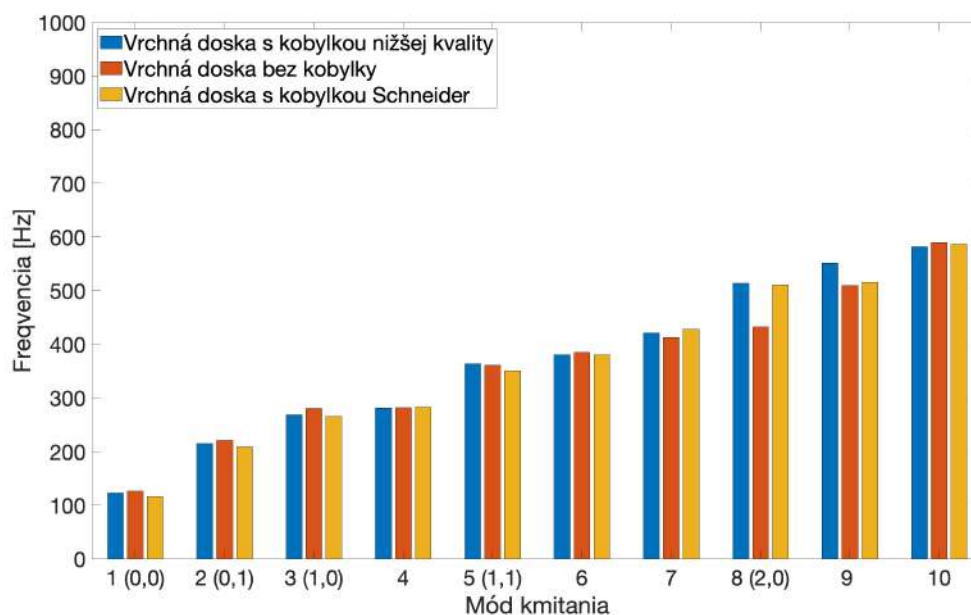


Obr. 58: Mód kmitania (2,0) vrchnej dosky gitary, $f = 550,94$ Hz

3 ZHODNOTENIE A DISKUSIA

Výsledky modelovania kobyľky ako súčasť vrchnej dosky

Keďže sa kobyľka gitary oproti vrchnej doske správa ako tuhá, budú tieto dve komponenty kmitať spolu ako celok. Modálna analýza bola vykonaná na zjednodušenom modeli vrchnej dosky s kobyľkou Schneider, kobyľkou nižšej kvality a bez kobyľky¹. Takto je možné pozorovať vplyv kobyľky na vlastné frekvencie vrchnej dosky, ktorá je hlavným komponentom oscilačného systému gitary. Výpočtovým modelom bolo získaných prvých 20 vlastných frekvencií a tvarov. Rozsah² tónov klasickej gitary sa štandardne pohybuje od 82-987 Hz. Vyššie harmonické frekvencie (ktorých amplitúda je oproti fundamentálnym menšia) sa pohybujú do 2000 Hz. V hodnotení výsledkov analýzy vrchnej dosky sa berie ohľad hlavne na módy v rozsahu fundamentálnych frekvencií strún klasickej gitary. Je tak získaných prvých 20 módov kmitania. Na obr. 59 a obr. 60 sú uvedené grafy vlastných frekvencií prislúchajúce svojim módom kmitania. Je nutné podotknúť že výsledky vlastných frekvencií pre určité módy neodpovedajú meraniam na skutočných gitarách. Nezhoda výsledkov môže byť spôsobená zanedbaním výstuží pre model vrchnej dosky, neurčitostou materiálových charakteristík³, a zaväzbením výpočtového modelu ktoré neodpovedá dokonale podmienkam pri ktorých boli vlastné frekvencie zmerané experimentálne. Z výsledkov je ale možné vytvárať závery vplyvu kobyľky na vlastné frekvencie vrchnej dosky.

