

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA

ÚSTAV NAUKY O DŘEVĚ

ANALÝZA VIBRO-AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ KOBYLEK PIANA

Diplomová práce

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: **Analýza vibro-akustických vlastností kobylek piana** zpracoval sám a uvedl jsem všechny použité prameny. Souhlasím, aby moje diplomová práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a uložena v knihovně Mendelovy univerzity v Brně, zpřístupněna ke studijním účelům ve shodě s Vyhláškou rektora MU o archivaci elektronické podoby závěrečných prací.

Autor kvalifikační práce se dále zavazuje, že před sepsáním licenční smlouvy o využití autorských práv díla s jinou osobou (subjektem) si vyžádá písemné stanovisko univerzity o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuje se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla dle řádné kalkulace.

V Brně, dne:

Doskočil Tadeáš



**Jméno:**

Tadeáš Doskočil

**Název práce:**

Analýza vibro-akustických vlastností kobylek piana

**Abstrakt:**

Předmětem této diplomové práce je zkoumání akustických vlastností materiálů, jež jsou používány anebo připadají v úvahu pro výrobu kobylek piana. V práci je pojednáno o technologii výroby jednotlivých druhů kobylek a problematice, jež se k nim pojí. Dále jsou v této práci z hlediska akustických vlastností porovnány následující materiály: masivní horský javor, masivní skalní javor, javorová lamela, lamela javoru a mahagonu, eben, masivní buk, buková lamela, buk příčně lepený, lamela z buku a lignamonu a habr. Rozdíly akustických vlastností byly sledovány nedestruktivní metodou pomocí přístrojového měření a konečněprvkového modelu. Dále byla provedena frekvenční analýza zapůdované (zaklížené do dřevěného rámu) ozvučné desky klavíru.

Mezi měřenými vzorky byly nalezeny statisticky významné rozdíly v akustických vlastnostech. U měřené desky pak byly zjišťovány vlastní frekvence a průběh frekvenčního spektra v jednotlivých částech kobylky.

**Klíčová slova:**

Akustické vlastnosti, kobylka, logaritmický dekrement útlumu, piano, klavír, nedestruktivní testování, akustická konstanta, akustický vlnový odpor, přeměněná akustická účinnost

**Title of the thesis:**

Analysis of vibro acoustic properties of piano bridges

**Abstract:**

The subject-matter of the diploma thesis is the research of effects of acoustic properties which are used for making piano bridges. In this work technological process of different piano bridges is discussed and problems related to it. In the next step materials like: maple, hardrock maple, laminated maple, laminated maple and mahogany, ebony, beech, laminated beech, crosswise glued beech, laminated beech and lignamon and hornbeam are compared in the aspect of acoustic properties. The differences among acoustic properties were searched by non-destructive methods with the help of device metering and final elements method. A frequency analysis of embedded grand piano soundboard was made.

Statically eminent differences of acoustic properties were found among metering samples. There were found out the own frequencies of metering soundboard and frequency spectrum in particular parts of piano bridge.

**Key words:**

Acoustic properties, piano bridge, logarithmical decrement of damping, upright piano, grand piano, nondestructive testing of wood, acoustic constant, acoustic impedance, acoustic conversion efficiency

## **Poděkování:**

*Rád bych v této části práce poděkoval především firmě Petrof, nejen za umožnění mých školních experimentů a poskytnutí bezdozvukové komory v rámci mé diplomové práce, ale i za možnost zde pracovat, zdokonalovat se v oboru stavby klavírů, a získávat tolik žádanou praxi v této části dřevozpracujícího průmyslu. Rovněž bych rád poděkoval Střední uměleckoprůmyslové škole hudebních nástrojů a nábytku v Hradci Králové, která mi nejen poskytla základní znalosti v oblasti stavby klavírů a pianin při mém středoškolském studiu, ale vyšla mi vstříc při pomoci s výrobou měřených vzorků, bez nichž by tato práce nemohla vzniknout. Zvláštní díky pak patří jejím zaměstnancům Ing. Václavu Skálovi, Ing. Václavu Hornychovi a mistrovi odborného výcviku p. Miroslavu Kvasničkoví.*

*Dále bych rád poděkoval mé rodině za podporu, kterou mi v začátcích mého studia poskytla a bez níž by má vysokoškolská studia do fáze odevzdání diplomové práce pravděpodobně nikdy nedospěla. A rovněž prarodičům nejen za jazykovou korekturu a pomoc se stylistikou, ale i zázemí, které mi poskytli a poskytují.*

*Velké díky rovněž mému vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Tippnerovi Ph.D. za velmi vstřícný přístup při vedení práce a za mnohé konzultace, které mi poskytl a které výrazně převyšovali svoji hloubkou i délkou běžný standard.*

*Zvláštní díky pak patří Mgr. Blance Langerové, bez níž bych nikdy pravděpodobně nikdy nebyl v tom oboru, ve kterém pracuji a kterému se tak rád věnuji, a jež je mi tolik blízký.*

## Obsah

1) Úvod	10
2) Cíl práce	12
3) Literární přehled:	13
Výzkum a literatura v oblasti hudebních nástrojů a jejich materiálů	13
Historie a vývoj klavírových kobylek	15
a) konstrukce klavírů Bartolomea Cristoforiho	22
b) Anglická křídla konce 18. století	23
c) Anglické a francouzské klavíry kolem roku 1820	24
d) Klavíry druhé poloviny 19 stol.	25
e) Klavíry od roku 1875 dodnes	26
Konstrukce kobylek	27
Názvosloví:	27
Návrh kobylky a její řešení z hlediska konstrukce	29
Přípevnění kobylek na rezonanční desku	33
Povrchová úprava kobylek a rezonančních desek klavírů a pianin	35
Dokončení kobylek a problematika strunového přetlaku	36
Patenty v oblasti řešení pianových kobylek	37
Přehled řešení kobylek jednotlivými vybranými výrobci	38
August Förster	38
Petrof	39
Bösendorfer	40
Fazioli	41
Steinway and Sons	42
Steingraeber and Söhne	43
C. Bechstein	44
Yamaha	45
4) Metodika:	46
a) Sestrojení konečně prvkového modelu	46
1) Preprocessing:	47
2) Solution	47
3) Postprocessing	47
b) Přístrojové nedestruktivní testování:	48
1) Měření vlastních ohybových frekvencí vzorků	48

2) Měření vlastních frekvencí klavírového ozvučnicku	50
3) Výpočet jednotlivých podélných charakteristik	51
5) Výsledky a diskuze	52
a) Konečně prvková analýza vzorku	52
b) Analýza vibroakustických vlastností vzorků kobylek	56
Hodnocení z hlediska logaritmického dekrementu útlumu	56
Hodnocení vzorků podle hustoty	58
Hodnocení vzorků podle rychlosti vedení zvuku	60
Hodnocení vzorků z hlediska dynamického modulu pružnosti	61
Hodnocení vzorků z hlediska velikosti akustické konstanty a akustického vlnového odporu	63
Hodnocení vzorků z hlediska přeměněné akustické účinnosti	65
Korelační analýza měřených vzorků	67
c) Vibroakustická analýza klavírového ozvučnicku	68
6) Závěr:	69
Summary:	71
Zdroje:	72
Literatura:	72
On-line:	74
Seznam obrázků:	76
Příloha:	80
Zobrazení prvních pěti vlastních frekvencí vzorků	80
Zobrazení první vlastní podélné frekvence	81
Přehled frekvenčního spektra z analýzy ozvučnicku klavíru	82
Přehled vybraných patentových řešení kobylek	84



## Seznam zkratek:

PU	Povrchová úprava
LDD	Logaritmický dekrement útlumu
FFT	Rychlá Fourierova analýza
AC	Akustická konstanta
ACE	Přeměněná akustická účinnost
Z	Akustický vlnový odpor
E-dyn	Modul pružnosti
Rez. deska	Rezonanční deska
JV	Javor
BK	Buk
HB	Habr

## 1) Úvod

Při výběru tématu pro diplomovou práci, bylo ve spolupráci s firmou Petrof spol. s.r.o. zvoleno téma, jež se zabývá součástí ozvučnicku nástroje, kterýžto má, jak se výrobci těchto nástrojů shodují, v podstatě nejvýraznější vliv na jeho kvalitu. Touto důležitou součástí piana je kromě rezonanční desky i kobylka, jejíž úkol je podpírat struny nástroje a přenášet jejich chvění na rezonanční desku. Spektrum používaných technologií při výrobě kobylek, použitých materiálů, ale i odlišných tvarů a jejich pozicí na rezonanční desce je velmi bohaté, a přinést alespoň základní orientaci v něm, je jedním z úkolů této diplomové práce.

Slovo kompromis uvedené v předchozí větě je v oblasti výroby klavírů a pianin velmi důležité a často užívané. Konstruktor tohoto hudebního nástroje je totiž nucen řešit značnou spoustu požadavků, jež nástroj klade, avšak velmi často se tyto požadavky střetávají a často jsou protichůdné. Je nutné si uvědomit, že kromě problémů, jež jsou objektivně spjaty snad s každou výrobou, jako je ekonomická stránka výrobku, složitost výrobního postupu, jeho spolehlivost a robustnost v provozu atd....., je konstruktor tohoto hudebního nástroje postaven i před mnohé problémy další, související s objektivními matematickými a fyzikálními komplikacemi, které musí při návrhu řešit. V tomto místě je nezbytné podotknout, že i sama pianinová/klavírová kobylka je nucena vyhovět vícero proti sobě jdoucím požadavkům. Ideální kobylka by měla být lehká a pružná, aby neomezovala chvění desky, zároveň však musí být i tvrdá, aby netlumila chvění strun. Dále musí být i snadno obrobitelná, aby bylo možné kvalitně a přesně provést její vytvarování, které má velký vliv, obzvláště pak v diskantové části, na celkové hudební kvality nástroje. Zároveň je nutné, aby byla odolná proti smyku napříč vláken, neboť hustě rozmístěné kobylkové hřeby mohou při špatné technologii způsobit její popraskání. Ideální kobylka by v neposlední řadě měla být rozměrově stálá a měla by dobře vést zvuk, neboť to je její hlavní úkol, který musí v nástroji plnit. Při plnění těchto požadavků si konstruktéři často pomáhají různými postupy, kterými se snaží dosáhnout kýženého výsledku. Mezi tyto postupy patří především různá odlehčení, vybrání, kobylkové můstky, použití vícero dřevin či překližovaných materiálů na jednu kobylku apod. Současně je nutné podotknout, že tvar kobylky není věc, jež je možné navrhnout nezávisle na všem ostatním, ale je naopak velmi úzce spjata s mnohými dalšími částmi konstrukce jako je menzura nástroje, jeho tvar, strunový přetlak, počet a druh strun, konstrukce rezonanční desky apod. Přiblížení této

problematiky se proto věnuje značná část literárního přehledu, neboť se kobylyk úzce týká, a je nezbytnou pro komplexnější chápání celého problému, avšak sama práce se touto problematikou hlouběji nezabývá, neboť je již obsahem mnoha učebnic a knih tuzemské i zahraniční provenience a nechce čtenáře této práce přespříliš zatěžovati problematikou, kterou ani není možné v jedné části přehledu dokonale obsáhnout. Rovněž je v této části uvedena stručná historie výroby klavírových a pianinových kobylyk a dále jsou zde rovněž vyobrazeny způsoby provedení této části jednotlivými vybranými výrobci jak historickými, tak i současnými, neboť i letmý náhled do historie a technologie výroby může čtenáři pomoci pochopit, co vše se po kobylykách žádá a jak se nároky na ně kladené v horizontu posledních sto padesáti let stále zvětšují.

