



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

HARMONICKÁ ANALÝZA KOBYLKY KONTRABASU

HARMONIC ANALYSIS OF THE DOUBLE BASS BRIDGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Čalkovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hájek, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Lukáš Čalkovský
Studijní program:	Mechatronika bez specializace
Studijní obor:	Mechatronika bez specializace
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:

Harmonická analýza kobylky kontrabasu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kobylka smyčcového nástroje je hlavní převodní prvek mezi strunami a tělem nástroje. Tělo, které zvuk struny zesiluje a mění jeho charakter, je citlivé na tvorbu tzv. vlčích tónů, tedy rozdílových tónů vzniklých jako nesoulad mezi volnými a vynucenými kmity nástroje. Jejich vznik může iniciovat i kobylka v případě, že by do systému vstupovala s výraznou vlastní frekvencí.

Harmonická analýza kobylky může pomoci rezonanci na takové vlastní frekvenci odhalit.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Provedte rešerši smyčcových nástrojů.
- 2) Popište funkci kontrabasu s důrazem na vliv kobylky na vznikající tón.
- 3) Vytvořte model geometrie kobylky vybraného kontrabasu.
- 4) Provedte harmonickou analýzu kobylky a srovnajte výsledky s literaturou.

Seznam doporučené literatury:

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>

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

SYROVÝ, Václav, 2013. Hudební akustika. 3. Praha: Akademie múzických umění v Praze. ISBN 978-80-7331-297-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá rešerší smyčcových nástrojů a jejich mechanických vlastností. Dále zkoumá kontrabasovou kobytku a její důležitost. Na modelu vytvořeném v programu SolidWorks byla pomocí softwaru ANSYS provedena modální analýza, kterou byly zjištěny frekvence a tvary jednotlivých módů, a harmonická analýza. Součástí zkoumání bylo analyzovat možnou příčinu tvorby tzv. vlčích tónů. Kontrabasová kobytkka nevykazuje žádné zvláštní vlastnosti v tónovém rozsahu kontrabasu, takže není příčinou této anomálie.

Klíčová slova

Kontrabas, kontrabasová kobytkka, smyčcové nástroje, modální analýza, harmonická analýza

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the research of string instruments and their mechanical properties. It explores the double bass bridge and its importance. On a model created in the SolidWorks program, modal analysis was performed using the ANSYS software, which determined the frequencies and shapes of the individual modes. Harmonic analysis was also performed and analysed. Part of the investigation was to analyze the possible cause of the formation of so-called wolf tones. The double bass bridge does not exhibit any special characteristics in the double bass range, so it is not the cause of this anomaly.

Key words

Double bass, double bass bridge, string instruments, modal analysis, harmonic analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČALKOVSKÝ, Lukáš. *Harmonická analýza kobylinky kontrabasu* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157360>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Petr Hájek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem Bakalářskou práci na téma **Harmonická analýza kobylinky kontrabasu Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Petru Hájkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

Obsah

Úvod.....	11
1. Smyčcové nástroje.....	12
1.1. Popis částí smyčcových nástrojů.....	12
1.2. Historie smyčcových nástrojů.....	13
1.3. Ostatní smyčcové nástroje	14
1.3.1. Housle.....	15
1.3.2. Viola.....	15
1.3.3. Violoncello.....	16
1.4. Srovnání nástrojů	16
1.5. Odlišnost kontrabasů.....	17
Způsob hry na kontrabas a tvoření tónu	18
1.6. Kontrabasová kobylka.....	20
2. Rezonance smyčcových nástrojů.....	21
2.1. Vlčí tóny.....	22
3. Základní pojmy dynamiky.....	23
3.1. Vlastní frekvence	23
3.2. Vlastní tlumená frekvence	23
3.3. Modální analýza.....	24
3.4. Harmonická analýza.....	24
3.5. Metoda konečných prvků.....	24
4. Modální analýza kobylky vybraného kontrabasů.....	25
4.1. Model geometrie	25
4.2. Model materiálu	26
4.3. Uložení a okrajové podmínky	26
4.4. Síť metody konečných prvků	26
4.5. Presentace a analýza výsledků.....	27
5. Harmonická analýza kobylky vybraného kontrabasů.....	31
5.1. Model geometrie	31
5.2. Model materiálu	31
5.3. Uložení a okrajové podmínky	31
5.4. Síť metody konečných prvků.....	31
5.5. Presentace a analýza výsledků.....	31
5.5.1. Buzení strunou G.....	32
5.5.2. Buzení strunou D.....	33

5.5.3. Buzení strunou A	34
5.5.4. Buzení strunou E	35
5.5.5. Srovnání výsledných grafů	35
Závěr.....	37
Zdroje	38

Úvod

Hudba byla od nepaměti důležitou součástí společnosti. Kvalita hudby a hudební produkce byla jedním z indikátorů lidského pokroku. Pro člověka je přirozené snažit se o zlepšení svých životních podmínek, a to obnáší i zlepšování kvality hudebních prožitků. Smyčcové nástroje jsou považovány za jedny z nejdokonalejších hudebních nástrojů. Kvalitní nástroje jsou umělecká díla a opravdu precizní inženýrské kousky. I přesto je stále co zlepšovat.

U kontrabasů a violoncell se objevují tzv. vlčí tóny, které kazí kvalitu zvuku. Zkoumáním rezonančních vlastností nástrojů lze odhalit příčinu této anomálie. Výzkum v oblasti rezonance smyčcových nástrojů se soustředí především na housle, protože jsou nejpoužívanějším nástrojem z této skupiny hudebních nástrojů. Nicméně i kontrabas byl podroben výzkumu.

Každý nástroj má ale jinou stavbu těla a jiné mechanické vlastnosti. Pro mě, jako pro kontrabasu je důležité rozumět svému nástroji, a proto jsem se rozhodl zkoumat mechanické vlastnosti na svém kontrabasů a jeho kobylce. Provedením harmonické analýzy bude možné zjistit případnou korelaci mezi tvarem křivky harmonické analýzy a frekvencí, na které se nachází vlčí tón.

V této práci se nejprve podíváme na smyčcové nástroje z hlediska jejich stavby a účelu v hudbě, potom se zaměříme na jejich rezonanční vlastnosti, následně si představíme základní pojmy dynamiky, které nás budou zajímat při měření, a nakonec provedeme modální a harmonickou analýzu na kontrabasové kobylce.

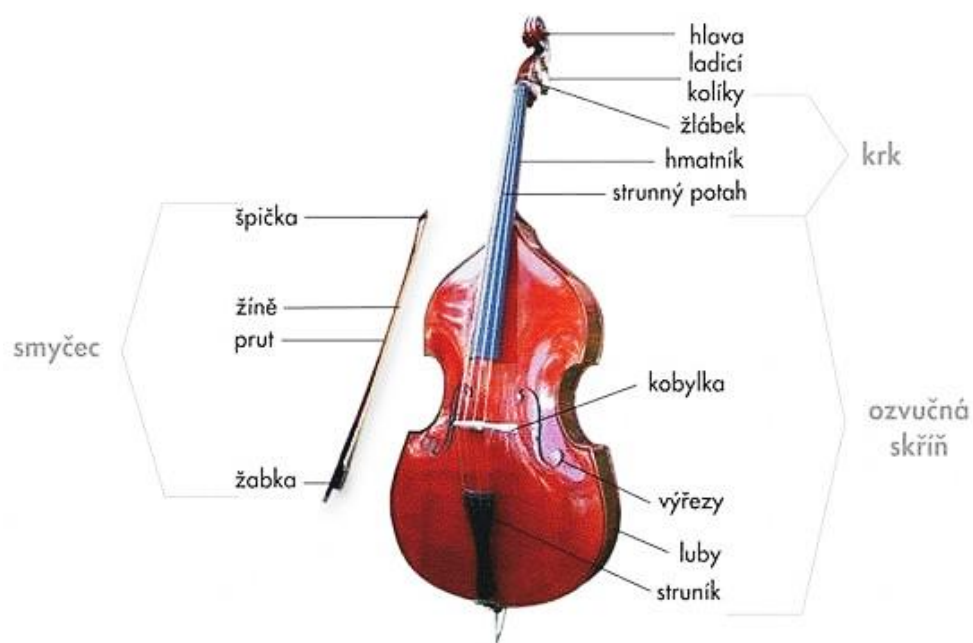
Popisování fyzikálních principů hudebních nástrojů se věnují knihy *The physics of musical instruments* od autorů Fletcher a Rossing z roku 1998 a *Hudební akustika* od Syrového z roku 2013. Z těchto knih budu hlavně čerpat v rešerši o smyčcových nástrojích a na závěr porovnáím výsledky svého bádání s daty z těchto knih.

1. Smyčcové nástroje

Smyčcové nástroje tvoří základ hudebních těles už od dob baroka (17. století) (Čížek, 2002). Nachází uplatnění jak v klasické hudbě, tak v různých kapelách, lidových i popových. To, že jsou využívány téměř v jakékoli hudbě, může být způsobeno tím, že na smyčcové nástroje se může hrát mnoha způsoby. Zvuková barevnost těchto nástrojů je široká, a tedy i využití tomu odpovídá.

Široký rozsah, který smyčcové nástroje pokrývají, je jedním z důvodů pro tvorbu jádra symfonických orchestrů. Takový rozsah by nebyl výhodný pro jeden nástroj, proto se vyvinuly různě velké smyčcové nástroje. V hudební praxi se dnes setkáme především s houslemi, violou, violoncellem a kontrabasem.

1.1. Popis částí smyčcových nástrojů



Obrázek 1 Popis kontrabasu a smyčce a jejich částí (Boldini, 2010).

Na obr. č. 1 jsou popsány části kontrabasu a kontrabasového smyčce. Smyčcové nástroje jsou si velmi podobné – skládají se ze stejných částí. Největší částí smyčcových nástrojů je trup – ozvučná skříň. Ta je tvořena horní deskou, spodní deskou a luby. Horní deska bývá zpravidla vyrobena ze smrkového dřeva a spodní deska a luby z dřeva javorového (Pilař, 1986). Do horní desky jsou vyřezány dva otvory ve tvaru písmene „f“. Ty slouží k lepšímu šíření zvuku z ozvučné skříňe do okolí. Důležitými součástmi trupu smyčcových nástrojů jsou tzv. duše a

basový trámec. Duše je příčka mezi horní a spodní deskou, je umístěná pod nohou kobylky pod nejvyšší strunou. Zpevňuje trup nástroje, přenáší vibrace na spodní desku, a zesiluje vyšší harmonické frekvence zvuku. Basový trámec je naopak umístěn na horní desce pod nejnižší strunou a roznáší nižší zvukové frekvence.