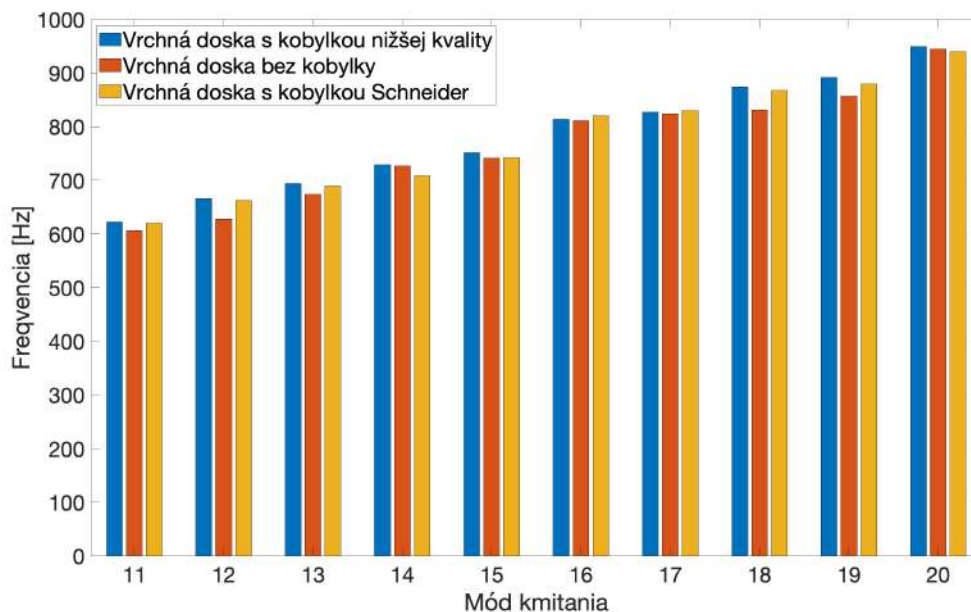


Obr. 59: Vlastné frekvencie vrchnej dosky gitary pre módy (1-10), v zátvorke uvedené hlavné módy kmitania vrchnej dosky gitary

¹Výpočtový model pre analýzu bez kobyľky bol rovnaký ako pre vrchnú dosku s kobyľkou Schneider, kobyľka a sedlový pražec boli z modelu odstránené.

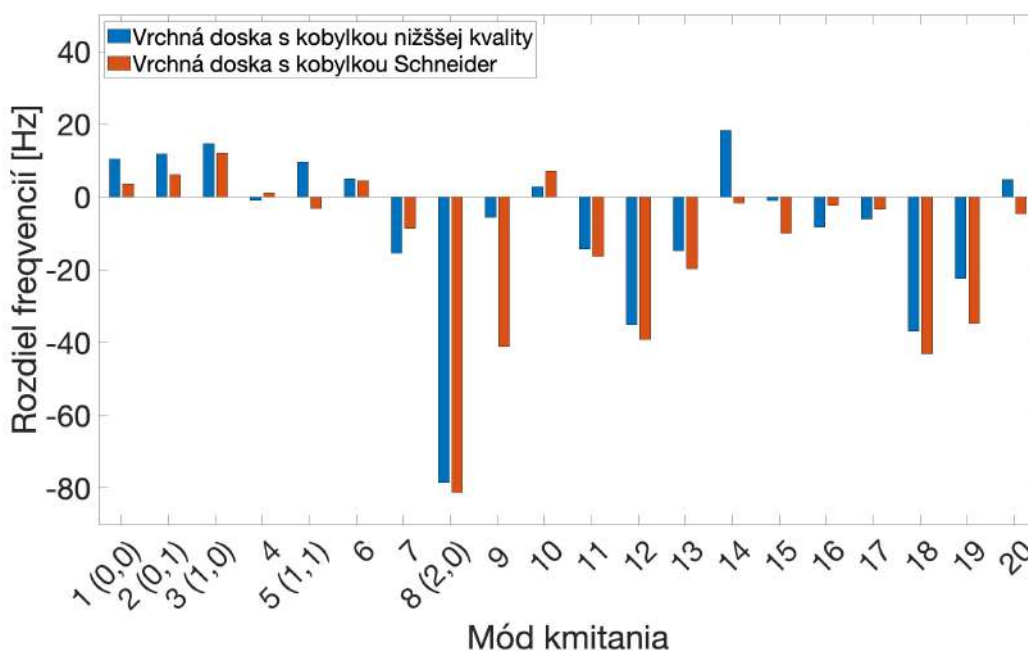
²Spektrum klasickej gitary Schneider poskytnuté vedúcim bakalárskej práce dňa 19.5.2024.