Jak již bylo řečeno, výzkumná část práce je pak zaměřena především na akustické vlastnosti použitých materiálů, které jsou při výrobě kobylyk značně důležité. Pro testování byly vybrány materiály, které se obvykle užívají nejen u klavírů a pianin, ale i u jiných strunných hudebních nástrojů. Při letmém porovnání s ostatními strunnými nástroji je zřejmé, že klavírová kobylyka je oproti ostatním značně mohutná a robustní což je spojeno s tím, že musí přenášet nesrovnatelně větší tlaky, kterým je vystavena. Vysoké nároky na tuto část z ní činí velmi exponovaný prvek, přesto však je zde dřevo stále v podstatě jediným materiálem, který se, až na výjimky, stává pro své kvality nenahraditelným.

Je otázkou, je-li tomu tak z důvodů konzervativního přístupu konstruktérů, nebo je-li dřevo opravdu tak výjimečným materiálem, že se zde i přes některé své nevýhody v této oblasti i nadále používá? Proč není při dnešním mohutném rozmachu plastů, které dřevo vytlačily z mnoha jeho do nedávné doby neotřesitelných pozic, nahrazeno i zde? Nebo vede cesta k nové a lepší kobylyce možností spojit dřevo s jinými materiály? Je zcela jisté, že dokonalou odpověď na tyto otázky tato práce nedá, poslouží-li však alespoň částečně k osvětlení problematiky klavírových kobylyk, pak je možné říci, že není prací zcela zbytečnou.

## 2) Cíl práce

Cílem práce je seznámit čtenáře s problematikou konstrukce pianových kobytek, jejich historií, technologií výroby se souvislostmi, jež musí být brány v úvahu při jejich navrhování. Dále budou představeny běžné úpravy kobytek, mezi které patří především různé způsoby připojení kobytek k rezonanční desce můstky, odlehčení kobytky apod. Pro lepší představu o této problematice práce rovněž uvádí několik typů a způsobů provedení kobytek u vybraných prestižních výrobců klavírů jako například: August Förster, Bechstein, Bösendorfer, Fazioli, Petrof, Steingraeber & Söhne, Steinway & Sons, Yamaha.

Experimentální část práce se pak věnuje výzkumu akustických vlastností kobytek. Cílem této části práce je vytipovat vhodný materiál pro jejich výrobu při minimálních nárocích na technologii výroby. Testování bude probíhat formou nedestruktivního testování vzorků kobytek v bezdozvukové komoře, tzn.: formou měření vlastních ohybových frekvencí, logaritmického dekrementu útlumu a výpočtem dalších veličin, jako je dynamický modul pružnosti a rychlost šíření zvuku, akustická konstanta, akustický vlnový odpor a přeměňená akustická účinnost. Budou vybrány a experimentálně zhodnoceny finální konstrukční alternativy kobytek- dynamická analýza polotovaru ozvučné soustavy. V závěru práce bude provedeno vyhodnocení jednotlivých materiálů a jejich porovnání z hlediska akustických vlastností (tangenciální vs. radiální směr, orientace letokruhů, lamel atd.). Důležitou součástí této práce je pak numerický model, který si klade za cíl především blíže popsat chování měřeného materiálu při testování.

### 3) Literární přehled:

#### **Výzkum a literatura v oblasti hudebních nástrojů a jejich materiálů**

Vzhledem k tomu, že klavír jako nástroj je značně složitý celek, který se skládá z velkého množství na sobě závislých systémů s poměrně velkou materiálovou a kvalitativní variabilitou, je celkové a dokonalé popsání jeho chování velmi složitým a komplikovaným problémem, vyžadující nejen velké množství práce zkušených odborníků ale i kvalitní vědecké a technické zázemí. Vzhledem k velké finanční zátěži, jež zkoumání výše zmíněné problematiky přináší, je pochopitelné, že probíhá-li v této oblasti nějaký výzkum, pak se tak děje buď ve spolupráci vědeckých subjektů s významnými výrobci klavírů, anebo na půdách univerzit v rámci studia vlastností dřeva anebo akustiky. Poměrně rozsáhlé informace poskytují výsledky základního výzkumu z oblasti materiálů, akustiky apod. Významnou publikaci *Acoustic of Wood* pojednávající o akustických vlastnostech dřeva obecně i o jeho funkci a výzkumu v oblasti hudebních nástrojů pak přináší Voichita Bucur (1995). Samotnou kapitolu věnovanou přímo pianu a jeho akustice pak můžeme nalézt v knize *Physics of Musical Instrument* autorů Fletchera a Rossinga (1998). Akustice piana se rovněž věnuje i Juan José Burred ve své publikaci *The Acoustic of the Piano* (2004), avšak nástroje jako celek jsou vzhledem ke své složitosti zkoumány v současnosti jen skutečně ojediněle. Nutno však podotknout, že se nezřídka stává, že odtržení výzkumníků od reálné stavby a konstrukce pian, jež je historicky založena na empirii, je tak velké, že mnoho z výzkumných prací lze užít jen s velkými omezeními anebo vůbec ne. Výstižně to komentuje významný německý klavírní konstruktér Klaus Fenner: *Právě v posledních letech bylo vynaloženo ze strany přírodních věd mnoho úsilí objasnit a pochopit pochody a všechny souvislosti nástroje. Bohužel je však nutné konstatovat, že při stavbě pian nelze z tohoto využít téměř nic, co by vyvážilo vloženou práci* (Fenner 2002).

Experimentálním měřením kladívek se zabývali např. Yanagisawa a Nakamura (1982) nebo Boutillon (1988). Výpočtem strun pak Lieber (1986) a Fletcher (1964). Měření ozvučné desky se věnoval např. Wogram (1980). Měření historických kobylek cebmala a umístěním kobylkových hřebů se pak zabýval Sankey (2014).

Poměrně rozsáhlé vědecké projekty v oblasti výzkumu klavírů proběhly ve výzkumném oddělení firmy Petrof, které svého času patřilo k největším v dané oblasti, avšak výsledky jeho práce většinou nejsou veřejnosti přístupné. Zajímavou je zcela jistě publikace

Podobského, Noska a Veicherové (1975) Výzkum vlivu materiálu na akustickou kvalitu rezonanční desky pianina. Oblastí hudební akustiky se v současnosti zabývá pracoviště fyzikální a hudební akustiky při Technické univerzitě ve Zvolenu.

Jako zajímavé odvětví výzkumu se pak dnes jeví počítačové konečněprvkové simulace, které je možné provádět bez hlubšího technického zázemí a velkých finančních nákladů, a které mohou rovněž svým dílem přispět k pochopení některých jevů, jež se u nástrojů a jejich ozvučnicích vyskytují. V oblasti popisu akustiky piana pomocí numerické simulace je významná práce autorů Suzuki a Nakamura (1990). V České republice pak velmi obsáhlou disertační práci s názvem „Příspěvek k numerickému modelování soustavy pianová struna – ozvučná deska“ vypracoval Alois Raffaj (2000). Práci na téma numerická simulace rezonanční desky klavíru se věnoval také Tippner (2010). Tato práce se nezabývá jen simulací rezonanční desky, jak je uvedeno v názvu, nýbrž popisuje i chování baraše (kostry) piana při mechanickém, teplotním a vlhkostním namáhání. Podobnou problematikou, konkrétně modální analýzou rezonanční desky pianina metodou konečných prvků, se pak u pianina zabývá i Klímová (2011).

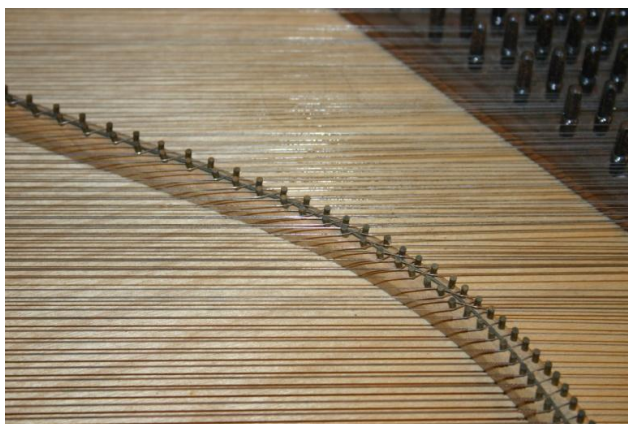
Je nutné konstatovat, že v současnosti těžiště akustických výzkumů leží především v oblasti automobilového anebo strojírenského průmyslu. Zde u nás poměrně intenzivně působí např. katedra fyziky a katedra elektrotechniky při ČVUT v Praze, Výzkumný ústav technických strojů v Liberci, VUT v Brně, firma Emerson v Mikulově a mnohé další výzkumné instituce. Akustikou se rovněž zabývá i Česká akustická společnost, jež pořádá občasně semináře a je vydavatelem bulletinu s názvem Akustické listy.