Na trup se připojuje krk s hmatníkem a hlavicí (šnekem). Krk se vyrábí opět z javorového dřeva a hmatník většinou z ebenového dřeva (Pilař, 1986). Hmatník slouží k tisknutí strun a tvoření různých tónů. Na konci krku se nachází hlavice. To je zdobný prostor pro ladící kolíky, který slouží k uchycení strun. Prostor pro namotané struny je schovaný pod ozdobným šnekem, u kontrabasů se můžeme setkat i s jinými tvary, např. hlavou lva, andílka aj. Ladící kolíky jsou u kontrabasu specifické. K ladění se používají ozubená kola ovládaná šnekem, protože síla v strunách je příliš velká na to, aby kolíky odolaly síle pouze statickým třením mezi kolíkem a otvorem, do kterého jsou uloženy. U ostatních smyčcových nástrojů se tento mechanismus nepoužívá, protože svojí hmotností zhoršuje kvalitu zvuku.

Druhý konec strun je uchycený v tzv. struníku, který je uchycen zespoda nástroje za tzv. žalud, ze kterého se u spodních smyčcových nástrojů (violoncella a kontrabasu) vysouvá bodec. Struník může být vyroben z různých materiálů, nejčastěji ze dřeva, a může být i zdobený. Struny jsou napnuté od struníku, přes kobylku ke kolíkům. Kobylka je speciálně tvarovaný kus dřeva javoru a má několik funkcí (Pilař, 1986). Zaprvé napíná struny, aby se na ně dalo hrát. Je zaoblená, aby šlo hrát na jednotlivé struny zvlášť. Přenáší zvukové vlnění do ozvučné desky a zároveň svým tvarem filtruje nežádoucí frekvence.

Nejčastěji se hraje na čtyřstrunné kontrabasy. Ty mají struny naladěné v kvartách. Jejich tóny jsou: E (41,2 Hz), A (55,0 Hz), D (73,4 Hz) a G (98,0 Hz) (Online tone generator, 2024). Existují i pětistrunné kontrabasy, na které se hrává v orchestru. Pátá struna rozšiřuje dolní rozsah nástroje – tón C (32,7) resp. H (30,9). Struny se vyrábí kovové a střívkové. U moderních nástrojů se používají převážně kovové. Na střívkové s hrává na dobové nástroje z období baroka (Kment, 1988).

1.2. Historie smyčcových nástrojů

Smyčcové nástroje jsou jednou z hlavních složek hudby už od začátku středověku. Vznikli modifikací ze starých viol (Čížek, 2002), na které se hrálo až do období baroka. Byly rozděleny do dvou skupin podle způsobu hraní. Viola da braccio (paže), ze které se vyvinuly dnešní housle a viola, a violu da gamba (noha), z té se staly violoncello a kontrabas (Čížek, 2002). Staré violy se vyráběly z podobných materiálů jako moderní nástroje (Čížek, 2002). Horní deska byla

nejčastěji vyrobena ze smrkového dřeva a luby a spodní deska z javorového dřeva. Oba typy nástrojů mají na stejném místě umístěnou duši a basový trámec, které do velké míry ovlivňují kvalitu a barvu zvuku. Nástroje se nejvíce liší tvarem a způsobem hraní (Celý, 2007). Horní deska starých viol je výrazně méně klenutá než například u dnešních houslí a spodní deska byla nejčastěji rovná. Luby se dříve vyráběly vyšší, než je tomu dnes. Další rozdíl je v ladění nástrojů a počtu jejich strun. Staré violy, konkrétně viola da gamba, viz obr. 2 vlevo, měla 6 až 7 strun, které byly laděny v kvartách a mezi prostředními strunami byla tercie. U moderních nástrojů najdeme 4 struny laděné v kvintách, u kontrbasu v kvartách.

Dnešní smyčcové nástroje, viz obr. 2 vpravo, mají mnohem kvalitnější zvuk, silnější tón a lépe rezonují. To je následkem proměny tvarové konstrukce rezonanční skříně a použitých materiálů, především výměna střevoových strun za kovové. Tyto změny výrazně proměnily fyzikální vlastnosti smyčcových nástrojů. Od konce 18. století se vývoj houslí prakticky zastavil (Celý, 2007). Nebylo nutné zvedat kvalitu jejich zvuku, takže zvukové i technické vlastnosti houslí se za posledních 200 let příliš nezměnily.



Obrázek 2 Viola da gamba (vlevo) a moderní violoncello (vpravo) (Brandi, 2017).

1.3. Ostatní smyčcové nástroje

Většina výzkumu se prováděla na houslích (Fletcher a Rossing, 1998), protože jsou ze smyčcových nástrojů nejběžnější a používají se i pro sólovou hru. Ve skupině smyčcových

nástrojů je ale více nástrojů než jen housle, které jsou nejvýše položené. Dále tam patří i viola, violoncello a právě kontrabas. V tomto pořadí jsou nástroje na obr. 3.



Obrázek 3 Porovnání smyčcových nástrojů – housle, viola, violoncello, kontrabas (Hudební nauka, 2021).

1.3.1. Housle

Nejmenším a nejpopulárnějším smyčcovým nástrojem jsou housle. Tvoří značnou část klasického symfonického orchestru (Micka, 1977). Housle jsou spíše melodickým nástrojem. Většina skladatelů věnovala část svého díla houslím. Je pro ně napsáno mnoho koncertů, sonát a jiných skladeb. K neznámějším patří koncerty pro housle a orchestr od skladatelů jako je P. I. Čajkovskij, A. Dvořák, D. Šostakovič, J. Sibelius aj. Housle také najdeme v různých komorních uskupeních, např. smyčcových kvartetech, klavírních triích a spoustě dalších (Micka, 1977).

Housle se vyvíjely ze starých viol a do dnešní podoby se vyvinuly během 16. a 17. století (Celý, 2007). K prvním houslařům, kteří se podíleli na vzniku moderních houslí, patří A. Amati, A. Stradivari a A. Guarneri (Celý, 2007). Housle se drží na rameni pod bradou. Mají nejvyšší rozsah ze smyčcových nástrojů. Mají čtyři struny laděné v kvintách – g, D1, A1, E2 (Budiš, 1975).

1.3.2. Viola

Druhým nejvyšším smyčcovým nástrojem je viola. Stejně jako housle se na violu hraje na rameni. Viola má 4 struny laděné v kvintách. Celý rozsah je posunutý o kvintu níž – c, g, D1, A1 (Budiš, 1975). Její funkce je také melodická, ale spíše tvoří druhý hlas k houslím. Má stejný tvar, ale je o něco větší. Měla stejný vývoj jako housle (Celý, 2007). Pro lajky jsou tyto nástroje téměř nerozeznatelné, ale v orchestru má důležitou roli, svým rozsahem vyplňuje

rozsahový prostor mezi houslemi a violoncelly. Viola se uplatňuje mimo symfonický orchestr také ve smyčcovém kvartetu a jiných komorních uskupeních. Pro violu existuje také celá řada sólových skladeb, ale nejsou z hudebního hlediska příliš významné (Čížek, 2002).

1.3.3. Violoncello

Violoncello se společně s kontrabasem řadí do spodních smyčcových nástrojů. Jeho úloha v orchestru je zčásti doprovodná, ale i melodická. Opět má 4 struny, které jsou laděné o oktávu níž než viola – C, G, d, a – rozsah violoncella je podobný rozsahu lidského hlasu (von Wasielewski, 1894), je to velmi příjemná poloha, a proto je pro violoncello napsáno velké množství sólové hudby (von Wasielewski, 1894). Violoncello tvořívá basový doprovodný hlas ve smyčcovém kvartetu, bývá součástí klavírního tria a jiných komorních uskupení. Nejznámější koncerty pro violoncello a orchestr jsou od skladatelů A. Dvořáka, D. Šostakoviče, C. Saint-Saënsa a J. Haydna. Violoncello je přibližně dvakrát větší než housle. Kvůli své velikosti se na něj hraje v sedě s bodcem opřeným o zem. Tento styl hry se vyvinul z violy da gamba (von Wasielewski, 1894), ačkoliv se violoncello společně s houslemi a violou řadí do tzv. houslové odnože smyčcových nástrojů. Oproti tomu kontrabas vychází v rodiny viol (Kment, 1988).

1.4. Srovnání nástrojů

Smyčcové nástroje jsou si velmi podobné. Nejnápadnější rozdíl je ve velikosti. Zvukově nejdokonalejším nástrojem jsou housle. Mají precizně vyrobený tvar a velikost, aby rozeznávaly celý svůj rozsah. Oproti tomu jsou například violoncello a kontrabas v nevýhodě, protože jejich trup je na nízké frekvence příliš malý. Aby měly stejné chování na svém rozsahu, musely by být ještě větší. V tab. 1 porovnáme velikosti trupu, délky strun (menzuru) a tloušťku a výšku kobyly jednotlivých nástrojů.

Nástroje se vyrábí v různých velikostech pro edukační účely pro děti. V tab. 1 jsou uvedeny rozměry nejběžněji používaných nástrojů. U houslí, violy, violoncella 4/4 (celé) a u kontrabasu 3/4.

	housle	viola	violoncello	kontrabas
délka trupu [m]	0,36	0,43	0,78	1,11
délka struny [m]	0,33	0,39	0,70	1,06
výška kobyly [mm]	41	51	90	150
max tloušťka kobyly [mm]	4,2	5,5	11	21

Tabulka 1 Rozměry smyčcových nástrojů (Zadina, 2007).

1.5. Odlišnost kontrabasu

Kontrabas je rozsahově nejhlubší ze smyčcových nástrojů. Typicky má 4 struny laděné v kvartách, E – A – D – G (Kment, 1988). Je používán prakticky v každém žánru. Od klasicismu, více až od romantismu je kontrabas také brán jako sólový nástroj a skladatelé pro něj začali komponovat různě náročné skladby (Kment, 1988). Stále se ale kontrabas používá především v orchestrech a jiných souborech.

Všechny běžné smyčcové nástroje (housle, viola, violoncello a kontrabas) jsou si velmi podobné. Jejich hlavní rozdíl je ve velikosti a rozsahu tónů. Kontrabas, jako jediný z této nástrojové rodiny, se od zbylých smyčcových nástrojů liší i tvarem (Kment, 1988). Tím, že není u kontrabasu tak stará houslařská tradice, mají výrobci kontrabasů větší svobodu. U kontrabasů můžeme tedy narazit na různé tvarové anomálie podle výrobce a někteří si na ikonickém tvaru postavili i značku, například značka Pöllmann (Špaček, 2014).