³Materiálové charakteristiky dreva ako hustota, Youngov modul pružnosti alebo Poissonova konštanta, sú rozdielne pre individuálne kusy dreva.



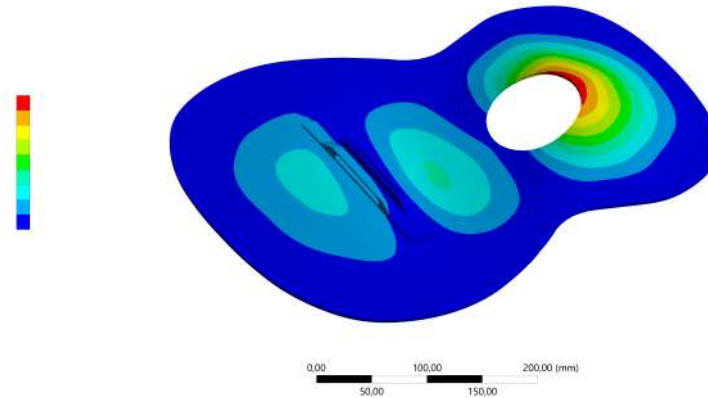
Obr. 60: Vlastné frekvencie vrchnej dosky gitary pre módy (10-20)

Pre ľahšie zhodnotenie výsledkov sú na obr. 61 uvedené hodnoty rozdielu vlastých frekvencií medzi vrchnou doskou bez kobyvky a s kobylkou. Výsledky v grafe sú získané ako $f(\text{Vrchná doska bez kobyvky}) - f(\text{Vrchná doska s kobylkou Schneider})$ - v grafe uvedené červenou farbou a $f(\text{vrchná doska bez kobyvky}) - f(\text{Vrchná doska s kobylkou Nižšej kvality})$ - v grafe uvedené modrou farbou.



Obr. 61: Vlastné frekvencie vrchnej dosky gitary pre módy (10-20)

Z grafu sa dá určiť ktoré vlastné frekvencie sa oproti hodnote pre vrchnú dosku bez kobyľky zmenili najviac a najmenej. Najmenší posun nastal pre mód 4. znázornený na obr. 62.

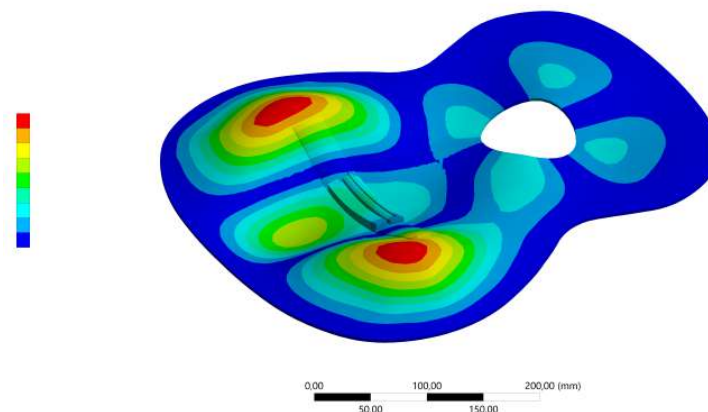


Obr. 62: Vlastný tvar kmitu pre mód 4

Pre tento mód sa kobyľka nachádza v miestach uzlovej priamky a najväčšia deformácia sa nachádza v miestach rezonančného otvoru, preto kobyľka neovplyvňuje frekvenciu kmitania pri tomto móde.

Najviac sa vlastná frekvencia zmení pre mód 8 (ktorý je jedným z hlavných módov kmitania vrchnej dosky), kobyľka sa nachádza blízko miesta najväčšej deformácie, podstatne tak mení tuhostné pomery dôležité pre tento mód kmitania. Pre vrchnú dosku s kobyľkou nižšej kvality sú vlastné tvary pre 8. a 9. mód prehodené, Mód (0,2) má vyššiu frekvenciu ako mód (1,3), pre vrchnú dosku s kobyľkou Schneider a bez kobyľky má mód (2,0) oproti módu (1,3) frekvenciu nižšiu. Pre mód (2,0), znázornený na obr. 63 sú frekvencie:

- Vrchná doska bez kobyľky $f = 511,05$ Hz
- Vrchná doska s kobyľkou nižšej kvality $f = 550,94$ Hz
- Vrchná doska bez kobyľky $f = 432,54$ Hz

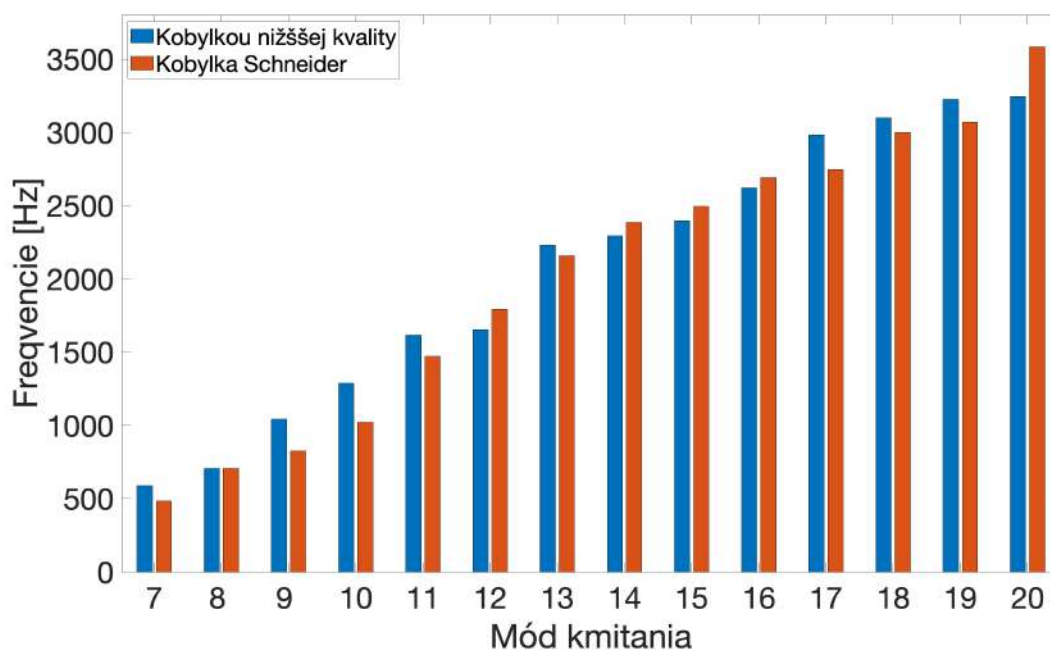


Obr. 63: Vlastný tvar kmitu pre mód (2,0)

Ostatné hlavné módy kmitania vrchnej dosky gitary sa medzi sebou líšia v rádoch jednotiek Hz. Obe kobyľky majú tendenciu pre väčšinu módov frekvenciu buď spoločne znižovať alebo zvyšovať. Toto neplatí iba pre módy: 4, 14, 20 ktoré nemajú oproti hlavným módom veľký význam.