## **Historie a vývoj klavírových kobylek**

Jak již bylo uvedeno, za pravděpodobně nejstaršího zástupce chordofonů, lze považovat již pravěkou hudební tyč nebo hudební luk (Modr 2002). Hudební luky mají obvykle jednu strunu připevněnou a nataženou k oběma koncům ohnuté tyče, takže když se strunou pohne, vydává zvuk. Některé jsou pak vyrobeny tak, že mohou vyluzovat i více než jeden základní tón. Někdy, jako je tomu u přepažených luků, jsou v různých místech podél délky tětivy ke struně připojeny nitě, způsobující vibrace struny ve dvou dílech. (Tesařová 2006). Snaha rozdělit strunu tak, aby bylo možné hrát více tónů, je tedy patrná již v hluboké historii. Přesto, že dnešní moderní klavírová kobylka strunu nejen dělí (na hlavní a případně alikvotní část), ale zároveň podpírá a přenáší její chvění na rezonanční desku, svým způsobem je možné považovat onu výše zmíněnou dělicí nit' za jednoho z jejích předchůdců. Je však patrné, že lučistič luku nemohlo být dostatečným rezonátorem a „kobylka“ nahrazená nití nebyla schopna přenášet chvění struny, a proto se tato konstrukce až na výjimky (etnické nástroje apod.) v současné době nepoužívá u žádného ze strunných nástrojů. Vzhledem k tomu, že hlasitost luku jako takového byla silně omezena, začaly se později k tomuto nástroji přidávat i různé rezonátory. Tyto rezonátory jsou většinou tvořeny rozpůlenými tykvemi a kokosovými ořechy (Oling, Wallisch 2004).

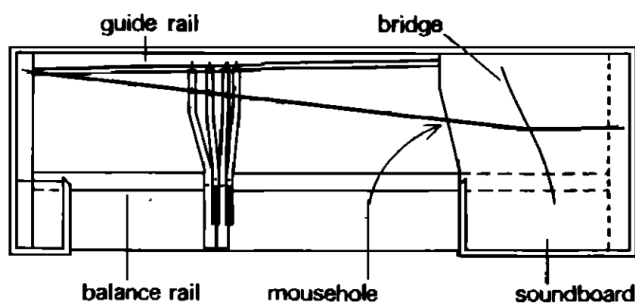
Pravděpodobně první nástroj s rezonanční deskou, která již byla vyrobena ze dřeva, je pak monochord. Tento nástroj popsal jako první Eukleides (asi 450-370 let př.n.l.) (Moravčíková 2005), používal jej však již Pythagoras, který jej pravděpodobně převzal od Egyptanů (tamtéž). Postupným zdokonalováním tohoto měřicího přístroje a postupným přidáváním dalších strun vzniká pak monochord vícestrunný (Modr 2002). Přibližně od 2. stol. našeho letopočtu se vyskytovaly již monochordy čtyřstrunné, jejichž konstrukce se přičítá Claudiu Ptolemaiovi a Aristidu Quintilianovi. Všechny struny tohoto přístroje byly stejně dlouhé a byly naladěny na stejnou výšku. To bylo napříště důležité konstrukční východisko klavichordu (Čížek 2010). Na monochordu se chvějící délka struny zkracovala pomocí posuvné kobylky, přičemž její umístění se značilo na vrchní straně desky příčnými čarami zvanými *claves*. Později, po zvýšení počtu strun, kdy bylo zdlouhavé posouvání kobylky nahrazeno klávesovým mechanismem, vzniká ve 14.stol nový nástroj, nazývaný klavichord, předchůdce dnešního klavíru (Grác 1985). Ze starého monochordu převzal klavichord tvar podlouhlé desky a časem se rezonanční část desky přesunula doprava, zatím co klávesy byly umístěny na přední delší stěnu doprostřed, později však spíše k levé straně (Čížek 2010). Tato koncepce již svým způsobem odpovídá konstrukci dnešního

klavíru, struna zčásti prochází volným prostorem, kde na ní působí mechanika, a dále se pak prochází nad rezonanční deskou, kde přechází přes kobytku/kobyčky k uchycení v kličníku (Brauchli 1998).



Obr. 1- Kobyčka klavichordu

Je nutno podotknout, že přirovnání k modernímu klavíru je skutečně myšleno pouze z hlediska koncepce, odlišnosti v konstrukci jsou jinak zcela zásadní. Dovolím si je zde tedy demonstrovat právě na kobyлке. Jak můžete vidět na Obr. 1, kobyčka je oproti dnešní moderní kobyлке klavíru velmi subtilní. Je to dáno především tím, že klavichord pracuje s mnohem menším tahem strun a i rezonanční deska je neporovnatelně menší. Nicméně v mnohých rysech podobnost nalézt lze. Kobyčka bývá obvykle průběžná, společná pro více strun, přičemž na svém vrcholu bývala hladká nebo je vybavena zářezy, u mladších nástrojů je pak vybavena kobyčkovými hřebíky, které určují přesnou délku menzury. U klavichordu se rovněž poprvé začíná odborněji řešit strunový přetlak jakožto velmi důležitá součást konstrukce nástroje (viz. konstrukce kobyčky). Zde je však nutno poukázat na velký rozdíl mezi klavichordem a klavírem nebo cembalem. Zatímco u klavíru je znějící délka struny určena právě zmiňovanou kobyčkou a na druhé straně agrafem, (případně silicí nebo kapitastem), u klavichordu je situace jiná. Délka struny je určena na jedné



Obr. 2 – Skica klavichordu

straně rovněž kobyčkou, na straně druhé ale určuje její délku tangenta, tzn. tenký plechový plátek, který je usazen přímo na klávěse a po úderu do struny neodpadá, nýbrž strunu nadzvedává a rozděluje na její znějící aktivní část a na část pasivní, jež je utlumena



propletenou plstí Obr. 2 (Thwaites et. al. 1980). Díky této schopnosti a trvalému kontaktu tangenty se strunou je možné ovlivňovat znějící tón klavichordu i v době jeho trvání, a je dokonce možné na něj zahrát vibrato. Tím, že je menzura struny z jedné strany určována právě onou tangentou, která se nachází na konci klávesy, je možné použít u klavichordu pro více tónů jedinou strunu. Takovýmto klavírům pak říkáme klavichordy vázané (Kurfürst 2004). Nevýhodou těchto nástrojů (vázaných klavichordů) je především skutečnost, že je možné vždy zahrát jen jeden z tónů, jež jsou „vázaný“ na stejnou strunu (Kipnis 2006). První klavichordy byly striktně vázané a měly různě velký průřez strun, avšak stejné ladění a rozdílná menzura byla vytvářena právě pouze tangentou. Klávesnice měla zprvu pouze asi 20 kláves, jejichž barva se střídala, spodní klávesy byly hnědé nebo žluté, vrchní pak černé, vyrobené z ebeny (Bonhard 1958). Až později se začínají se zvyšujícím se rozsahem objevovat různě dlouhé struny, čemuž se uzpůsobuje i kobylka, a během postupného vývoje se v 18. stol. objevuje klavichord zcela volný, mající v celém rozsahu samostatný pár strun, výjimečně strunu jedinou. Je však nutné podotknout, že klavichordy volné nikdy zcela nevytlačily klavichordy vázané, neboť tyto bývaly zpravidla menší, levnější a zpravidla rovněž lépe držely ladění, neboť tlak na rezonanční desku nebyl tak velký (Čížek 2010). I přes to, že klavichord vykazoval mnoho výhod (relativně nízkou cenu, možnost přenášení a poměrně velký tónový rozsah), nebyl v pozdější době schopen udržet krok s vývojem jeho konkurentů a brzy narazil na mnohá omezení plynoucí z jeho konstrukce, především pak na nízký akustický výkon, který již nebylo možné zvýšit a jímž nedostačoval ostatním nástrojům „hlavního proudu“. Postupně byl tedy vytlačen i přes svoje nesporné výhody svými konkurenty a dnes se užívá tento nástroj jen výjimečně a to především při autentické reprodukci historické hudby. Vidět tento nástroj je možné nejčastěji v muzeích hudebních nástrojů anebo u hudebníků s vášní pro starou hudbu, ti jsou obvykle majiteli replik tohoto nástroje, neboť i dnes se jedná o nástroj poměrně dostupný a i přes zpravidla zakázkovou výrobu nepřevyšuje cena tohoto nástroje cenu sériově vyráběného průměrně kvalitního pianina. Hra na tento nástroj vyžaduje velmi kvalitní techniku hry, neboť tón je hráčem tvořen i během jeho trvání, což hru činí poněkud náročnější ve srovnání s drtivou většinou ostatních klávesových nástrojů.

Budeme-li se zajímat o nejbližší konkurenci klavichordu, nemůžeme minout cembalo. Přesto, že se tento nástroj nenachází ve stejné skupině strunných úderných nástrojů jako již zmiňovaný klavichord anebo klavír, je bezesporu důležitým článkem ve vývoji piana takového, jak jej známe dnes. Cembalo vzniklo dalším vývojem psaltéria, jež bylo dovybaveno klávesnicí a jednoduchou mechanikou s trsacími sloupky. Tento nástroj se v mnohém liší od klavichordu. Předně počet strun odpovídá počtu tónů, každá klávesa má svoji strunu vyladěnou na požadovaný tón (Bonhard 1958). Struny cembala jsou napnuty paralelně s klávesami, čímž vzniká trojúhelníkovitý tvar nástroje (Oling B., Wallisch H. 2004). Vzhledem k tomu, že menzura tohoto nástroje již není řešena za pomoci tangent, ale každá struna má svojí vlastní pevně stanovenou délku, a struny, jak již bylo řečeno, jsou nataženy paralelně s klávesami, dostává cembalo již tvar blízký klasickému klavíru. Kobylka tohoto nástroje je na rozdíl od klavichordu poměrně značně dlouhá, navržena tak, aby pokryla celý tónový rozsah nástroje. Tím dostává svůj typický tvar daný geometrickou posloupností, ke které museli tvůrci nástroje dospět při tvorbě délky jednotlivých strun. U cembala se zpravidla nesetkáváme, na rozdíl od klavíru, s jejich křížením, proto se zde nachází obvykle jen jedna jediná kobylka, (příp. se druhá kratší basová kobylka obvykle nachází před kobylkou diskantovou). Tímto dostává nástroj svůj jednoduchý a elegantní tvar, který si zachovaly i první klavíry a který je možné vidět na Obr. 3. Při tvorbě menzury nástroje si rovněž někteří výrobci pomáhali použitím rozdílné tloušťky strun, stejně jako u dnešních nástrojů, případně použitím různých rozdílných materiálů pro výrobu strunového potahu. V závislosti na jeho původu a věku může nástroj používat jeden, dva nebo tři různé materiály pro potah, přičemž struny z těžší slitiny jsou používány v base. Strunový drát se rovněž mění v průměru, v závislosti na konstrukčním řešení nástroj může mít celou řadu složenou z asi šesti až patnácti průměrů (Beebe 2014).