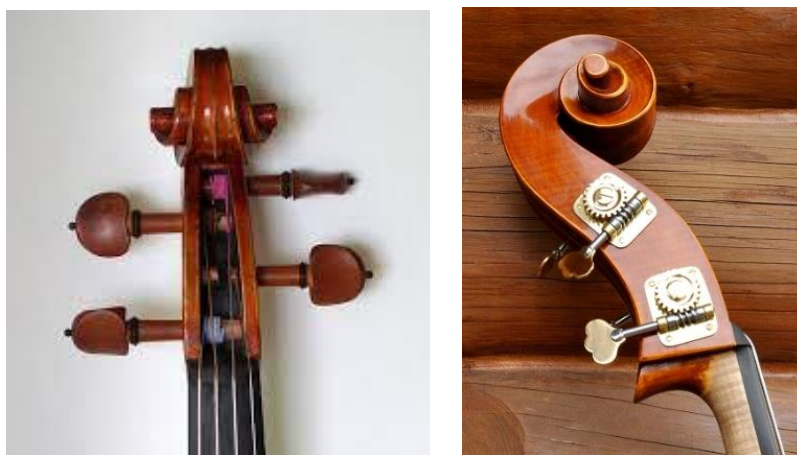
Na rozdíl od kontrabasů se housle, viola a violoncello historicky oddělily od starých viol dříve. Mají tedy jiný tvar, pochází z tzv. houslové rodiny (Špaček, 2014). Kontrabas se stále podobá spíše violy da gamba. Rozdíly, které vidíme u kontrabasů tedy vycházejí zejména z konstrukce violy da gamba. Je to například jiný tvar trupu u krku. Rozdíl je patrný na obr. 4. Vlevo jsou housle, vpravo kontrabas. U ostatních smyčcových nástrojů míří krk kolmo k trupu, zatímco krk kontrabasů tvarově navazuje na jeho trup (Kment, 1988).



Obrázek 4: Tvar trupu u krku u houslí a kontrabasů (České hudební nástroje, 2022).

Další znak kontrabasů je zadní deska, která na rozdíl od houslí nemusí být klenutá (Kment, 1988). Některé kontrabasy ji klenutou mají, ale to je opět dáno svobodou výrobců kontrabasů, které nesvazuje houslařská tradice. Violy da gamba měly užší horní část trupu. S tím se můžeme setkat i u některých kontrabasů. Posledním výrazným rozdílem v konstrukci

je řešení ladění (Kment, 1988). Kontrabasové struny mají mnohem větší napětí ve strunách než například housle, takže se ladění řeší mechanikou, která je podobná jako u kytar. Struny jsou namotány na kolíku, který je vyvedený na venkovní stranu krku. Je spojený s ozubeným kolem, které je ovládané ladícím kolíkem. Ladící mechanika je realizována kovem. Výrobci kontrabasů se snaží ladící mechaniku udělat s co nejmenší hmotností, protože ovlivňuje vlastní frekvenci nástroje a jeho zvuk (Kment, 1988). U ostatních smyčcových nástrojů se tento problém nevyskytuje, protože ladící kolíky jsou menší a vyrobené ze dřeva. Porovnání ladících kolíků u houslí (vlevo) a kontrabasu (vpravo) je na obr. 5.



Obrázek 5 Ladící kolíky houslí a kontrabasu (České hudební nástroje, 2024).

Nakonec oproti ostatním smyčcovým nástrojům je kontrabas jako jediný laděný v kvartách. Tento rozdíl je opět historicky spjatý s vývojem z violové rodiny. Některé kontrabasy jsou pětistrunné, aby se zvětšil dolní rozsah (Špaček, 2014).

Způsob hry na kontrabas a tvoření tónu

Hráči u kontrabasu stojí nebo sedí. Kontrabas je bodcem položený na zemi a mezi nohama hráče se nachází jeho trup. Krk s hmatníkem vede k hráčově levému rameni. Kontrabasista mačká levou rukou struny a pravou rukou hraje tzv. pizzicato nebo arco. Pizzicato je styl hry, kdy hráč rozezní strunu pomocí prstů – drnknutím (jako na kytáře). Arco je pak hra smyčcem (Kment, 1988). Prst nebo smyčec rozezní strunu, vibrace se díky kobylce přenesou na horní desku ozvučné skříně. Díky duši a basovému trámci se rozezní celý trup a vibrace se zesílí a šíří se do okolí.

Prvek, který u smyčcových nástrojů vytváří zvukové kmity, je struna. U moderních smyčcových nástrojů jsou struny nejčastěji kovové, u starších (dobových) se používají střívkové (Kment, 1988). Po vychýlení struny prstem nebo smyčcem se strunou začne šířit příčné vlnění (v kolmém směru ke směru délky struny). Šíření vibrací na jednorozměrné

nehmotné struně bez tlumení můžeme popsat pomocí diferenciální rovnice (Fletcher a Rossing, 1998)

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}. \quad (1)$$

Struna je totožná s osou x , vychýlení probíhá v ose y a c je rychlost šíření vln na struně, která je dána vztahem (Fletcher a Rossing, 1998):

$$c = \sqrt{\frac{F}{d}}, \quad (2)$$

kde F je tahová síla struny a d je délková hustota struny.

Řešení rovnice je součtem odražených vln od konců struny. V případě smyčcových nástrojů se jedná o pevné konce. Vlny se od pevného konce odráží s opačnou fází. To se projeví při jejich interferenci. Řešení má tento tvar (Fletcher a Rossing, 1998):

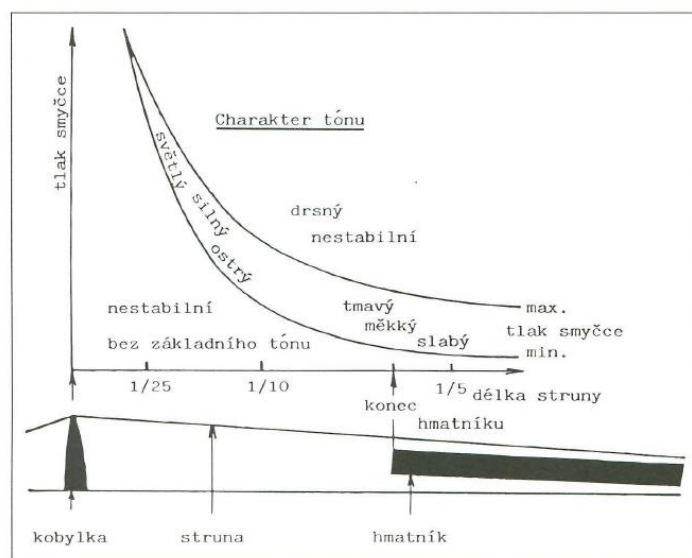
$$y = \sum_n (A_n \sin \omega_n t + B_n \cos \omega_n t) \sin k_n x, \quad (3)$$

kde ω_n je vlastní frekvence struny a k_n je vlnové číslo dáno vztahem (Fletcher a Rossing, 1998):

$$k_n = \frac{\omega_n}{c}. \quad (4)$$

Při buzení struny záleží na místě buzení. Výšku tónu (tedy základní frekvenci kmitání) to nezmění, ale ovlivní to zastoupení vyšších harmonických frekvencí (Fletcher a Rossing, 1998). Například při drknutí v polovině struny se ozvou liché harmonické frekvence a sudé budou utlumeny. V 1/5 struny se každá pátá vyšší harmonická frekvence výrazně utlumí.

Vyšší harmonické frekvence mají vliv na barvu tónu, takže hráč může podle potřeby upravovat místo buzení. V praxi se tohoto efektu využívá především při hraní arco (smyčcem). Tyto techniky hry se nazývají *sul tasto* a *sul ponticello* (Syrový, 2013). *Sul tasto* je hra nad hmatníkem. Tón má jemnější barvu a je kulatější. *Sul ponticello* je hra u kobylky. Struna zde klade větší odpor a musí se na ni více tlačit. Tón je ostrý a výrazný. Schéma charakteru tónů při různých stylech hraní je na obr. 6.



Obrázek 6 Buzení struny smyčcem (Syrový, 2013).

Při kontinuálním buzení struny – konstantní rychlostí smyčce – se struna pohybuje díky statickému tření zároveň se smyčcem, než se dostane do své krajní polohy a překmitne do opačné krajní polohy, kde se opět začne pohybovat stejným směrem jako smyčec (Fletcher a Rossing, 1998). Tentokrát je v kontaktu se strunou jiné místo na smyčci. Smyčec strunu rozkmitává, ale zároveň ji i tlumí. To umožňuje ještě větší kontrolu nad poměrem vyšších harmonických frekvencí, a dokonce i zesílení některé z nich. Buzení struny smyčcem má pilovitý tvar (Fletcher a Rossing, 1998).

1.6. Kontrabasová kobylka

Klíčovým prvkem v přenášení zvukových vibrací na ozvučnou skříň je tzv. kobylka. Vlnění strun na horním oblouku kobylky do ozvučné skříň přenese zvuk ve formě periodické síly, kterou působí nohy kobylky na trup. Tím se rozpohybuje horní deska a nástroj zvuk zesílí.

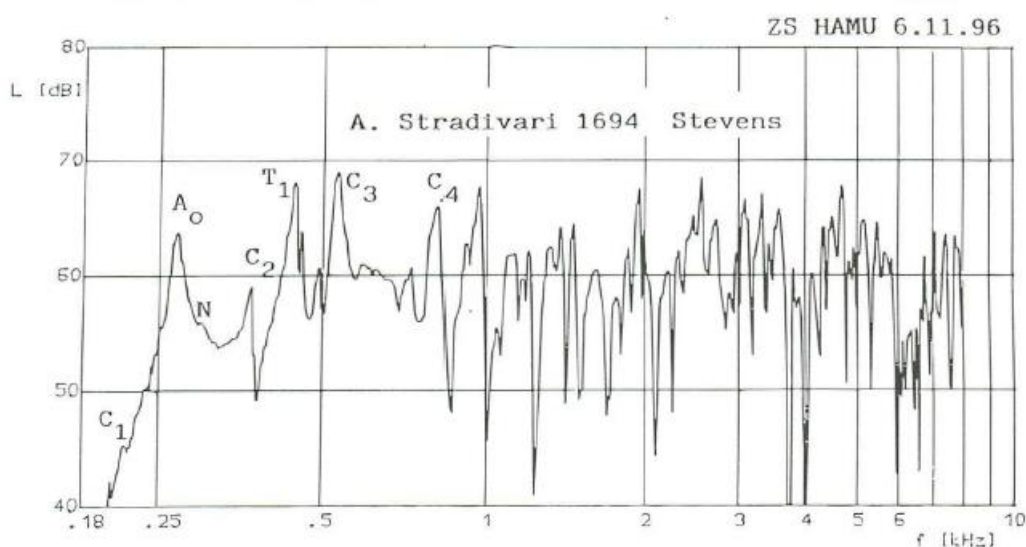
Výzkumem v oblasti kobylek smyčcových nástrojů se zjistilo, že kobylky fungují jako zvukový filtr, který ovlivňuje rezonanční vlastnosti nástroje (Fletcher a Rossing, 1998). Také se přišlo na to, že kobylky, jak je dnes známe, mají optimální tvar a produkují zvuk s vysokou kvalitou – zesilují zvuk a tlumí šum.

2. Rezonance smyčcových nástrojů

I když smyčcové nástroje existují už stovky let, nevědělo se o jejich rezonančních frekvencích mnoho. Protože na rozdíl od kytar mají mnohem složitější tvar a jejich desky jsou vypouklé, bylo příliš obtížné vypočítat jejich vlastní frekvenci a harmonické vlastnosti. Poznání o rezonančních vlastnostech smyčcových nástrojů se začalo detailněji vyvíjet až od začátku 20. století (Fletcher a Rossing, 1998). Přispěly k tomu přesnější měřicí přístroje, zejména optické (laserové) a digitální. Výpočet vlastních frekvencí jednotlivých částí nástrojů (horní a spodní deska, hmatník, krk...) se dá realizovat pomocí metody konečných prvků, chování celého nástroje se zatím měří experimentálně. Hlavní cíle experimentů jsou housle a violoncella (Fletcher a Rossing, 1998), protože jsou to spíše sólové nástroje. U viol a kontrabasů není výzkum tak běžný.