Výsledky modelovania voľnej kobyľky

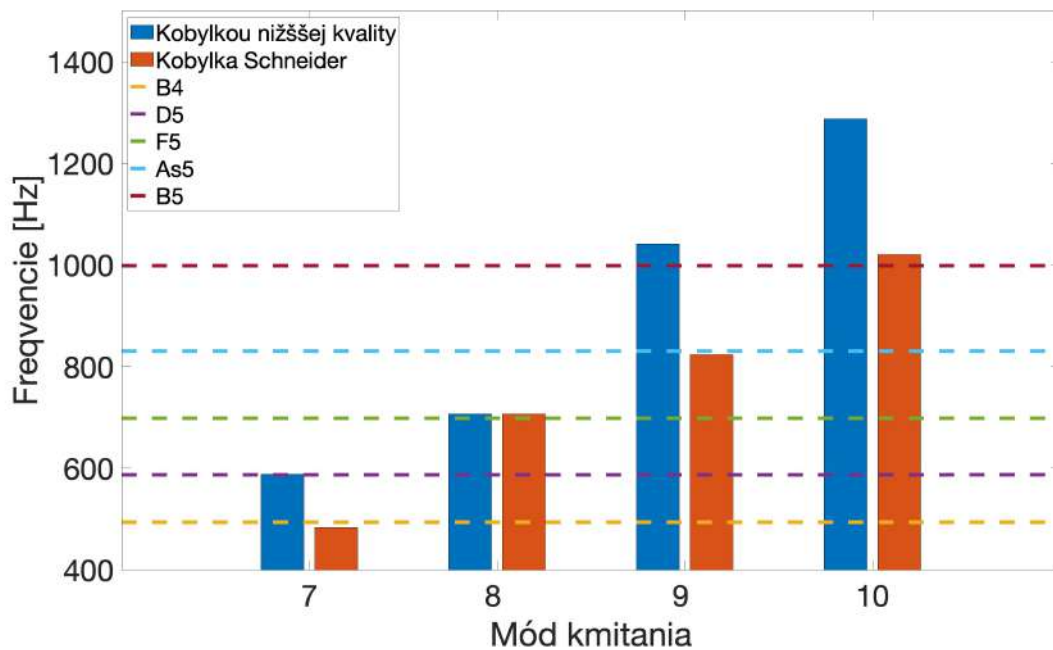
Pri hre na gitaru, struna pôsobí na kobyľku silovými impulzami, vlny pohybujúce sa v reálnej strune sa neodrážajú dokonale a tak sa časť energie prenáša na kobyľku. Keďže je kobyľka a struna v priamej interakcii je pre určenie vzájomného ovplyvňovania struny a kobyľky vhodné uvažovať kobyľku ako samostatnú komponentu. Graf výsledkov modálnej analýzy prvých 14 nenulových módov pre kobyľky sú uvedené na obr. 64.



Obr. 64: Vlastné frekvencie kobyľky Schneider a kobyľky nižšej kvality

Z výsledkov nevyplýva úplný trend, pre určité módy má kobyľka Schneider vlastné frekvencie nižšie, pre iné ale vyššie. Väčšiu podstatu budú mať módy nižších frekvencií keďže rozsah tónov klasickej gitary sa pohybuje do 1000 Hz. V tomto rozsahu bude mať kobyľka Schneider oproti kobyľke nižšej kvality vlastné frekvencie nižšie.

Odraz vlny v strune a tým pádom amplitúda a dĺžka vytvoreného zvuku závisia na vzájomnom odpore ktoré si kobyľka a struna kladú. Kobyľka kladie malý odpor pre rezonančné frekvencie a tým práva energiu vysoko efektívne. Príliš veľká efektívnosť pri prenose energie bude mať za následok tón ktorý bude mať príliš ostrú a vysokú amplitúdu zvuku (v porovnaní z ostatnými tónmi) a krátku dobu trvania. Tento efekt je nechcený. Tóny, ktorých frekvencie sú blízko vlastných frekvencií kobyľky môžu vyznieť horšie ako ostatné.



Obr. 65: Tóny klasickej gitary blízke vlastným frekvenciám kobyliek

Na obr. 65 sú znázornené tóny ktorých frekvencie sú blízke vlastným frekvenciám kobyliek. Tieto tóny (B_4 , D_5 , F_5 , A_{s5} , B_5) je možné hrať vo vyšších polohách na strune vysoké E. Pri hodnotení kobylky z pohľadu vlastných frekvencií je vhodné aby ich mala kobylka čo najvyššie, bola by tak zamedzená možnosť stretu vlastných frekvencií kobylky a fundamentálnych frekvencií struny. Je treba podotknúť že vlastné frekvencie kobylky budú vplývať aj na vyššie harmonické módy struny, ktoré sú celočíselnými násobkami fundamentálnej a môžu sa pohybovať v rozsahu do 2000 Hz. Kobylka tak bude interagovať aj s nimi a tak meniť výsledný tón gitary.

Vlastné tvary a frekvencie kobylky ovplyvňujú výslednú kvalitu tónu. V práci sú zistené vlastné tvary a frekvencie, keďže ale amplitúdy kmitania z modálnej analýzy získané nie sú, nie je možné určiť úplný význam jednotlivých módov na tvorbe zvuku. Kobylka mení tuhostné pomery vrchnej dosky, na vlastné tvary má ale väčší podiel výstuž vrchnej dosky. Vlastné frekvencie nie sú jediným faktorom určujúci kvalitu kobylky, pri jej návrhu je potrebné dbať aj na faktory ako: znesenie zaťaženia od strún, efektívnosť prenášania energie, možnosť kompenzácie, správneho nastavenia výšky strún a estetickú stránku.