Obr. 3 – Pädorys cembala

U prvních předchůdců klavichordu, psalterií, zpravidla struny přecházely přes kobylku přímo, ale již u prvního zdokumentovaného nástroje vybaveného klávesnicí a mechanikou, který vytvořil Henri Arnault ze Zwolle v roce 1440, se struny na kobylce lámou tak silně, že již není jejich zalomení možné řešit zářezem. Proto se zde pravděpodobně musely použít kobylkové hřeby, i když to autor v návrzích nástroje explicitně nezmiňuje (Sankey 2014). Na starých nástrojích vyrobených na severu Evropy je možné vidět „kobylkové“ hřeby, které nejsou umístěny na vrcholu kobylky, ale mimo něj, naopak u Italských cembal je již možné spatřovat pokrokovější konstrukci, kdy jsou kobylkové hřeby umístěny na vrcholu kobylky. Kobylka novějších cembal je, stejně jako kobylka klavichordu, vybavena kobylkovými hřeby a je v mnohém podobná kobylce klavíru, i když stále není vystavována tak velkým tlakům a pracuje s mnohem menším zatížením. Rovněž kobylkové hřeby se u tohoto nástroje nenachází, (vzhledem k netoliko strunným chórům) v takové hustotě, jako je tomu u současných klavírů a pianin. Nicméně největší rozdíl mezi cembalem a prvními klavíry nenalezneme v konstrukci ozvučnicku, nýbrž v konstrukci mechaniky. Jak již bylo řečeno, podle některých způsobů dělení hudebních nástrojů nepatří cembalo a klavír do stejné skupiny, avšak jsou spolu úzce spjaty, neboť první klavíry byly v podstatě pouze upravenými cembaly. Však se také tento nástroj původně nazýval Gravecembalo col piano e forte (Čížek 2010). Důvodem snah o úpravy cembala, z nichž nakonec vznikl kladívkový klavír, byla především nemožnost ovládat dynamiku hry tohoto nástroje. U cembala funguje mechanika následovně: Jakmile se stlačí klávesa, zvedne se ve vnitřní mechanice sloupek umístěný v pouzdře a současně se zvedne i jazýček opatřený trnem z havraního nebo husího brku, který rozeznívá strunu. Jazýček je pak ihned pérkem zatlačen zpět, takže se struny nemůže znovu dotknout (Oling B., Wallisch H. 2004). Vzhledem k tomu, že tento princip neumožňuje, jak již bylo řečeno, měnit dynamiku hry, snažili se výrobci tento nedostatek vyrovnat přidáváním druhého manuálu, případně dalších rejstříků (Bonhard 1958), čímžto se cembalo přiblížilo svým charakterem hry spíše k varhanám, nežli k dnešnímu klavíru. Až převratný vynález, nahrazení tangenty zcela novou mechanikou opatřenou kladívky potaženými kůží (Sýkora 2005), dal tomuto nástroji nový směr. Nutno podotknout, že si na toto prvenství činí nárok hned několik výrobců přelomu 17. a 18. stol., z nichž mezi nejvýznamnější patří Jean Marius, Christoph Gottlieb Schröter a v neposlední řadě italský kustod nástrojových sbírek Bartolomeo Cristofori (Kurfürst 2004), kterýžto je drtivou většinou autorů uváděn jako skutečný objevitel tohoto nástroje (Williams 2002, Wendy 2003, Kurfürst 2004, Rebnitz 1993 ).

Poměrně dlouhé a bouřlivé debaty o době vzniku tohoto nástroje nakonec dospěly ke konsenzuálnímu závěru, že se tak stalo mezi roky 1698 a 1700 (Čížek 2010). Nutno podotknout, že tón kladívkového piána se značně odlišuje od tónu cembala (Prach 1987). Stejně jako u většiny velkých vynálezů, nebyl ani kladívkový klavír přijímán zprvu s nijak velkým nadšením. Cristoforiho piano vyvolalo ve své rodné zemi řadu debat a bylo – v nejlepším případě - nakonec považováno za salónní doprovodný nástroj a jeho vynálezce nakonec umírá zklamaný, že se jeho vynález nedočkal tak širokého a nadšeného přijetí, jež by zasluhoval (Williams 2002). Malá kronika Anny Magdaleny Bachové nepatří mezi odborné publikace, je však v ní poměrně pěkným, ilustrativním způsobem zachycena prvotní skepse k ještě „nedozrálému“ nástroji: *Na Silbermannovu prosbu vyzkoušel Sebastian jeden z prvních takto stavěných nástrojů, shledal jej velmi mnohoslibným, avšak byl zklamán kladívkovým zařízením, jež bylo novinkou tohoto nástroje, a tvrdostí úhozu a vytýkal též slabý zvuk horní řady tónů. „Musíš to udělat lépe“ řekl Silbermannovi, v té věci spočívá dobré jádro, ale musíš hledět, aby z něho vyrostl pořádný strom“ „To si však o tvé domyšlivosti přáteli nelze“ odpověděl Silbermann dopáleně, neboť měl prudké způsoby a prodělal divoké mládí, „tady jsem pracoval na této věci tak dlouho a dřel jsem všemožně, abych všechno udělal správně, a ty přijdeš se svými bílými kapelnickými rukama a řekneš, že to není správné!“*. Na dopáleném výrobcu bylo vidět, že div nepraskne zlostí... (Meynell 1956).

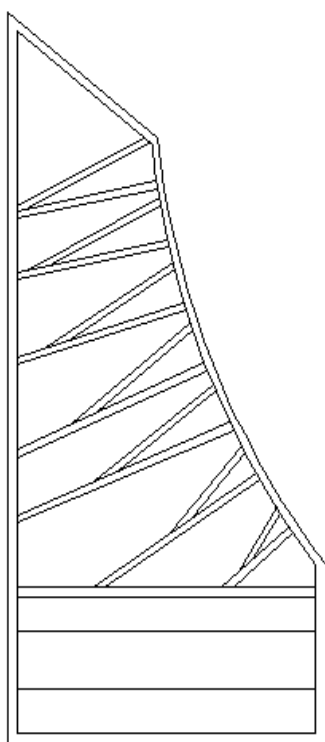
I přes prvotní komplikace si nakonec cembalo opatřené kladívky, schopné hrát „forte i piano“ nebo zkráceně piano, začalo nacházet své zájemce o koupi a postupně dobývat trh, což se mu nakonec v průběhu 19. stol. podařilo (Kurfürst 2004). Velkou zásluhu na tomto vývoji měl zcela nepopíratelně právě i výrobce varhan a cembal, již zmíněný Gottfried Silberman, který se velmi výrazně zasloužil spolu se svým žákem Johanem Andreasem Steinem o rozkvet tohoto nástroje na severu (Williams 2002, Bonhard 1958, Prach 1987, Grác 1985, Valášková et al. 1984, Čížek 2010). Nutno konstatovat, že úzké spění stavitele Silbermana s Bachem bylo velmi plodné a zcela jistě pomohlo nejen technickému rozvoji piána, ale i jeho popularizaci u bohatých mecenášů umění, bez kterých by nebyl vývoj nástroje v Bachových dobách možný (Sartorius 2013). Již v období života Gottfrieda Silbermana, tedy v první pol. 18 stol., se svět kladívkových mechanik, které charakterizují tento nástroj, začíná dělit na dvě základní skupiny, přičemž toto velké klavírní „schizma“ trvá přibližně až do konce století devatenáctého. Jednu skupinu nazýváme nárazovou mechanikou, z níž se později vyvinula mechanika anglická, druhou pak mechaniku

vymršťovací neboli vídeňskou. V prvním případě je osa kladívkové násadky uložena v kladívkové liště a klávesa svým zadním okrajem, obloženým kouskem jelení kůže, podebere při stoupání výstupek násadky kladívka a vyzdvihne kladívko ke strunám. V druhém případě je osa kladívkové násadky pevně uchycena v mosazné vidlici zvané kapsle, která je pevně zasazena do koncové části klávesy. Při stlačení přední části klávesy směrem dolů vystoupí zadní část nahoru a zdvihá i mosaznou vidlici včetně násadky a kladívka. Prodloužený konec násadky ve tvaru zobáčku je opatřen tuhou jelení kůží, která se při stoupání zadního konce násadky opře o pevnou spodní plochu tvarované základní lišty mechaniky. Opačný konec násadky s nasazeným kladívkem vykoná otáčivý pohyb kolem osy a stoupá ke strunám. Po mnoha experimentech a mnoha různých variacích na výše uvedené dva druhy mechaniky se nejvíce prosadila mechanika vyrážecí neboli anglická, a to mechanika dvojrepetiční, rovněž známá jako Herz – Erardova, která zůstává ve svých základních principech stejná až dosud a zastínila všechny ostatní druhy klavírových mechanik (Prach 1987). Dnes již k příliš velkému rozvoji mechaniky nedochází, současné kvalitní obráběcí stroje zajišťují vyšší standard z hlediska procent chybovosti a mechaniky tradičních výrobců si drží poměrně vysoký standard všech dílků. K pokusům o revoluční změny dochází jen výjimečně, např.: mechanika z kompozitních materiálů americké firmy Wessell, Nickel and Gross, nebo japonské firmy Kawai, jež je vyrobena z uhlíkových vláken, ([www.wessellnickelandgross.com](http://www.wessellnickelandgross.com) 2015) (<http://www.kawaius.com> 2016), či standardní mechaniky dřevěné, jež se někteří výrobci snaží zlepšit za pomoci užívání permanentních magnetů umístěných v různých částech mechaniky např.: SFM mechanika německého výrobce Steingraeber and Sohne ([www.steingraeber.de](http://www.steingraeber.de) 2015).

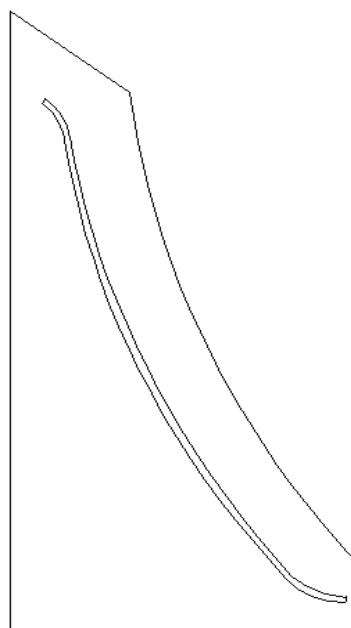
Spolu s vývojem mechanik se rovněž začíná vyvíjet i celková konstrukce klavíru. Cílem této práce však není věnovat se hlouběji vývoji klavírní mechaniky, ale konstrukci klavírních kobytek, která úzce souvisí s konstrukcí jeho ozvučnicku, neboť je jeho integrální součástí. Proto nebude vývoj klavírové mechaniky v této diplomové práci více popsán, ale práce se zevrubněji bude zabírat především konstrukcí právě již zmíněného ozvučnicku, jež se konstrukce kobytek velmi úzce týká.