V této práci se budeme zabývat rezonančními vlastnostmi kontrabasové kobylky, ale abychom pochopili souvislosti mezi kobylkou a celým nástrojem, popíšeme to, co už je známo o rezonančním chování smyčcových nástrojů na houslích.

Ideální rezonanční charakteristika pro většinu hudebních nástrojů, včetně smyčcových, by byla taková, že všechny frekvence budou zesíleny rovnoměrně. Při pohledu na rezonanční charakteristiku houslí Antonia Stradivaria, viz obr. 7 vidíme, že u skutečných nástrojů taková charakteristika není.



Obrázek 7 Harmonická analýza houslí A. Stradivaria (Syrův, 2013).

Měření na obr. 7 se provádělo na houslích z dílny A. Stradivaria z roku 1694. Graf ukazuje závislost zesílení v decibelech na frekvenci buzeného tónu v kilohertzích. Můžeme si

všinou, že křivka opravdu není hladká. Rozsah houslí začíná na tónu g (196,00 Hz) (Online tone generator, 2024). Jednotlivé body (lokální maxima) jsou hodnoty, při kterých vykazují některá z částí houslí rezonanci. Hlavní části houslí, které ovlivňují jejich rezonanci jsou následující: horní deska, spodní deska a prostor mezi nimi (vzduchová mezera) (Fletcher a Rossing, 1998). Tyto části se podílejí na rezonanci výrazně více než například krk nebo hmatník. Rezonanční frekvence jednotlivých částí jsme schopni určit výpočtem, či experimentálně a ve výsledném měření celého nástroje můžeme pozorovat lokální maxima rezonance právě v těchto bodech. Identifikujeme čtyři různé druhy rezonancí – A, C, T a N (Fletcher a Rossing, 1998). A je rezonance vzduchové mezery mezi horní a spodní deskou houslí, C je rezonance celé ozvučné skříně, T je rezonance horní desky a poslední N, ne příliš výrazná, je rezonance krku houslí. U kvalitních houslí často splývá s bodem vlastní rezonance vzduchu A_0 . V oblasti vyšších frekvencí (přibližně od 2 kHz) začíná mít na rezonanci nástroje podstatný vliv i kobylka (Fletcher a Rossing, 1998), které se nadále budeme věnovat více.

2.1. Vlčí tóny

Pokud je vlastní frekvence, nebo některý z vyšších módů, vzduchové mezery nebo jiné rezonanční části nástroje blízký požadované (hrané) frekvence, dochází k tomu, že vlastní frekvence se stane energeticky výhodnější pro daný kmitočet (Syrův, 2013). Struna se snaží udržet si kmitočet, na který je naladěná, ale rezonance nástroje tento tón strhává na vlastní frekvenci, nebo některý z vyšších módů. Takto se struna začne pohybovat v obou frekvencích a dochází k rázům, které označujeme jako vlčí tóny (Syrův, 2013). U houslí se vlčí tóny vyskytují v nižších polohách nástroje, od g_1 po g_2 , ale u nižších smyčcových nástrojů (violoncella a kontrabas) se vlčí tóny mohou objevit prakticky kdekoliv.

Problematika vlčích tónů se řeší především dvěma různými způsoby (Syrův, 2013). První z nich se dá realizovat pouze na violoncellu. Stisknutím trupu stehny se změní jeho rezonanční vlastnosti. Druhým způsobem je tzv. odvlkovač. Je to malé závaží, které se připevní na strunu mezi kobylku a struník. Tím odstraní vlčí tón. Tento zásah bohužel ovlivňuje i kvalitu ostatních tónů. Vždy je tedy lepší, když nástroj žádný vlčí tón nemá.

Kontrabas, kterým se zabývá tato práce má vlčí tón na tónu Gis (103,8 Hz) (Online tone generator, 2024). V praktické části se bude zkoumat mimo jiné, zda na této frekvenci nevykazuje rezonance kobylky nějakou anomálii.

3. Základní pojmy dynamiky

Dynamika je odvětví mechaniky, které zkoumá příčiny pohybu (Lepil, 2020). Do tohoto oboru patří vlastnosti těles jako jsou například vlastní frekvence, vlastní tlumená frekvence, harmonické módy a harmonická analýza.

3.1. Vlastní frekvence

Každý fyzický objekt, ať už hřídél, most nebo kontrabasová kobylka, má svoji vlastní frekvenci. To je taková frekvence, při níž se objekt rozkmitá s největší amplitudou. Při této frekvenci se v ideálním stavu (bez ztrát) přeměňuje pouze kinetická energie na potenciální a naopak (Lepil, 2020). V technické praxi je tento jev často problematický, protože stačí malá budící síla o frekvenci rovné vlastní frekvenci a těleso se rozkmitá s velkou amplitudou (Stejskal, 2001). Je tedy důležité se zajímat o vlastní frekvence navrhovaných konstrukcí. I u hudebních nástrojů se musí dbát na to, aby nástroj nezesiloval nějakou frekvenci příliš. U hudebních nástrojů se usiluje o vyvážený zvuk.

Vlastní frekvence se u složitějších tvarů zjišťuje obtížně. Používají se k tomu numerické metody, například metoda konečných prvků. U nejjednodušších modelů vlastní frekvence závisí na dvou veličinách – hmotnosti m a tuhosti k (Lepil, 2020). U tělesa o hmotnosti m zavěšeného na pružině o tuhosti k se jeho vlastní frekvence vypočítá pomocí jednoduché rovnice:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (5)$$

3.2. Vlastní tlumená frekvence

Tlumení je vlastnost tělesa, která ovlivňuje jeho vlastní tlumenou frekvenci. Pro výpočet vlastní tlumené frekvence se musí uvážit ztráty při přeměně potenciální a kinetické energie (Lepil, 2020), na rozdíl od netlumené vlastní frekvence. Těleso buzené vlastní tlumenou frekvencí se rozkmitá maximální amplitudou, ale na rozdíl od netlumeného kmitání má tato amplituda konečnou hodnotu. Vlastní tlumená frekvence je o něco menší než teoretická vlastní netlumená frekvence, což plyne ze vztahu (6). Vlastní tlumená frekvence se vypočítá pomocí vztahu:

$$\Omega_{tl} = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2}, \quad (6)$$

kde m je hmotnost, k je tuhost pružiny a b je konstanta tlumení.

3.3. Modální analýza

Modální analýza je metoda popisování dynamických vlastností těles (Svoboda, 2013). Pomocí ní se dají zjistit tyto dvě charakteristiky: vlastní frekvence – frekvence, na které se daný mód vyskytuje – a tvar vlastního kmitu. Modální analýza popisuje chování tělesa jen pro vybrané frekvence. Abychom zjistili, jak reaguje těleso na jakoukoli frekvenci, musíme provést tzv. harmonickou analýzu.

3.4. Harmonická analýza

Harmonická analýza se využívá pro zjištění ustálené reakce objektu na kmitání síly harmonickým průběhem o budicí frekvenci v určitém rozsahu (Harmonic response analysis in Ansys, 2024). Zpravidla se charakteristika zanáší do grafu, kde se zobrazuje maximální amplituda závislá na frekvenci. Maxima této funkce by pak měly odpovídat zjištěné vlastní tlumené frekvence a módům z modální analýzy.

3.5. Metoda konečných prvků

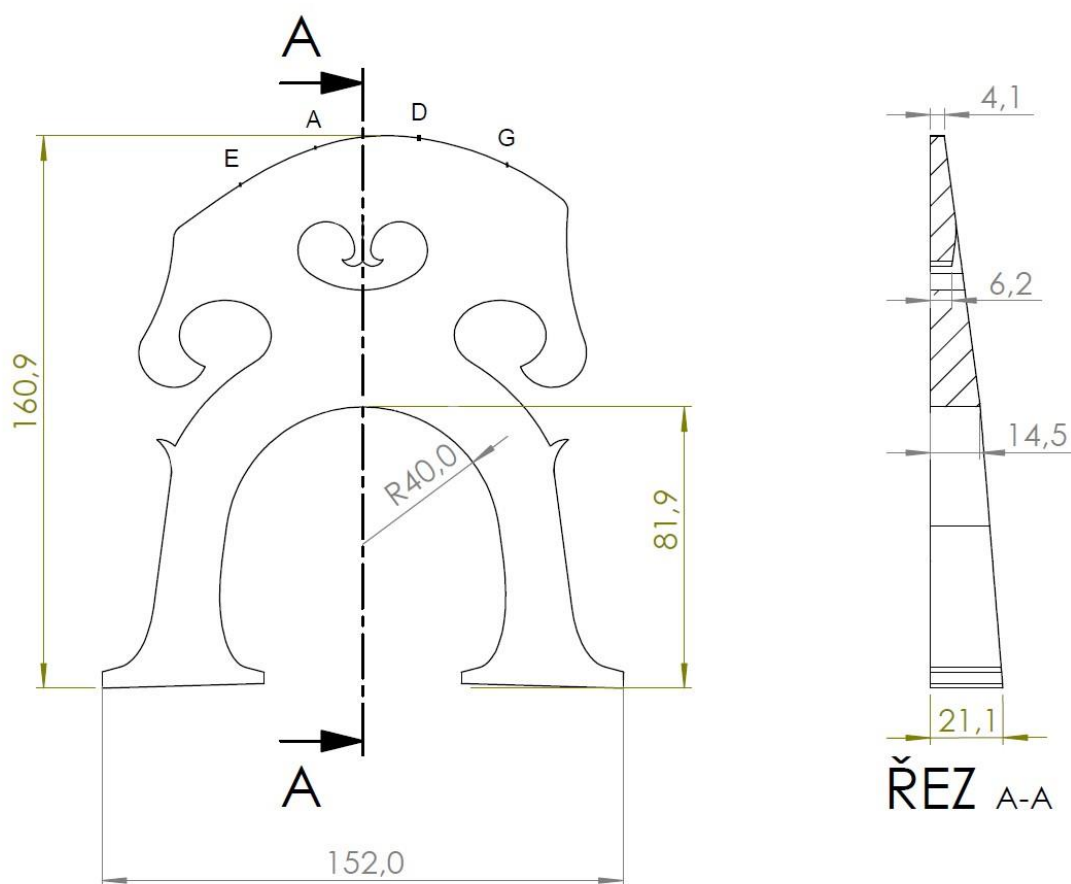
Metoda konečných prvků je numerická metoda používaná k řešení diferenciálních rovnic a problémů mechaniky těles, jako jsou např. tepelná roztažnost nebo mechanická deformace. Také se využívá na řešení modální nebo harmonické analýzy.