ZÁVER

Bakalárska práca sa zaoberala určením vlastných frekvencií a tvarov kobyľky klasickej gitary. Vlastné tvary a frekvencie boli získané pre 2 typy kobyľiek a to pre kobyľku Schneider a kobyľku nižšej kvality. Po zhodnotení súčasného poznania o funkcii gitary, boli navrhnuté 2 modely ako uvažovať kobyľku gitary. Prvý ako samostatnú kobyľku, ktorá bola pri výpočtovom modelovaní uvažovaná ako nezáväzná, a druhý ako model kobyľky ktorá je súčasťou vrchnej dosky. Kobyľka sa v porovnaní s vrchnou doskou správa ako tuhá preto bude jej pohyb závislý na pohybe vrchnej dosky.

Cieľom práce bolo určenie vlastných frekvencií a tvarov kobyľky klasickej gitary a vyhodnotenie ich významu na funkciu gitary. Vlastné frekvencie pre model voľnej kobyľky vplývajú hlavne na interakciu struny a kobyľky gitary. Rýchlosť a efektívnosť prenosu energie zo struny na kobyľku závisí na vlastných frekvenciách kobyľky. Pre prípady kedy sa frekvencia hraného tónu blíži vlastným frekvenciám kobyľky nastáva príliš veľká efektívnosť prenosu energie, čo má za následok to, že vytvorený zvuk bude oproti ostatným tónom hlasnejší a kratší. Tento efekt je nechcený preto je vhodné navrhnúť kobyľku tak aby sa hrané tóny neblížili vlastným frekvenciám kobyľky, čo prakticky znamená že je vhodné aby mala kobyľka vlastné frekvencie čo najvyššie čím by sa zamedzila možnosť stretu s fundamentálnymi frekvenciami struny ktoré sa pohybujú do 1000 Hz. Z výsledkov je znáť že návrhom kobyľky je možné zmeniť jej vlastné frekvencie. Pri uvažovaní kobyľky ako súčasť vrchnej dosky bol zistený vplyv kobyľky na zmenu vlastných frekvencií a tvarov vrchnej dosky ktorá je jedným z hlavných komponent oscilačného systému gitary. Vplyv kobyľky bol zhodnotený po porovnaní výsledkov z výpočtového modelovania pre vrchnú dosku s kobyľkou Schneider, kobyľkou nižšej kvality a vrchnú dosku bez kobyľky. Z výsledkov vyplýva že kobyľka značne mení frekvencie módu (0,2). Frekvencie sú odlišné z dôvodu veľkej zmeny tuhostných pomerov vrchnej dosky, ktoré sú významné pre tento mód kmitania. Kobyľky rôznej geometrie menia vlastné frekvencie vrchnej dosky ale v porovnaní medzi sebou sa líšia v rádoch jednotiek Hz.

Výsledky z modálnej analýzy pre voľnú kobyľku by mohli byť použité pre hlbšiu analýzu interakcie struny a kobyľky klasickej gitary. Výsledky pri uvažovaní kobyľky ako súčasť vrchnej dosky iba ukazujú význam prítomnosti kobyľky rôznej geometrie na jej vlastné frekvencie. Analýzu by bolo vhodné vykonať na presnejšom modeli vrchnej dosky ktorá by mala výstuže. Výrobcom gitár môžu tieto výsledky dať ďalšie informácie o funkcii gitary a tak viesť k zlepšenému dizajnu kobyľky.