#### a) konstrukce klavírů Bartolomea Cristoforiho

První klavíry vycházely ještě z původní konstrukce cembal. Tehdejší tah strun v nástroji ani zdaleka nedosahoval napětí, které mají soudobé nástroje. Nástroj měl výrazně nižší rozsah 54 tónů místo dnes běžných 88 a použité struny byly oproti dnešním nástrojům neporovnatelně tenčí. Je patrné, že dřevěná kostra zde nebyla rovněž zdaleka tak masivní, jako je tomu dnes (www.metmuseum.org 2015). Nicméně je zřejmé, že si nevýhody až příliš subtilní konstrukce uvědomoval i sám tvůrce nástroje, což je dobře ilustrováno i na faktu, že každý další Cristoforiho nástroj měl výrazně silnější nosné prvky, než nástroj předchozí. Užití litinových vzpěr nebo rámu, který je dnes u nástrojů zcela běžný, bylo v té době nemyslitelné, neboť vládlo přesvědčení, že jeho použití významně škodí zvuku nástroje (Williams 2002). Kobyłka nástroje v tomto případě byla obdobná jako kobyłka u cembala, tudíž subtilní a lehká, přičemž na konci nebyla redukováná, čemuž odpovídala i poměrně velká délka nástroje v poměru k jeho rozsahu.



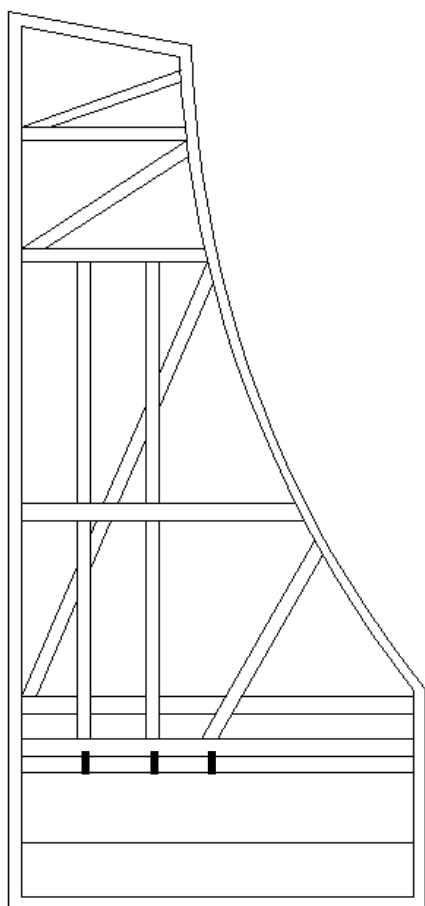
Obr. 4 – Konstrukce Christoforiho klavíru



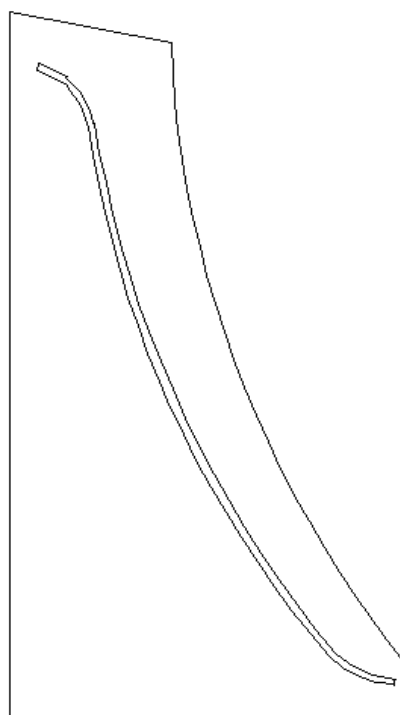
Obr. 5- Rezonanční deska Christoforiho klavíru

### b) Anglická křídla konce 18. století

S rostoucím tahem strun bylo zřejmé, že bude nutné vytvořit pevnější spojení v kritickém místě nástroje, tzn. mezi prsním kusem a kličníkem, u něhož vlivem napětí často docházelo k deformacím. Do tohoto místa bylo postupem času montováno stále větší množství kovových vzpěr Obr. 7. Rovněž celková konstrukce nástroje začala postupně více reagovat na potřebu opory většího tahu strun (který byl způsoben jak větším rozsahem, tak i lepšími mechanickými parametry a z nich plynoucího vyššího používaného napětí) stále častěji se objevujícími podélnými prvky. Rovněž postupně dochází ke zvětšení dimenzí vzpěr, i když jejich konstrukce je v porovnání se současnými nástroji stále značně subtilní. Nutno podotknout, že konstrukce zobrazená na ilustraci je pouze orientační, neboť i dnes každý výrobce používá mírně odlišnou strukturu rámu, přičemž v dobách vývoje nástroje byly tyto rozdíly mezi jednotlivými výrobci ještě mnohem markantnější.



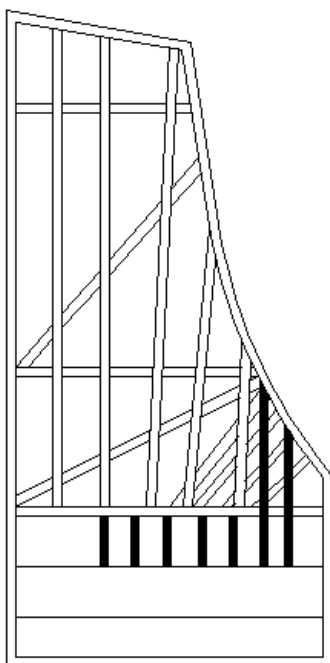
Obr. 7- Konstrukce anglického klavíru z konce 18. stol



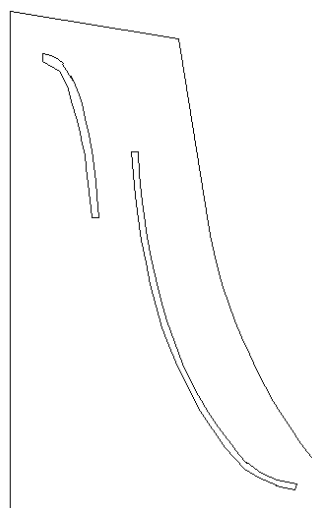
Obr. 6- Rezonanční deska anglického klavíru z konce 18. stol

### c) Anglické a francouzské klavíry kolem roku 1820

Jak již bylo uvedeno, docházelo u nástrojů k postupnému zvětšování rozsahu, což je patrné i na větší šířce nástroje na ilustraci (Obr. 9). Nástroje v této době celkově mohutní, zvětšují se i kladívka, pravidelné dvojice strun pro každý tón se již od středních poloh rozšiřují na trojice, které jsou pro klavíry charakteristické i dnes (Čížek 2010). Je zde možné rovněž vidět průběžné prvky, které procházejí celým nástrojem a jsou ukotveny k prsnímu kusu. Dřevěná konstrukce byla v tomto období velmi mohutná a komplikovaná, neboť tah strun s vývojem nástroje prudce rostl. U prvních klavírů byl tah strun poměrně nízký, neboť tento nástroj koncepčně vycházel z clavicembala, u kterého bylo nižší napětí strun nezbytné, neboť k jejich rozezvučení docházelo trsnutím havraními brky. Klavíry, kde kladívka přenášejí na struny větší energii, však toto napětí vyžadovaly. Rovněž je možné všimnout si průběžných kovových vzpěr v diskantu, kde se obvykle nacházelo větší množství značně napjatých strun a bylo proto nutné je zde instalovat. Nutno však podotknout, že většina výrobců k litinovým vzpěrám stále přistupovala s despektem a jejich instalace proto probíhala pouze v nezbytně velkém množství. Na některých nástrojích se rovněž začíná diskantová kobylka dělit na dvě části, nicméně je to především kvůli její lepší pozici a začínajícímu používání opředěných strun, křížostrunná soustava se v této době ještě nepoužívá.



Obr. 9- Konstrukce klavíru z pol. 19. Stol.

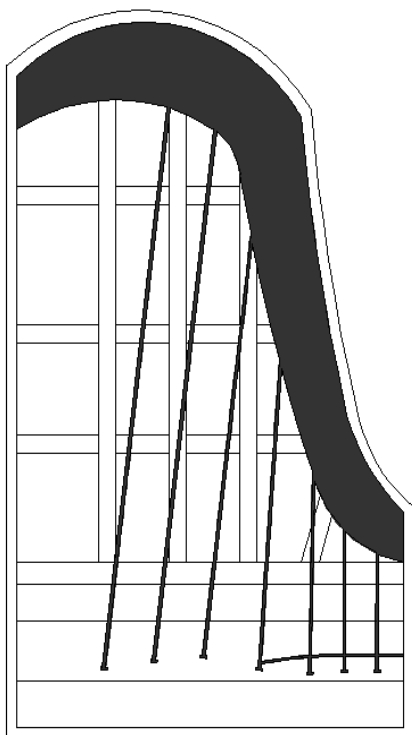


Obr. 8- Rezonanční deska klavíru z pol. 19. Stol

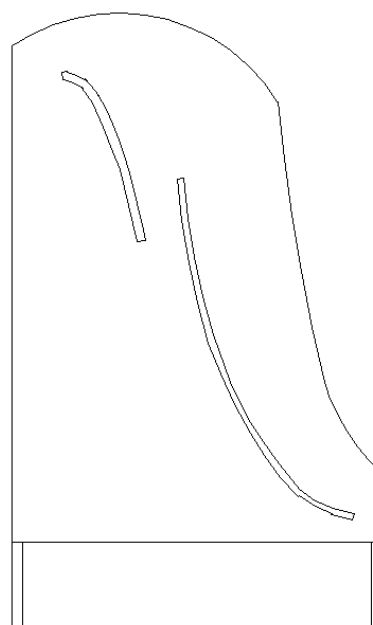


#### d) Klavíry druhé poloviny 19. stol.

Ve druhé polovině 19. stol. si stavitelé nástrojů postupně začali uvědomovat, že extrémní napětí strun si žádá komplexnější řešení, než pouze postupně přidávat kovové vzpěry. Proto postupně dochází na konci závěsů strun k jejich propojení mohutným litinovým plátem, přičemž závěsy strun jsou již instalovány přímo v něm. Za vynálezce tohoto řešení se pak považuje John I. Hawkins (Williams 2002). Výhodou tohoto řešení byla skutečnost, že dřevěnou konstrukci bylo možné značně zjednodušit, přičemž dřevěné vzpěry nemusely být instalovány v tak malých rozstupech, neboť litinový plát roznášel tah strun do větší plochy. Úbytek vzpěr se však odrazil v dimenzování vzpěr, jež byly ponechány, přičemž tyto měly výrazně větší rozměry, nežli vzpěry používané dříve. Jako problematické se však jevílo místo, kde kovové vzpěry podpírají kolíčník. Zde docházelo k velké kumulaci tlaku do malé plochy, přičemž docházelo často k popraskání a deformaci kolíčníku a tím pádem k destrukci celého nástroje. Postupně se tedy i vzpěry v oblasti před kolíčníkem začaly propojovat a před kolíčníkem byla instalována tzv. hráz, o níž se kolíčník opíral. Tento systém nazýváme dnes jako systém polopancéřový. Ve třicátých letech devatenáctého stol. se postupně rovněž začínala ujímat křížostrunná konstrukce (Čížek 2010), i když relativně pozvolna. Velké množství běžných nástrojů má ještě rovnostrunný potah.