4. Modální analýza kobyly vybraného kontrbasu

Při určování módů, vlastní frekvence nebo při harmonické analýze závisí výsledky nejvíce na tvaru objektu a na materiálu, ze kterého je vyroben (především jeho tuhosti). Tvar byl pro účely měření vymodelován v programu SolidWorks. Kontrabasová kobylyka, která je měřena, je jako většina kobylyk vyrobena ze dřeva javoru.

4.1. Model geometrie

Pro snazší a přesnější změření kontrabasové kobylyky ji bylo potřeba vyjmout z nástroje. To je riskantní, protože po vyjmutí kobylyky se naruší rovnováha v nástroji a může se uvolnit duše nástroje. To se také stalo a bylo potřeba dát nástroj znovu seřadit k houslaři, než se na něj dalo opět hrát.



Obrázek 8 Model kontrabasové kobylyky.

Po změření všech podstatných rozměrů kobylyky ji bylo třeba vymodelovat. K tomu byl použit software SolidWorks. Na horním okraji kobylyky jsou vyznačená místa, kde dochází ke kontaktu kobylyky se strunami. Struny jsou popsány písmeny, podle toho, jaký tón hrají – G, D, A, E. Model geometrie je na obr. 8. Model se následně exportoval ve formátu STEP, aby mohl být importován do softwaru ANSYS.

4.2. Model materiálu

Javor patří mezi tvrdší dřeva. Je proto výhodný ke konstrukci kobylky, která má za úkol přenášet frekvence a slouží jako těsná mechanická vazba. Také patří mezi světlejší dřeva. Z estetického hlediska kobylka vyniká na nástroji. I díky tomu se používalo javorové dřevo na tento účel u smyčcových nástrojů. V práci byl použit lineární ortotropní model materiálu, pro který je nutno znát hustotu ρ , Youngův modul E , Poissonův poměr μ a modul pružnosti ve smyku G ve všech osách. Tyto hodnoty jsou v tabulce (2) (Sonderegger, 2013). Směry byly určeny podle vzoru dřeva na kobylce – podle směru letokruhů.

E_x	1,74	Gpa
E_y	2,91	Gpa
E_z	17,1	Gpa
G_{xy}	0,366	Gpa
G_{yz}	1,68	Gpa
G_{xz}	1,07	Gpa
μ_{xy}	0,39	[-]
μ_{yz}	0,091	[-]
μ_{xz}	0,061	[-]
ρ	630	kg/m ³

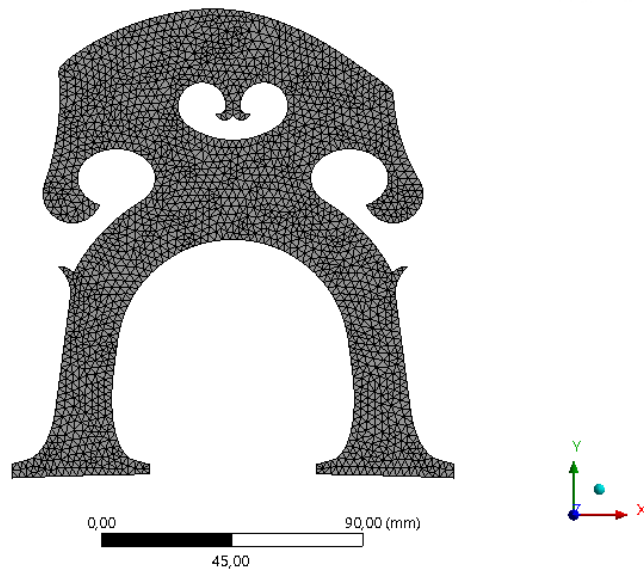
Tabulka 2 Mechanické vlastnosti dřeva javoru.

4.3. Uložení a okrajové podmínky

Aby bylo možné provést modální analýzu, bylo potřeba těleso uchytit vazbami. Na spodní plochu nožiček kobylky se aplikoval příkaz „Fixed support“. Byl tedy znemožněn jakýkoliv pohyb těchto ploch. Na horní hraně kobylky byl znemožněn pohyb kobylky v místech uchycení strun ve směru struny.

4.4. Síť metody konečných prvků

Řešený objekt je třeba rozdělit na konečný počet prvků, viz obr. 9. Tento proces se nazývá diskretizace. Velikost prvků, tzv. sizing, byla zvolena na 2,5 mm. Čím je hustší síť tím déle trvá výpočet, ale také dostaneme přesnější výsledek.



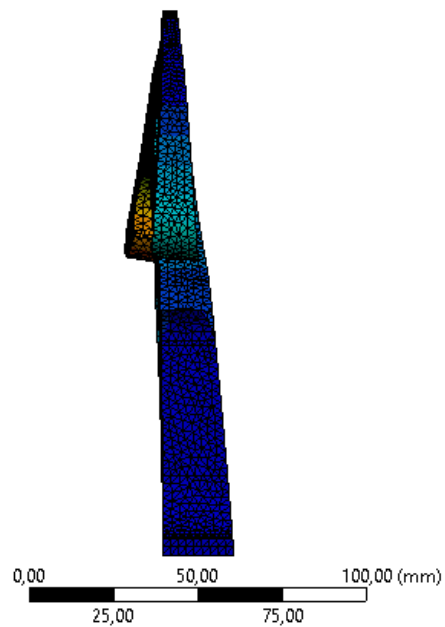
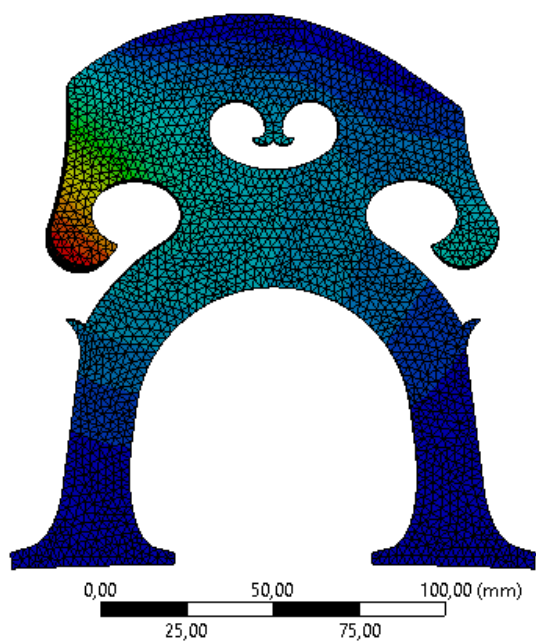
Obrázek 9 Síť konečných prvků na kontrabasové kobylice.

4.5. Presentace a analýza výsledků

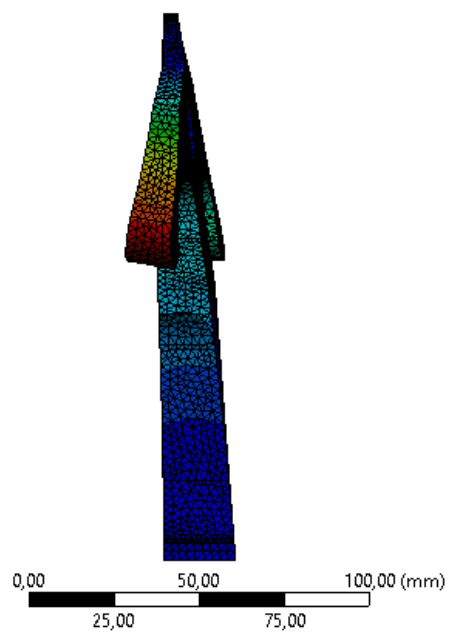
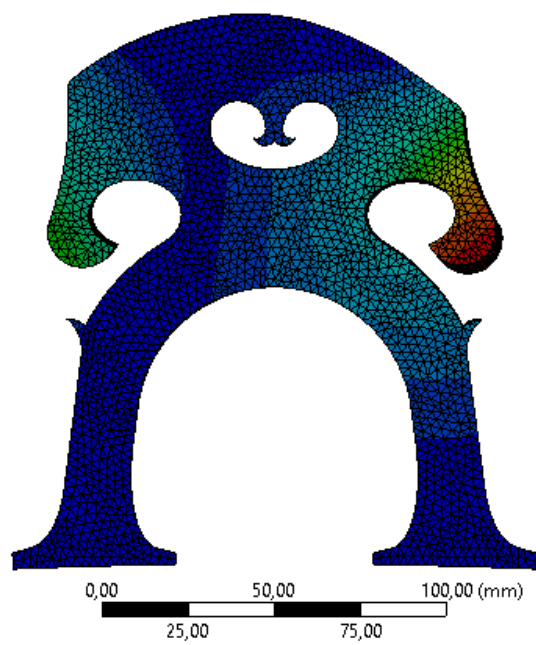
Podle rozsahu kontrbasu byl určen rozsah frekvencí, pro které jsme vyhodnocovali modální analýzu. Rozsah kontrbasu výjimečně přesáhne 500 Hz, ale nastavení bylo zvoleno se značnou rezervou – 0-1000 Hz. V tomto rozsahu bylo nalezeno 5 módů. Frekvence těchto módů jsou v tabulce (3). Tvary jednotlivých módů jsou na obr. 10-14.

Módy	Frekvence [Hz]
1	513,22
2	575,45
3	750,44
4	902,39
5	984,88

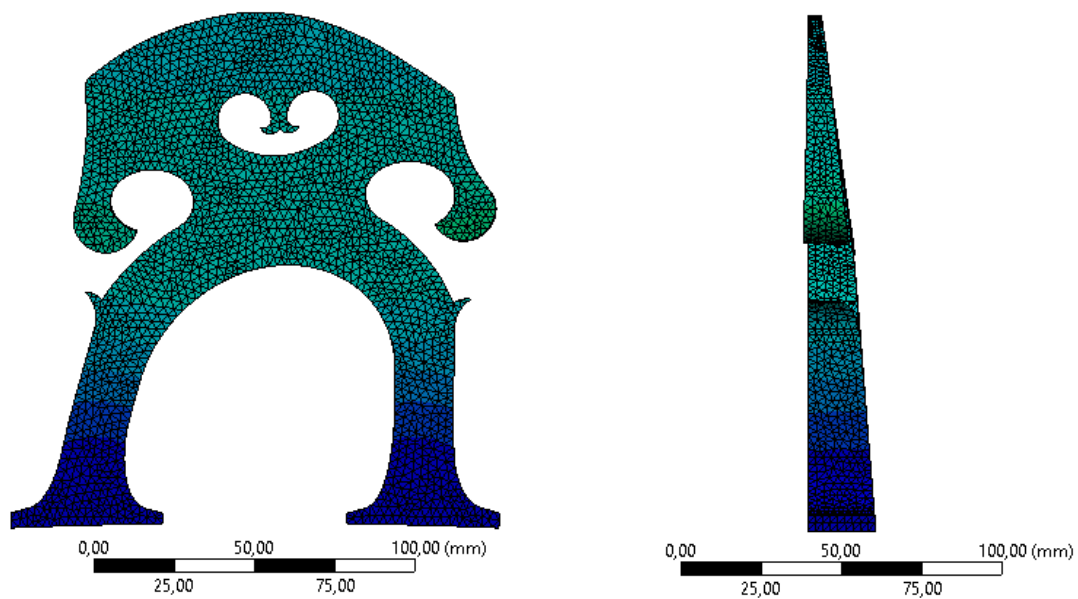
Tabulka 3 Frekvence módů kontrabasové kobylinky.