LITERATÚRA

- [1] *Fundamentals of acoustics*. 4th ed. New York ; Chichester: Wiley, 2000. ISBN 0-471-84789-5.
- [2] BOCKO, J. *Kmitanie mechanických sústav*. Vydanie prvé. Košice: Technická univerzita, Strojnícka fakulta, 2016. Edícia vedeckej a odbornej literatúry (Technická univerzita v Košiciach). ISBN 978-80-553-2629-0.
- [3] BYERS, G. *Classic Guitar Intonation, Online*. 2012-10-10 [Citováno 2024-5-20]. Dostupné z: <http://byersguitars.com/Research/intonation.pdf>.
- [4] CHAIGNE, A. a KERGOMARD, J. *Acoustics of Musical Instruments*. Springer New York, 2016. Modern Acoustics and Signal Processing. ISBN 9781493936793. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=p_qODAAAQBAJ.
- [5] CUZZUCOLI, G. a GARRONE, M. *The Modern Guitar*. Cham: Springer International Publishing, 2020. ISBN 978-3-030-32992-1. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-030-32992-1_9.
- [6] EENDEBAK, B. *Design of a Classical Guitar, Online*. 2012-10-10 [Citováno 2024-5-20]. Dostupné z: <https://theguitar-blog.com/?p=1643>.
- [7] FLETCHER, N. H. N. H. a ROSSING, T. D. *The physics of musical instruments / Neville H. Fletcher, Thomas D. Rossing*. New York ; Springer-Verlag, 1991. ISBN 0387969470.
- [8] HINRICHSSEN, H. Revising the Musical Equal Temperament. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. Srpen 2015, sv. 38. DOI: 10.1590/S1806-11173812105.
- [9] INC, A. *ANSYS Mechanical APDL Element Reference, Online*. 2011 [Citováno 2024-5-22]. Dostupné z: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/vem/ansys_14_element_reference.pdf.
- [10] INC, A. *Introduction to Contact, Prezentácia*. 2020 [Citováno 2023-4-28]. Dostupné z: https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2019/05/2.5.1-Introduction-on-contact_New_Template_Master.pdf.
- [11] INC., E. B. *Acoustic vs. Classical Guitar: What are the major differences?, Online*. 2020-2-6 [Citováno 2024-5-20]. Dostupné z: <https://blog.ernieball.com/strings/acoustic-vs-classical-guitar-what-are-the-major-differences/#:~:text=The%20ultimate%20difference%20between%20an,softer%20sound%20than%20steel%20strings>.
- [12] JANSSON, E. a (SWEDEN). MUSIKAKUSTISKA NÄMNDEN, K. M. akademien. *Function, Construction, and Quality of the Guitar: Papers Given at a Seminar Organized by the Committee for the Acoustics of Music*. Royal Swedish Academy of Music,

1983. Function, Construction, and Quality of the Guitar: Papers Given at a Seminar Organized by the Committee for the Acoustics of Music. ISBN 9789185428298. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=zb85AQAIAAJ>.
- [13] JOSHUA ROGERS, O. *Modern Classical Guitar Design Part 8: Fanned Frets, Online*. 2015 [Citováno 2024-5-20]. Dostupné z: <https://nbnguitar.com/nbn-guitar-blog/modern-classical-guitar-design-part-8-fanned-frets>.
- [14] LABORATORY, F. P. *Wood handbook: wood as an engineering material*. 1999. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.2737/FPL-GTR-113>.
- [15] MEYER, V. *The Kasha Guitar, Online*. 1997 [Citováno 2024-5-20]. Dostupné z: <https://www.jthbass.com/kasha.html>.
- [16] MIRIANON, F., FORTINO, S. a TORATTI, T. *A method to model wood by using ABAQUS finite element software. Part 1. Constitutive model and computational details*. Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 2008. VTT Publications. Project code: 17546.
- [17] SLOANE, I. *Classic Guitar Construction*. Bold Strummer, 1989. ISBN 9780933224148. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=qT0PW7bwyUsC>.
- [18] THOMAS OCHS, O. *KASHA MODEL, Online*. [Citováno 2024-5-20]. Dostupné z: <https://www.ochs-gitarrenbau.de/en/guitars/kasha-model/>.
- [19] USHER, T. The Spanish Guitar in the Nineteenth and Twentieth Centuries. *The Galpin Society Journal*. Galpin Society. 1956, sv. 9, s. 5–36. ISSN 00720127. Dostupné z: <http://www.jstor.org/stable/841787>.
- [20] YAMAHA CORPORATION, O. *How the Classical Guitar is Made , Online, Obrázok*. [Citováno 2024-5-20]. Dostupné z: https://www.yamaha.com/en/musical_instrument_guide/classical_guitar/manufacturing/manufacturing004.html.