Obr. 11- Konstrukce klavíru z druhé poloviny 19. stol



Obr. 10- Rezonanční deska klavíru z druhé poloviny 19. stol



## **Konstrukce kobylek**

### Názvosloví:

V této kapitole bude stručně pojednáno o základní konstrukci kobyly a především o názvosloví jejích jednotlivých částí. Na Obr. 15 můžete vidět část diskantové kobyly. Obr. 16 zobrazuje basovou kobyly typickou pro pianina nebo malé klavíry do délky přibližně 200 cm. Na Obr. 14 je pak vidět náčrt mistrovské basové kobyly, typické pro koncertní nástroje (obvyklá délka klavíru mezi 200-285cm).

1) Jazyk: Tato část kobyly se nachází na rezonanční desce a zajišťuje rozložení tlaku, jež přenáší kobyly na rezonanční desku. Jeho tloušťka se obvykle pohybuje v rozmezí kolem 5 mm a zpravidla uzpůsobena tak, aby se vešla do prostoru mezi vzpěrami litinového rámu a rezonanční deskou.

2) Tělo kobyly: Je základem celé kobyly, nachází se v prostoru mezi rezonanční deskou, případně můstkem a vrchní částí kobyly. Musí mít dobré akustické, ale zároveň i mechanické vlastnosti. Může být masivní anebo lamelované.

3) Kobylykový hřeb: Slouží k vymezení menzury a k pevnému uchycení struny. Někteří výrobci (Stuart and sons, Steingraeber and söhne), místo kobylykových hřebů používají speciální kobylykové agrafy. Hřeby musí být pevně usazeny ve dřevní hmotě kobyly. Vzdálenost mezi přední a zadní řadou kobylykových hřebů je zpravidla v rozsahu mezi 18 mm - 20 mm. Kobylykové hřeby mají průměr obvykle kolem 2,5 mm (Prach 1987).

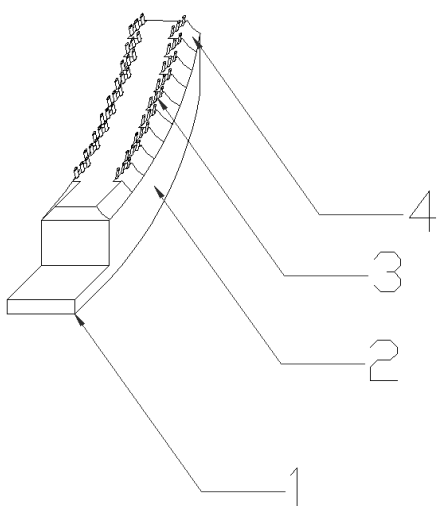
4) Štechování kobyly: Jedná se o odlehčení kobyly, které spolu s kobylykovými hřeby přesně stanovuje znějící délku struny. U štechů kobyly je především v diskantu kladen vysoký důraz na přesnost jejich provedení. Štech by měl zacházet přesně do  $\frac{1}{2}$  kobylykových hřebů. Jejich tvar je buď obloukovitý, to v případě strojního opracování, kdy se jedná o pomyslnou část kružnice, jejíž obvod je shodný s velikostí použité frézy, nebo téměř rovný, pokud je štechování provedeno ručně.

5) Odhoblování kobyly v basové části: Nachází se pouze u basových kobylek a plní stejnou funkci jako štechování u kobyly diskantové. V případě podpředených strun je tento způsob zcela dostačující, avšak u dvouchórových opředených strun se nejedná o zcela ideální řešení, neboť každá ze dvou strun v chóru má díky tomuto provedení nepatrně odlišnou délku. U pianin se však tento způsob odlehčení používá velmi často, neboť se jedná z hlediska technologie o výrazně snazší způsob opracování a chyba popsána výše je

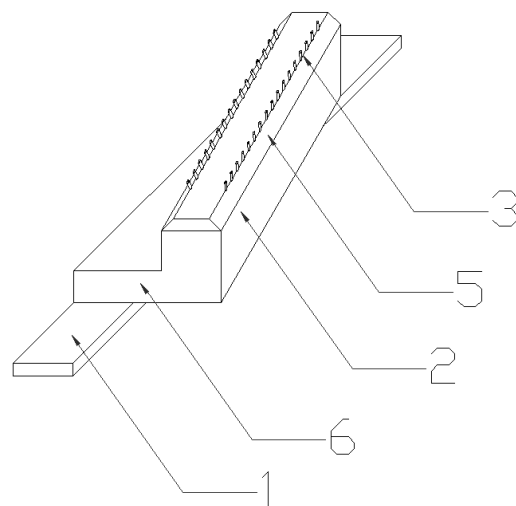
zpravidla malá a při délce struny zanedbatelná. U klavírů pak bývá v místě dvouchórových strun použito běžné štechování.

6) Můstek: Slouží k převádění účinků chvějících se strun do středu rezonanční desky, čímž umožňuje maximalizovat délku strun i u menších nástrojů (Prach 1987). Nevýhodou můsteků je zvětšení vzdálenosti, kterou musí zvuk mezi strunou a deskou urazit, zároveň také působí na rezonanční desku pákou a vyvolávají tak její nerovnoměrné zatížení. U některých modelů pianin se můstek může nacházet i v přechodové části diskantové kobyly.

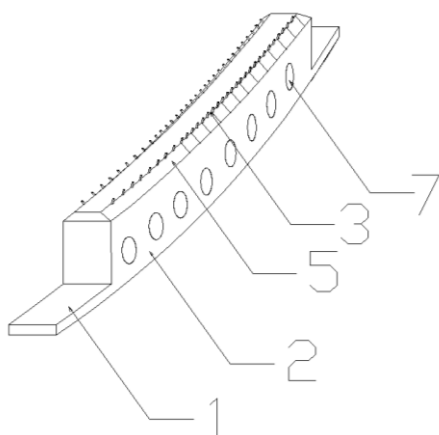
7) Odlehčení kobyly: Jedná se o výřezy v kobylyce obvykle kruhového nebo elipsovitého tvaru. Zajišťují snížení hmotnosti a zároveň zvýšení elasticity kobyly, pro nízké frekvence o vyšších amplitudách. Umožňují větší chvění desky, což však není vhodné v diskantových částech nástroje.



Obr. 15- Diskantová část kobyly



Obr. 16- Basová kobylyka pianina



Obr. 14- Basová kobylyka koncertního klavíru

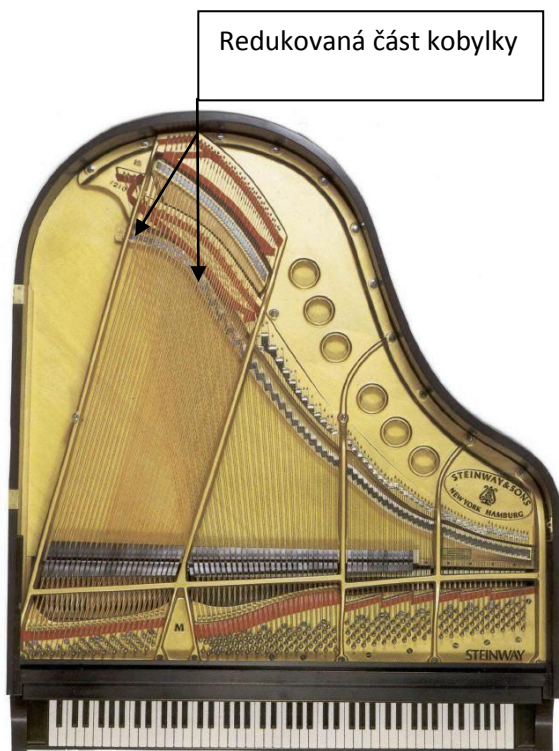
### Návrh kobylky a její řešení z hlediska konstrukce

Tato kapitola popisuje, jak se tvoří a z čeho plyne celkový tvar kobylek. Jak je patrné, je tvar kobylek dán především menzurovou strun. Již u prvních monochordů, které se dají svým způsobem označit za předchůdce klavíru, bylo experimentováno s délkou strun pomocí posuvných kobylek. Pravděpodobně by bylo přiléhavější neoznačovat monochord jako hudební nástroj, ale jako experimentální přístroj, neboť jeho původním posláním nebylo ani tak tvořit hudbu jako sloužit při výzkumu strunových menzur. Tomuto výzkumu se poměrně důkladně věnoval již slavný řecký vědec, matematik a filosof Pythagoras ze Samu (570 p.ř.n.l.) (Oling, Wallisch 2004). Mezi největší objevy jeho doby se pak v oblasti hudby zcela jistě řadí poměrně důkladné poznání intervalů mezi tóny a jejich zdokumentování, i když nutno podotknout, že toto historické prvenství se určuje jen obtížně, neboť některé prameny naznačují, že systém ladění založený na číselném poměru 3:2 znali již Babyloňané a před nimi Sumerové. Nicméně i přes výše uvedené rozpory o ladění založené na číselném poměru čisté kviny 3:2 je patrné, že již ve starověku vzniklo ladění, kterému dnes říkáme pythagorejské a které bylo používáno po několik tisíciletí, než na jeho základech vzniklo dnes všeobecně používané ladění temperované, které rozkládá pythagorejské a didimické koma rovnoměrně tak, aby matematická chyba vzniklá nepoměrem přirozených intervalů byla rozptýlena do celého rozsahu nástroje, čímž bylo umožněno u pevně laděných nástrojů modulovat do libovolných tónin bez vzniku falešných souzvuků.