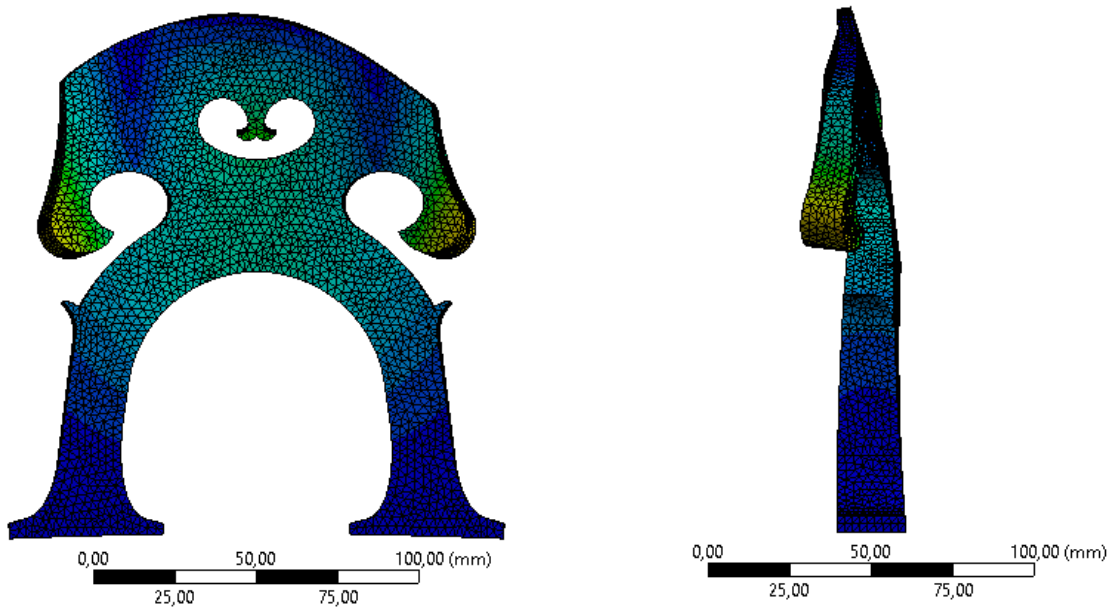
Obrázek 10 První mód (513,22 Hz).



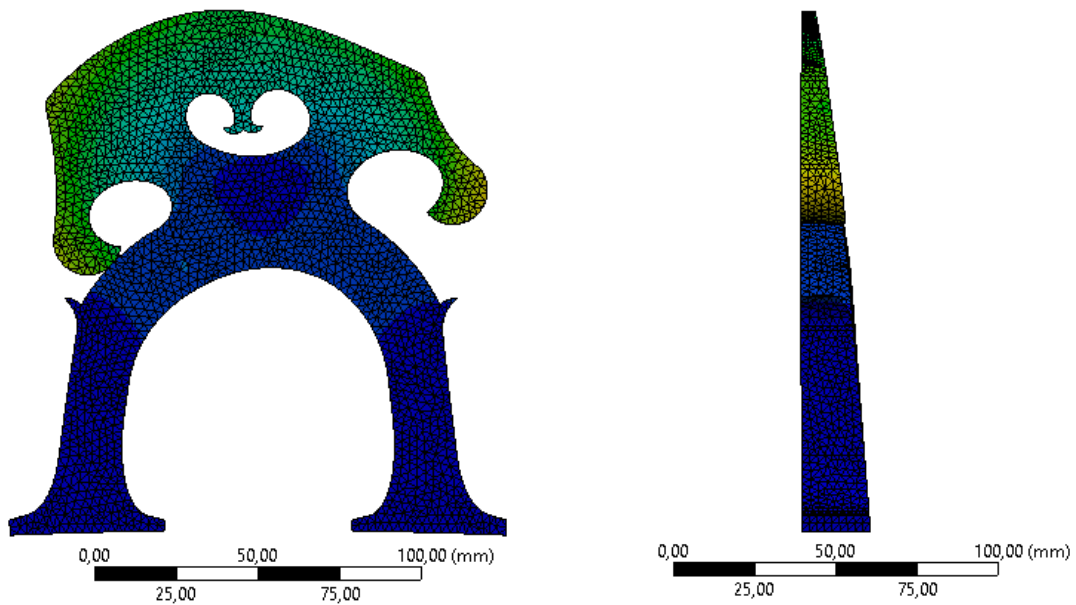
Obrázek 11 Druhý mód (575,45 Hz).



Obrázek 12 Třetí mód (750,44 Hz).



Obrázek 13 Čtvrtý mód (902,39 Hz).



Obrázek 14 Pátý mód (984,88 Hz).

Modální analýza byla provedena na rozsahu 0-1000 Hz. Rozsah frekvencí, které se hrají na kontrabas málokdy přesáhne 500 Hz. Lze tedy říci, že se kobyłka běžně nedostane ani na první mód (513,22 Hz). Její vlastní frekvence se neprojeví na přenosu akustických vln. Ve výsledcích nejsou uvedeny rozměry, protože ty modální analýza neumí vyhodnocovat. Slouží pouze orientačně pro zjištění tvarů jednotlivých módů.

V prvním a druhém módu se rezonance projeví především v postranních výběžcích kobyłky, které nemají zásadní vliv na přenos vibrací. Ve třetím módu se kobyłka vychyluje do stran. Čtvrtý mód se jako jediný ze zkoumaných módů prohýbá. Ostatní tvary módů se pohybují pouze do strany. V pátém módu rezonuje horní část kobyłky.

5. Harmonická analýza kobylky vybraného kontrabasu

Harmonická analýza se řeší v softwaru ANSYS velmi podobně jako modální analýza. Řešení jsme hledali opět na rozsahu 0-1000 Hz. Protože kontrabas má 4 struny, byla provedena 4 měření. V každém měření byla budící síla na jiném místě, podle umístění strun, viz kap. 4.1.

5.1. Model geometrie

Pro simulaci harmonické analýzy byl použitý stejný model geometrie jako pro modální analýzu, viz kap. 4.1.

5.2. Model materiálu

Model materiálu byl opět použitý stejně jako v modální analýze. Hodnoty materiálu jsou v tabulce (2), viz kap. 4.2.

5.3. Uložení a okrajové podmínky

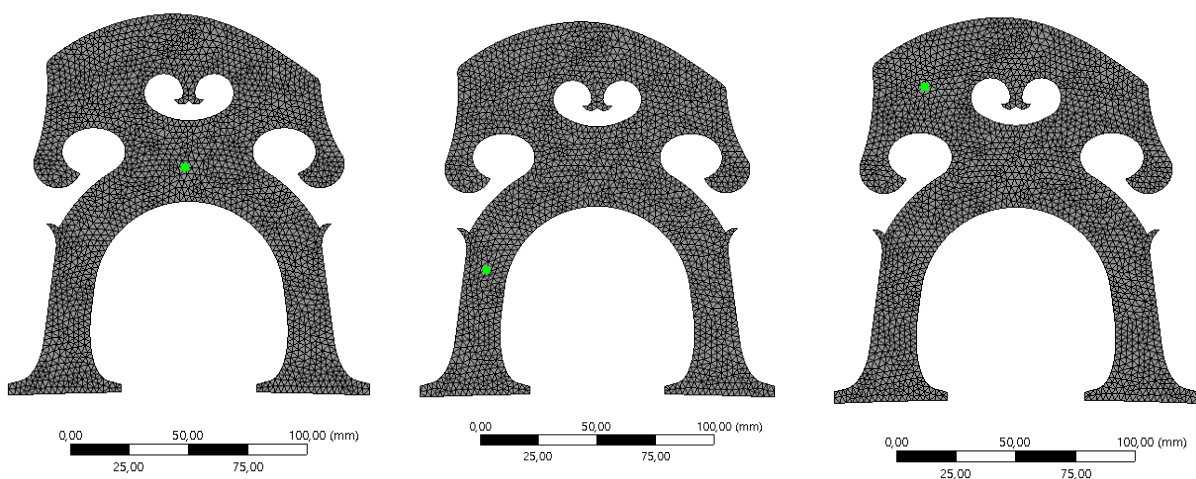
Stejně jako v modální analýze bylo nutné na spodní plochu nožiček kobylky aplikovat příkaz „Fixed support“. Byl tedy znemožněn jakýkoliv pohyb těchto ploch. Na horní hraně kobylky byl znemožněn pohyb kobylky v místech uchycení strun ve směru struny. Dále se jednotlivé struny postupně budily harmonickou silou. Síla byla nastavená na 70 N v záporné části osy y.

5.4. Síť metody konečných prvků

Síť metody konečných prvků byla opět nastavena jako v kap. 4.4.