Již z prvotních starověkých objevů plyne, že příjemné souzvuky v akordech jsou dány přesnými matematickými poměry mezi jednotlivými tóny např.: tercie 6:5, kvinta 3:2, oktáva 2:1. Posunul-li tedy starověký vědec svoji posuvnou kobylku a zkrátil strunu na poměr 3:2, získal po rozezvučení struny její kvintu, posunul-li pak kobylku přesně do poloviny, získal tón o oktávu vyšší. Z matematické logiky věci pak plyne, že rozdělíme-li oktávu na 12 půltónů, vypočteme délku následujícího půltónu tak, že danou délku struny vynásobíme/vydělíme  $^{12}\sqrt{2}$ . Je-li například pro tón c5 doporučená délka struny 52 mm musí být pro tón ces5/h4 při konstantním napětí a stejné tloušťce délka struny 55,09208 mm. Pokud bychom chtěli tímto způsobem vyřešit celý strunový potah nástroje, musela by délka poslední struny u běžného klavíru, tedy délka struny tónu „subkontra a“ odpovídat přibližně délce 7915,362 mm, tedy téměř délce 8 m. Je zřejmé, že klavír s touto délkou struny by musel mít délku téměř 9 m a že jej tedy není rozumně možné zkonstruovat, ani by jeho konstrukce neměla hlubšího smyslu. Vzhledem k tomu, že délky strun rostou

geometrickou řadou, byl rozsah prvotních strunných nástrojů značně omezen. Až později dochází první konstruktéři ke zjištění, že je možné snížit frekvenci struny nejen jejím protáhnutím, ale i zvýšením její hmotnosti, tzn. zvětšením tloušťky struny. Vzhledem k pokročilé technologii při obrábění kovů jsou dnes již výrobci strun schopni dodávat struny ve velmi jemně odstupňovaných dimenzích. Struny jsou označeny čísly od 12 do 26, přičemž každému z těchto čísel je přiřazen jasně stanovený průměr struny, který se pohybuje od 0,725 mm do 1,6 mm. Tento systém se používá ve většině zemí světa a je užíván téměř všemi výrobci.

Díky možnosti používat jemně odstupňované struny, lze směrné číslo (číslo pomocí kterého počítáme menzury strun) snížit z již zmiňované  $\sqrt[12]{2} = 1,059463094$  na číslo nižší. Zároveň je možné použít nejen struny hladké, nýbrž i struny opředené a podpředené, které jsou i při malé délce schopné vydávat nízké frekvence. Konstruktér vždy vychází z velikosti modelu, pro nějž menzuru počítá. Z maximální možné délky hladké struny, kterou dispozice nástroje umožňuje, pak musí odvodit délku a počet opředěných a podpředěných strun. Zároveň musí vzít v potaz velikost napětí jednotlivých strun, jejich pevnost, dimenze a velikost inharmonicity. Přesto, že křížení strun znamenalo velký pokrok, neboť spolu s použitím můstku umožňuje maximalizovat v nástroji délku strun, vystavilo konstruktéry zároveň i novým problémům, neboť musí řešit přechod mezi diskantovou a basovou kobyolkou. Je žádoucí, aby tento přechod byl maximálně jemný a přirozený, aby posluchač při hře nevnímal velký skok mezi nejdelším přechodovým a první basovým chórem. V minulosti bylo rovněž experimentováno i s trojitým křížením strun, vzhledem ke složitosti a mnohým nevýhodám, které toto řešení přináší (obtížné umístění zalomené basové kobyly, tři úrovně strun, rozdílná délka kladívek atd.), bylo však od této konstrukce upuštěno. Jak již bylo zmíněno, je cílem konstruktéra využít maximálně potenciál nástroje, proto při rozhodování jaké směrné číslo u nástroje použije, tzn.: pod jakým úhlem bude kobylka ubíhat, má k dispozici rovněž možnost použít tzv. redukci kobyly. To znamená, že zvolí rychlejší nárůst délky strun, přičemž na konci diskantové kobyly poruší jejich doposud používaný délkový přírůstek, konec kobyly ostře stočí a místo nárůstu délky využije větší dimenze strun a na samém konci pak i několik strun opředěných. Někteří výrobci rovněž pro maximalizaci délky strun používají můstek právě i v případě dolní části diskantové kobyly, čímž mohou strunu vést až do samého kraje ozvučnicku a zároveň vést kobylku tak, že není tak moc omezeno její chvění tím, že by se nacházela příliš u kraje rezonanční desky.



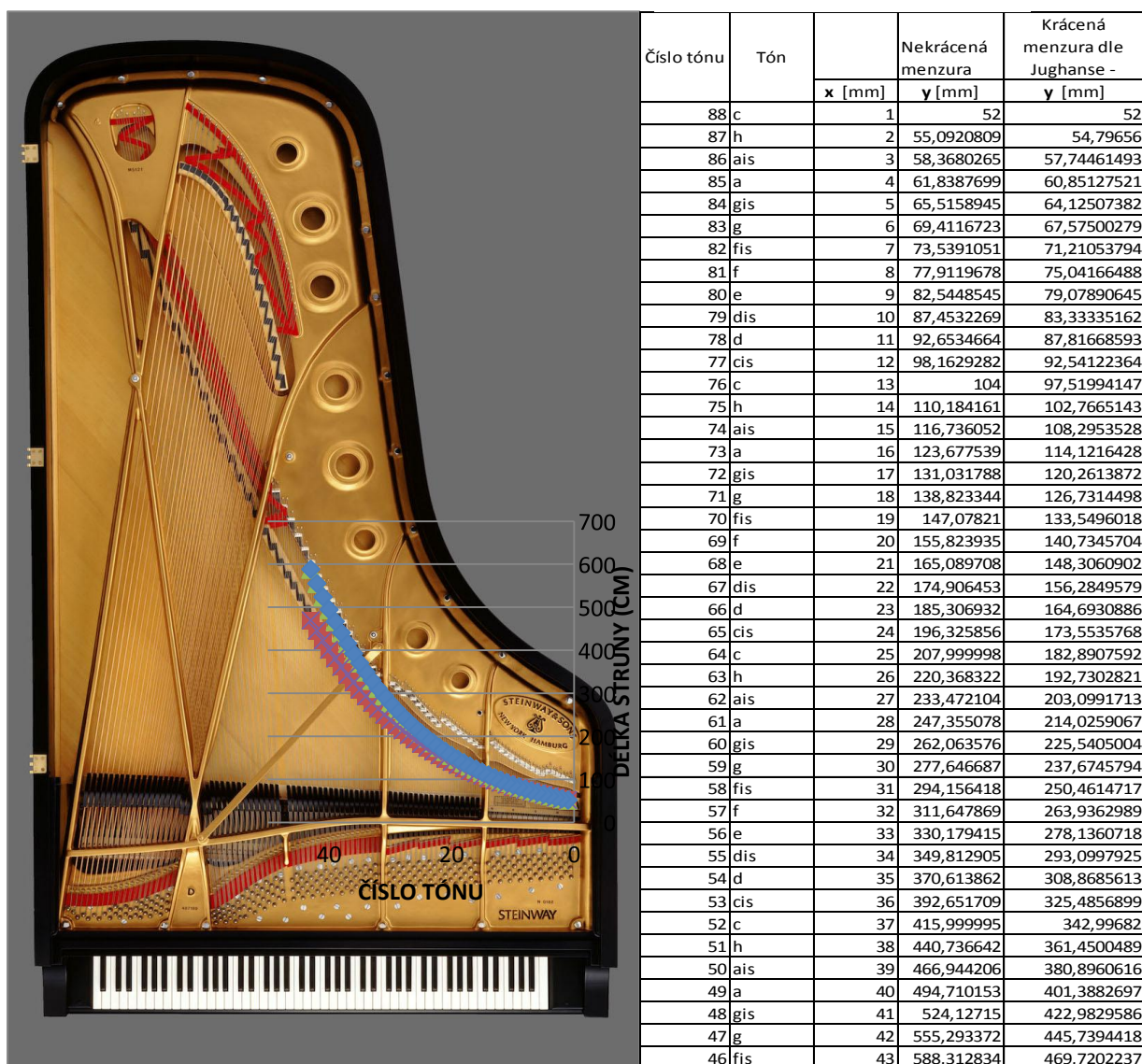
Obr. 17- Průběh kobylek u malého salónního klavíru

Problematika délky strun však není zdaleka tak jednoduchá, jak je popsáno výše. Jak již bylo řečeno, důležitou roli rovněž hraje při konstrukci nástroje nejen napětí strun, kterému pak musí odpovídat i velikost strunového přetlaku a rovněž dimenzování rezonanční desky, ale i velikost inharmonicity. Jak je známo, tón je charakterizován nejen výškou, trváním a intenzitou, ale i další vlastností odlišující ho od ostatních, a to barvou tónu, která je tvořena vyššími harmonickými tóny. Tyto harmonické se zpravidla tvoří na přirozených intervalech tónu základního, tzn. na terciích, kvartách, kvintách, oktávách apod.

U reálného nástroje však vlivem ohybové síly dochází k drobnému posunutí těchto vyšších harmonických tónů a vzniká jev zvaný inharmonicitou. Všeobecně platí pravidlo, že stíhlejší struna má vzhledem k většímu napětí i menší stupeň této inharmonicity. Naopak struny, jejichž poměr délky a síly je menší, vykazují inharmonicitu výrazně větší. Nutno však podotknout, že inharmonicitou nemusí být jevem nutně nežádoucím. Klaus Fener uvádí, že je-li malá, jeví se zvuk nástroje jako bezbarvý a v diskantu matný. Lidský sluch, který nevnímá tónové výšky zcela lineárně, vyžaduje zvýšení frekvenční stupnice asi o 50 centů (čtvrtón). K tomuto zvýšení je možné dojít vysokými hodnotami inharmonicity, které leží již na hranici toho, co ještě vnímáme jako zvuk. V ideálním případě pak vznikne zvukový charakter, který v jeho barevnosti a tónu vnímají všichni posluchači jako optimální. Tento „problém s inharmonicitou“ se netýká pouze diskantu, ale rovněž basu. U menších nástrojů zpravidla konstruktér „bojuje“ s vysokým stupněm inharmonicity basových strun, nicméně u koncertních mistrovských klavírů již tento problém opadá a zajde-li v tomto případě konstruktér příliš daleko a navrhne basovou strunu příliš dlouhou, může se stát, že stupeň inharmonicity je již tak malý, že struna zní pro ucho nezajímavě, její tón není tak bohatý a posluchač ji proto dokonce může vyhodnotit jako tišší a z hlediska hudebních kvalit horší, oproti jejímu kratšímu protějšku (Fenner 2002). Nelze tedy jednoznačně konstatovat, že delší struna pro daný tón automaticky znamená i lepší výsledek. I proto pozornému člověku, který se o klavíry zajímá, pravděpodobně neunikne skutečnost, že 95% všech koncertních

mistrovských klavírů má svoji maximální délku v poměrně úzkém rozmezí mezi 272-284 cm. Je to dáno právě tím, že kolem této délky je již možné navrhnout strunový potah bez velkých kompromisů, není třeba redukovat délku posledních přechodových strun, basové struny jsou již tak dlouhé, že jejich délka je v poměru k inharmonicitě a napětí ideální, basovou kobylku je přitom možné umístit v dostatečné vzdálenosti od ovinutí, takže se na rezonanční desce nachází dostatečně velký prostor pro chvění desky a není třeba používat kobylkového můstku, který i přes velké klady, které přináší u malých nástrojů, není u koncertního klavíru ideálním řešením. Na Obr. 18 lze vidět řešení menzury a provedení kobylek u koncertního klavíru. Do obrázku je rovněž vložen orientační graf, na kterém je možné vidět přírůstek jednotlivých strun. Modré body ukazují nekrácenou menzuru, červené pak krácenou dle Hansinga- Jughanse viz (Tab. 1). Nutno podotknout, že tento graf je pouze ilustrativní jeho cílem je objasnit čtenáři rozdíl mezi krácenou a nekrácenou menzurou.