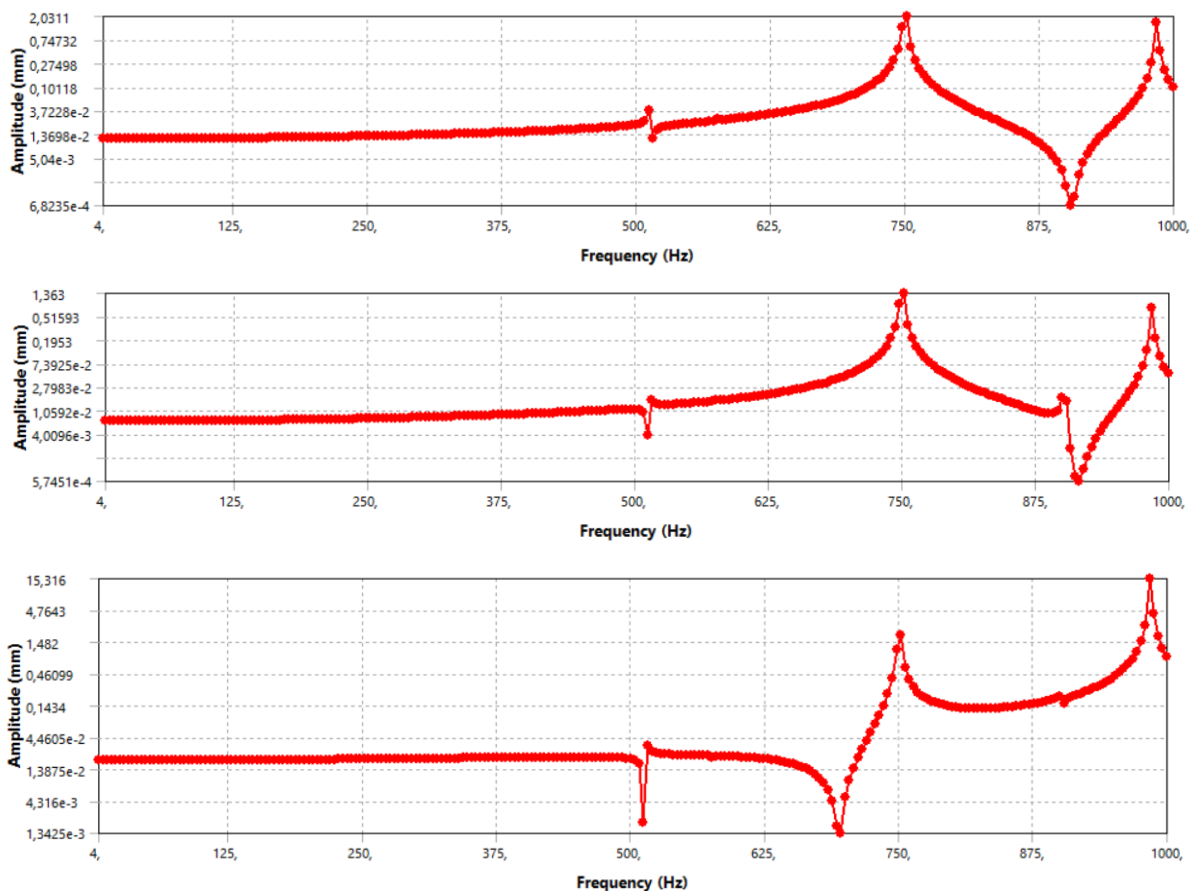
5.5. Presentace a analýza výsledků

Harmonickou analýzou byla zjišťována amplituda ustálené reakce na budící sílu v konkrétních místech na kobylce. První místo bylo ve středu kobylky, druhé bylo uprostřed jedné z nožiček a třetí v horní části kobylky, viz obr. 15. Byly zvoleny tři body, abychom zjistili, jestli kobylka nevykazuje na různých místech různé harmonické vlastnosti.



Obrázek 15 Umístění zkoumaných bodů (střed, nožička, horní část kobylky).

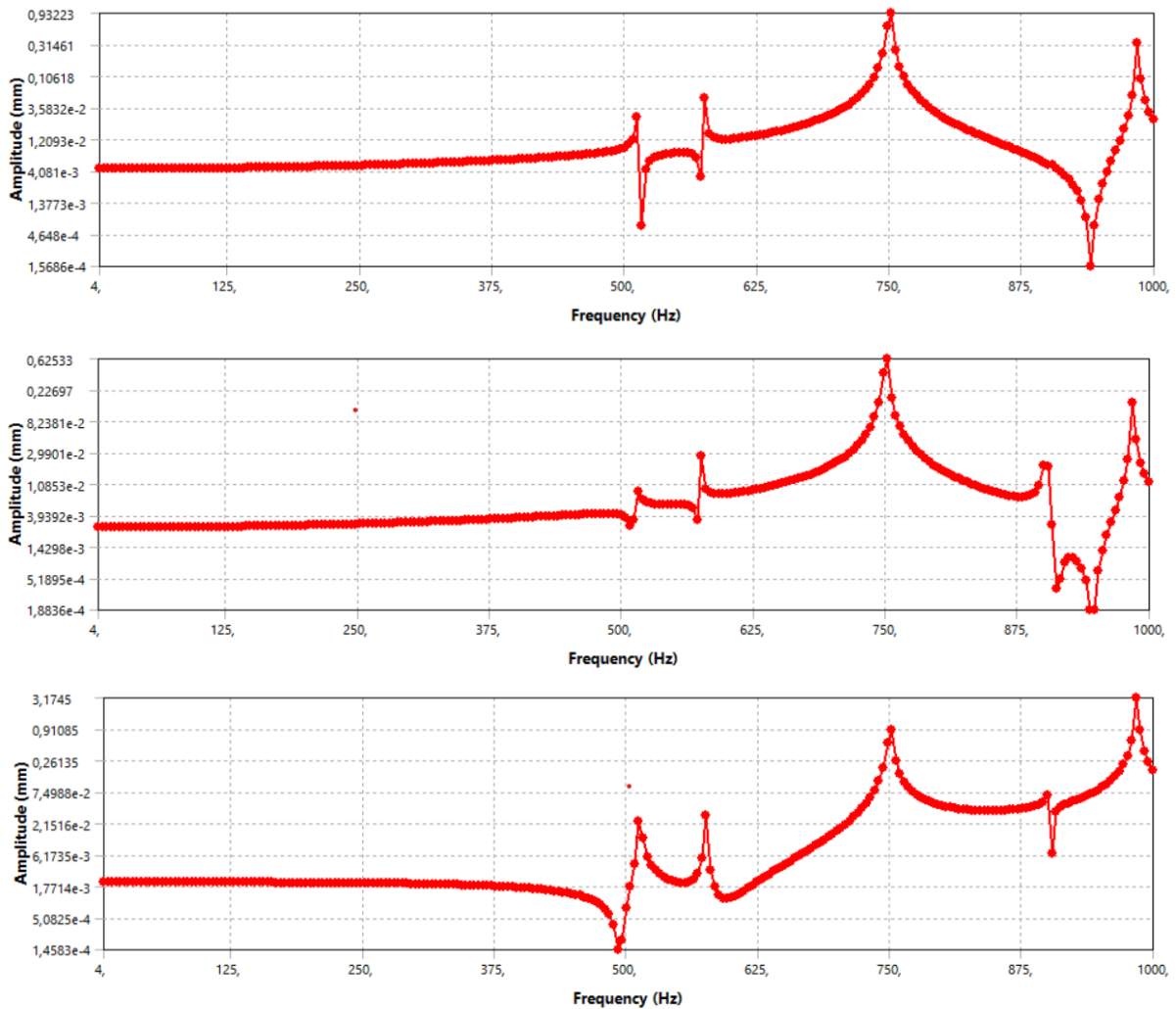
5.5.1. Buzení strunou G



Obrázek 16 Buzení strunou G (střed, nožička, horní část).

Všechny křivky mají podobný průběh. Od 0 do 500 Hz mají téměř konstantní amplitudu. Přibližně na frekvenci 513 Hz lze pozorovat lokální extrém. Jedná se o první mód kobyly, viz kap. 4.5. Nejvýraznější frekvence buzení strunou G je okolo 750 Hz. Tam se opět nachází jeden z módů, konkrétně třetí. Tento mód má takový tvar, že se pohybuje ze strany na stranu v rovině xy . Měřené body se tedy pohybují ve směru osy x . V horní části kobyly pozorujeme největší amplitudu kmitání na frekvenci 984 Hz. Opět se jedná o kmitání v rovině xy , ale pátý mód, který se zde nachází je charakteristický tím, že vibruje především horní část kobyly.

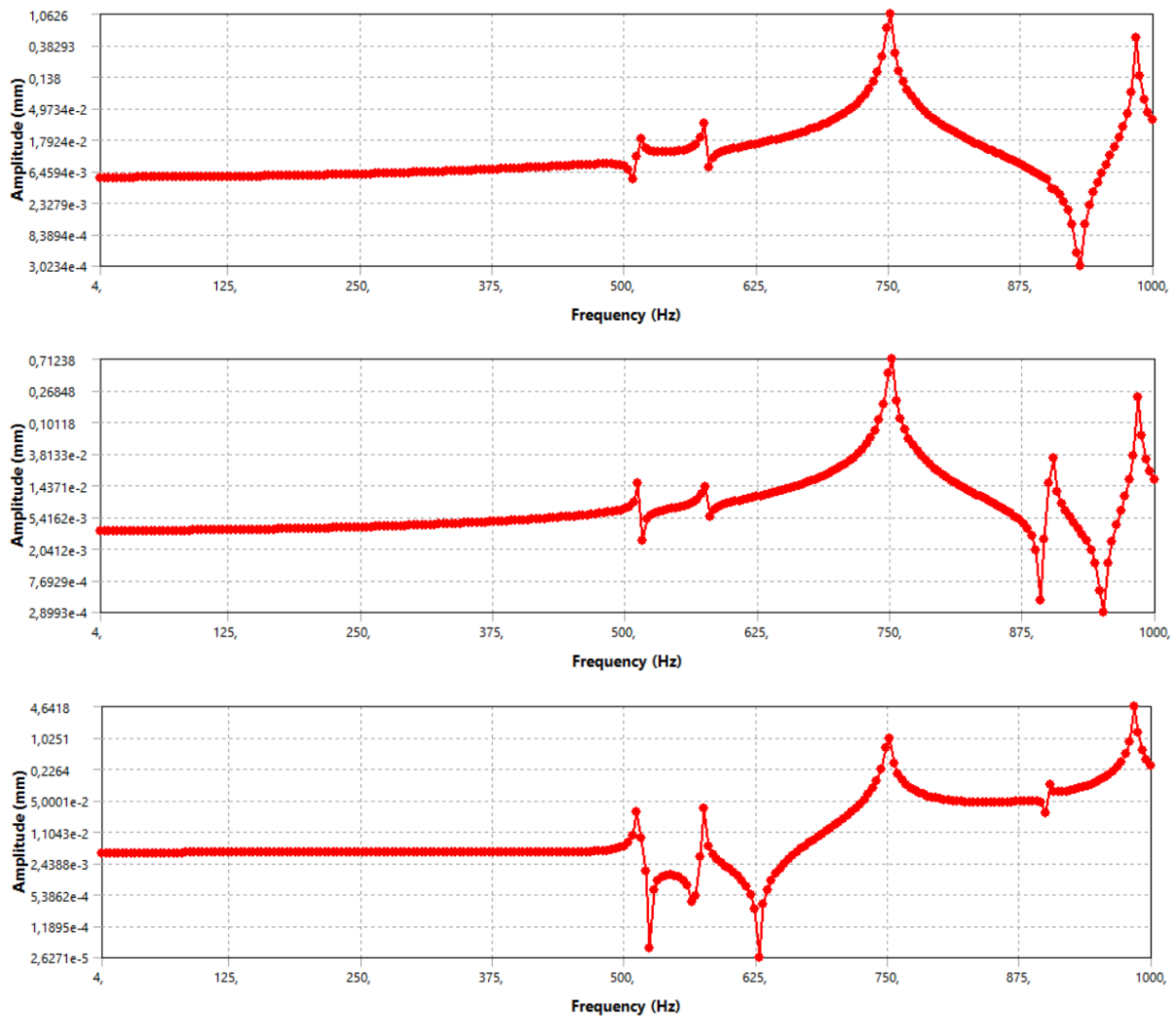
5.5.2. Buzení strunou D



Obrázek 17 Buzení strunou D (střed, nožička, horní část).

Charakteristika buzení strunou D vypadá podobně jako při buzení strunou G. Je zde patrný výraznější vliv druhého módu na frekvenci 575 Hz. Čtvrtý mód na frekvenci 902 Hz je také výraznější. Zde ale působí naopak tím, že na měřených bodech zeslabuje vibrace. Tvar čtvrtého módu vypadá tak, že na měřených bodech má místa, která jsou blízko uzlů kmitání, proto se ve grafu jeví tato místa jako zeslabená.

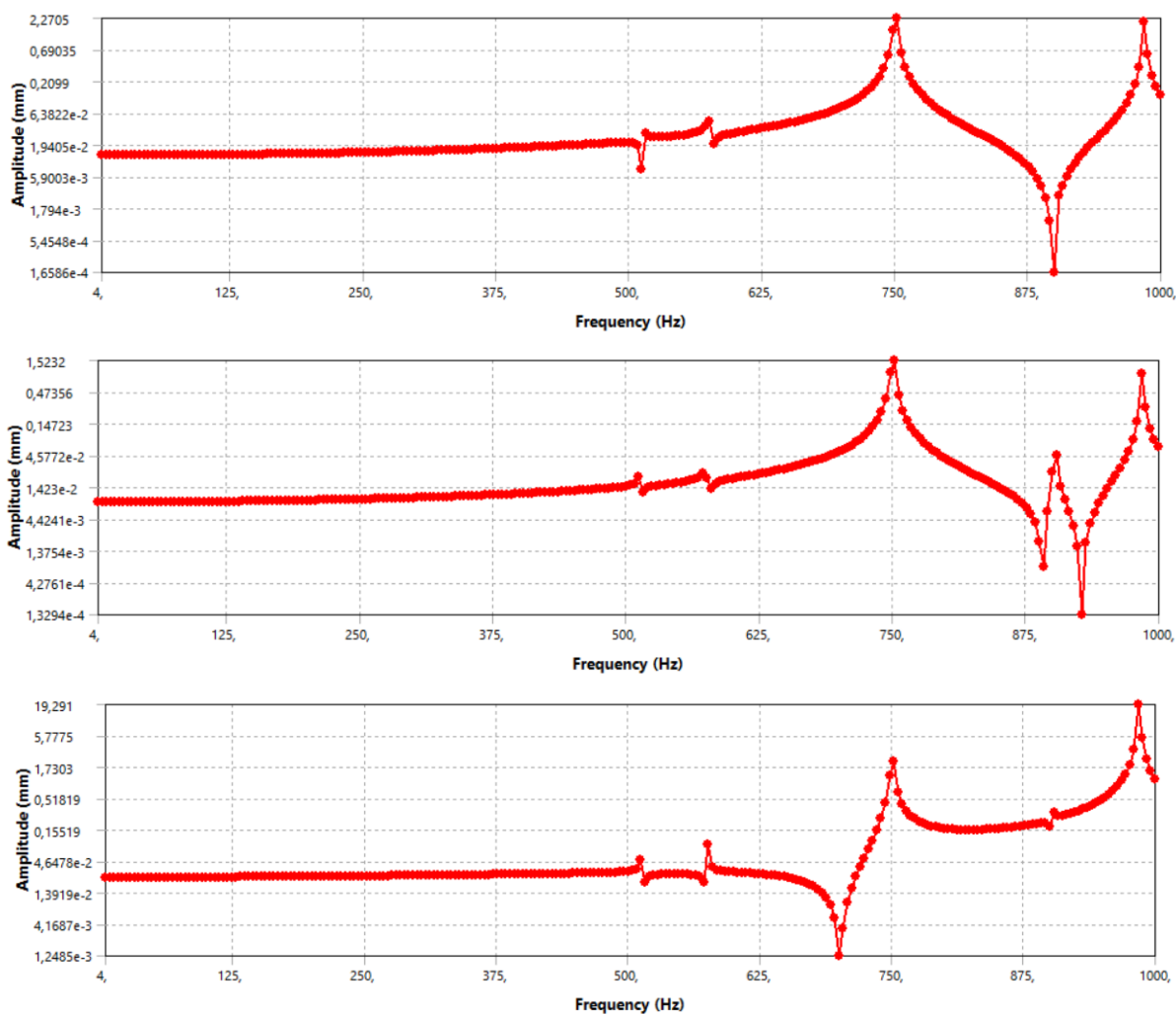
5.5.3. Buzení strunou A



Obrázek 18 Buzení strunou A (střed, nožička, horní část).

Opět výsledky vykazují téměř konstantní amplitudu do 500 Hz a výchylky na frekvencích, které byly zjištěny modální analýzou. Ve středu kobyly a na jejích nožičkách je největší amplituda na frekvenci 750 Hz. V horní části, kvůli tvaru pátého módu je největší amplituda na frekvenci 984 Hz.

5.5.4. Buzení strunou E



Obrázek 19 Buzení strunou E (střed, nožička, horní část).

V grafech buzení strunou E opět pozorujeme konstantní průběh do poloviny intervalu (500 Hz). První dva módy jsou menší než u ostatních buzení, zatímco ostatní módy vykazují velké výchylky. Ve středu a na nožičce kobylinky je dominantní třetí mód, v horní části kobylinky je maximální amplituda na pátém módu.

5.5.5. Srovnání výsledných grafů

Největší amplituda kmitání v první polovině grafu (0-500 Hz) se vyskytovala u buzení strunou E, druhá největší u buzení strunou G. To jsou krajní struny. Je tedy patrné, že čím je buzená síla dál od středu kobylinky, tím větší způsobuje kmitání.

Maximální výchylky ve vyšších frekvencích se pohybují v řádu milimetrů. To je poměrně velká amplituda, ale jde o frekvence, které jsou v rozsahu, kde se na kontrabas už příliš nehraje. Když už se v těchto frekvencích vyskytují hrané tóny, jde o velmi slabé tóny – nejsou buzeny tak velkou silou. Jejich amplituda bude ve skutečnosti menší.

Vlčí tón, který se na tomto konkrétním kontrabasu vyskytuje na frekvenci 103,8 Hz (Gis) je v bezpečné oblasti konstantní amplitudy. Můžeme tvrdit, že kobylka nemá vliv na výskyt vlčího tónu.

Závěr

Pro výzkum kontrabasové kobylky bylo třeba znát dostatek informací o problematice smyčcových nástrojů a o důležitosti kobylky při přenášení zvukových vibrací do těla nástroje. Zdroj, ze kterého jsem čerpal nejvíce informací je kniha *The physics of musical instruments* od Nevilla H. Fletchera a Thomase D. Rossinga z roku 1998. Kniha se věnuje dopodrobna problematice smyčcových nástrojů a jejich částí a také kontrabasu.

Výsledky modální analýzy kontrabasové kobylky objevily v rozsahu 0-1000 Hz pět módů, viz tab. 3. Frekvence jednotlivých módů jsou mimo běžný rozsah kontrabasu. Stejně jako je popsáno v literatuře (Fletcher a Rossing, 1998) vykazuje kontrabasová kobylka velký počet módů ve vyšších frekvencích. Tvary jednotlivých módů ukázaly, jakým způsobem kobylka kmitá, což bylo výhodné při analyzování výsledků harmonické analýzy.

Výsledky harmonické analýzy se doplňovaly s těmi z modální analýzy. Lokální maxima a minima křivek grafů harmonické analýzy se vyskytovala na frekvencích jednotlivých módů zjištěných v modální analýze. Podle tvarů těchto módů bylo možné zjistit, jakým směrem kobylka v daném bodě kmitá. V oblasti běžného rozsahu kontrabasu, přibližně do 500 Hz, vykazovala kobylka téměř konstantní amplitudu kmitů. Podobný výsledek byl očekávaný podle znalostí z knihy Fletchera a Rossinga. Buzení kobylky krajními strunami mělo za následek větší amplitudu kmitání než buzení prostředních strun. To se dá vysvětlit tím, že když je struna více vzdálená od středu kobylky, moment, který síla vytváří, je větší, a tedy i amplituda bude větší.

Harmonická analýza v oblasti okolo vlčího tónu (103,8 Hz) nevykazovala nic neobvyklého. Křivka byla téměř konstantní u všech buzených strun. Také žádný z módů zjištěný v modální analýze nebyl nalezen v okolí vlčího tónu. Dá se tedy vyvodit, že kobylka svými rezonančními vlastnostmi nepřispívá ke vzniku vlčích tónů. Příčina vzniku vlčích tónů bude ležet v jiné části nástroje.

Zdroje

BOLDINI, Roberto. 2010. Schéma kontrabas. In: Pinterest.com [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <https://in.pinterest.com/pin/223631937724841470/>.

BRANDI, Berry. 2017. Viola da gamba a violoncello. In: BBExperience [online]. [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: <https://bbexperience.org/updateblog/chicagostories5>.

BUDIŠ, Ratibor. Housle v proměnách staletí. Praha: Supraphon, 1975.

CELÝ, Ondřej. *Historie houslařství*. 2007. PhD Thesis. Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta.

ČESKÉ HUDEBNÍ NÁSTROJE. Housle, kontrabas. 2024. In: České hudební nástroje [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <https://www.chn.cz/>.

ČÍŽEK, B.: Hudební nástroje evropské hudební kultury. Praha: Adventinum, 2002. ISBN 80-7151-211-7.

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.

HARMONIC RESPONSE ANALYSIS IN ANSYS. In: Ansysy [online]. 2024. [2024-05-14] Dostupné z: <https://innovationspace.ansys.com/product/harmonic-response-analysis-in-ansys-mechanical/>.

HUDEBNÍ NAUKA. 2021. Srovnání smyčcových nástrojů. In: Liveworksheets.com [online]. [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: <https://www.liveworksheets.com/w/cs/hudebni-nauka/979470>.

JORDAN KIRKNESS, Double bass string tensions. [online]. [2024-05-28]. Dostupné z: <https://jordankirkness.tripod.com/dbstringtension.html>.

KMENT, Jan. Nejhlubší z rodu smyčců: Dějiny a literatura kontrabas. Praha: Supraphon, 1988.

MICKA, Josef Ladislav. Knížka o houslích a o mnohém kolem nich: pomocná literatura pro žáky Lidových škol umění a nižších tříd konzervatoří. 2. vyd. Praha: Panton, 1977.

LEPIL, Oldřich. Rezonanční křivka–portrét oscilátoru. *Matematika–Fyzika–Informatika*, 2020, 29.3: 201–213–201–213.

ONLINE TONE GENERATOR. In: Szynalski [online]. [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.szynalski.com/tone-generator/>.

PILAŘ, Vladimír; ŠRÁMEK, František. Umění houslařů. Praha: Panton, 1986.

SONDEREGGER, Walter, et al. Investigations on the physical and mechanical behaviour of sycamore maple (*Acer pseudoplatanus* L.). *European Journal of Wood and Wood Products*, 2013, 71.1: 91-99.

SVOBODA, Martin. Modální analýza soustavy tuhých těles. *Strojírenská technologie*, 2013, 116-121.

SYROVÝ, Václav, 2013. Hudební akustika. 3. Praha: Akademie múzických umění v Praze. ISBN 978-80-7331-297-8.

ŠPAČEK, Jan. Vývoj stavby kontrabasů. 2014.

VON WASIELEWSKI, Wilhelm Joseph. *The violoncello and its history*. Novello, Limited, 1894.

ZADINA, Zdeněk. Technologie stavby smyčcových hudebních nástrojů. 1. vyd. Praha: Panton, 2007.