Tab. 1- Tabulka vypočtených menzur



Obr. 18- průběh kobylek u koncertního klavíru



### Přípevnění kobytek na rezonanční desku

Lepení kobytek je jednou ze stěžejních operací při konstrukci celého nástroje. Lepení kobytky se provádí v základě dvěma způsoby:

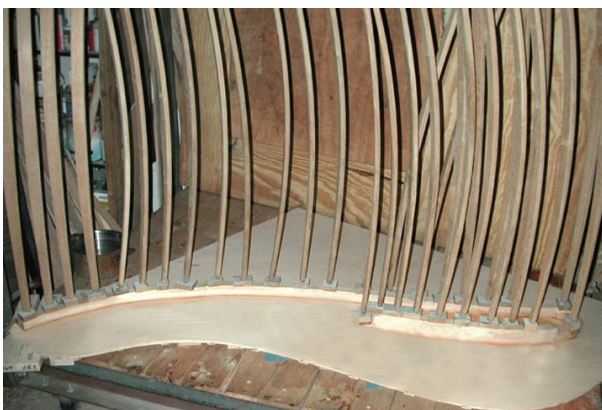
1) kobytky je již vyštechovaná a opatřená kobytkovými hřeby a je naformátována přesně na potřebnou výšku, přetlak je pak proveden podkládáním závěsů na litinovém rámu a manipulací s litinovým rámem pomocí stavěcích šroubů. U krátkých (zpravidla basových) kobytek je pak možné provádět technologii tzv. zadního přetlaku. Jedná se o postup, kdy je kobytky hoblována ze své spodní strany, přičemž nahoře je již dokončená. I tímto hoblováním je možné dosáhnout ideálního strunového přetlaku.

2) Na rezonanční desku je nalepen polotovár kobytky, který je dále dohotovován současně s montáží litinového rámu.

Při lepení kobytek je nutné vzít v potaz, že jsou lepeny na již klenutou rezonanční desku. Někteří výrobci proto provádí tzv. podhoblování kobytek, aby se zamezilo „rovnání“ rezonanční desky. Jiní výrobci naopak upřednostňují lepení rovné kobytky, čímž je docíleno vyvolání napětí, které je dle některých konstruktérů žádoucí. Např. Klaus Fenner uvádí: *Již v tomto bodě dochází při konstrukci nástroje k rozporům, někteří tvrdí, že se má vnitřní pnutí v maximální možné míře omezit. Naopak Steinway and Sons propaguje (a v souladu s ním v tajnosti i jeho špičková konkurence) tvrzení, že téměř všechny akusticky významné díly nástroje by měly působit pnutí. Praxe, která v tomto tvrzení hovoří sama za sebe, tuto skutečnost potvrzuje. Otázkou však zůstává, co se má k těmto akusticky významným dílům nástroje počítat. Zajisté tam patří jeho kostra (včetně vnitřního a vnějšího ovinutí/lubu) a snad i hrací rám (Fenner 2000).*

Lepení kobytky se provádí buď ve speciálních k tomu určených hydraulických lisech, nebo v lisech mechanických, kdy je kobytky přichycena buď pomocí ztužidel opatřených závitem, nebo speciálními pružnými pruty (Obr. 19), které jsou vypruženy mezi kobytkou a horní plochou lisu. Kobytky je možné lepit jak současně s žebry (zpravidla u levnějších nástrojů a pianin) tak i samostatně. Výhodou lepení současně s žebry je poměrně velké zrychlení výroby, neboť jsou tímto vykonány v podstatě dvě operace během jednoho technologického kroku. Značnou nevýhodou je pak skutečnost, že je velmi obtížné provést dokonalé přilepení jak žeber, tak kobytky, uvědomíme-li si, že toto lepení probíhá spolu s formováním průhybu rezonanční desky. Velkou výhodou lepení zvláště je zpravidla právě dokonalější provedení operace, přičemž lepení probíhá obvykle v lisech, ve kterých je na

lepenou kobylku dobře vidět, a je tedy možné celou operaci poměrně dobře kontrolovat. Místo tradičního lepení kobylek kožním kličem (Bonhard 1958), se dnes obvykle používají dispersní polyvinylacetátová lepidla, jež mají zvýšenou odolnost proti působení vody. Jsou však známy i experimenty, kdy kobylka nebyla k rezonanční desce připevněna žádným lepidlem a držela pouze působením tlaku strun na rezonanční desku, stejně jako je tomu například u houslí. Tyto se neseťkaly s velkým úspěchem a dnes se drtivá většina kobylek k rezonanční desce standardně lepí. Někteří výrobci lepí v šablonách kobylku, která je ze spodu zcela hladká, jiní používají pro její lepší vymezení i kolíky, které prochází skrz kobylku a rezonanční desku do žeber.



*Obr. 19- Lepení kobylek za pomoci jasanových vzpěr*



*Obr. 20- Lepení kobylek pomocí hydraulického lisu*

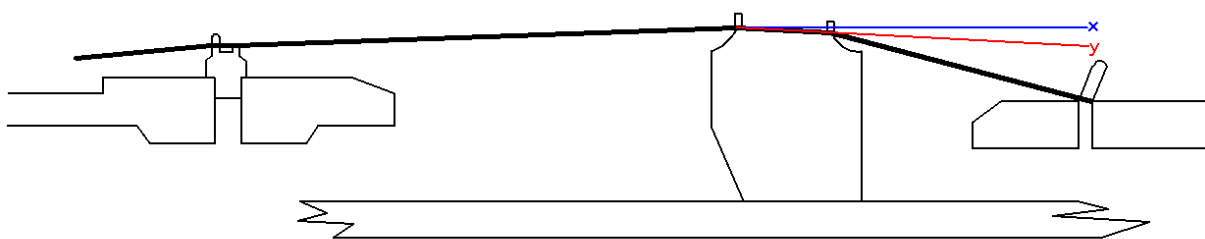
Většina výrobců nepřipevňuje kobylku k nástroji pouze lepidly, ale užívá současně kromě lepidla i vruty. Tyto buď procházejí skrz žebra a rezonanční desku do kobylek nebo procházejí speciálními dřevěnými (u levnějších výrobců plastovými) rozetami. Výhodou prvního způsobu jest jednodušší provedení, přičemž se zároveň docílí i lepší fixace žeber, nevýhodou je pak oslabení průřezu rezonančního žebra. Již zmíněné rozety zajišťují kvalitní fixaci kobylky, aniž by došlo k oslabení žeber. Někteří výrobci, mezi které se řadí právě např. August Förster, tuto technologii používají, přičemž funkce „spojených rozet“-protikobylek je podrobněji popsána právě v kapitole, která je věnována tomuto výrobcu.

#### Povrchová úprava kobylek a rezonančních desek klavírů a pianin

Vliv povrchové úpravy na rezonanční vlastnosti je poměrně často diskutované téma. Například v oblasti houslařství je vliv povrchové úpravy vnímán jako poměrně velký a důležitý, o čemž svědčí zmínky ve značné části literatury, jenž se stavbou houslí zabývá. Pro příklad uveďme alespoň úryvek z knihy Umění houslařů: *Příprava před lakováním i samotný lak změni nenalakováný nástroj, s čímž je nutné počítat. Jestliže houslař problémy lakování skutečně zvládl, potom může téměř s jistotou očekávat, jaká změna po nalakování nástroje z tónového hlediska nastane. Měl by si pečlivě zaznamenat složení každého laku, aby si mohl i po mnoha letech ověřit na vlastním nástroji, co se s ním za čas stalo a jaké změny je možno zaznamenat* (Pilař a Šrámek, 1986). Ve stavbě klavírů a pianin je však vliv povrchové úpravy poněkud kontroverzní téma. V historii se sice používaly rezonanční olejové a lihové laky, nicméně vzhledem k obtížnosti technologie od nich dnes většina výrobců upustila a byly vytlačeny laky nitrocelulózovými, které se vyznačují vysokými emisemi těkavých organických látek, a proto se dnes užívá k povrchovým úpravám ponejvíce laků polyuretanových. Ty jsou obvykle naneseny jak na rezonanční desku, tak i na boky kobylky. Podle některých odborných publikací nemá PU žádný významný vliv na zvuk jak klavírů, tak i pianin. Například Prach uvádí: *Také lakování rezonančních desek bylo při mnoha pokusech zkoušeno. Vše bylo prováděno ve snaze vylepšit zvuk nástrojů. Všechny pokusy vyzněly však v tomto směru bez hmatatelných výsledků* (Prach 1987). Jiní klavírní odborníci se však domnívají, že i povrchová úprava může svým pnutím po zaschnutí pomoci klenout desku, a významně ovlivnit zvukovou charakteristiku nástroje. Vlivem povrchové úpravy na akustické vlastnosti se zabýval rovněž V. Hornych ve své diplomové práci (Hornych 2008). Odlišná PU se nanáší na vrchní stranu kobylky, která je pak upravena zpravidla buď speciální grafitovou povrchovou úpravou, jež má zvyšovat kluznost strun jako je tomu např. u firmy Bechstein, Steinway apod., nebo je kobylka ponechána bez PU (např. u firmy: August Förster).

### Dokončení kobylyk a problematika strunového přetlaku

Přesto, že tato práce si neklade za cíl osvětlit čtenáři dokonale technologické postupy při výrobě klavíru, a ani si nedělá ambice být technologickou učebnicí, považuje autor za nezbytné seznámit čtenáře alespoň rámcově s problematikou strunového přetlaku, neboť se jedná o jednu z nejdůležitějších částí technologického procesu při konstrukci klavíru. Strunový přetlak je definován jako vyvýšení kobylyky nad sedlo agrafu a závěs litinového rámu (Obr. 21- x). Vzhledem k tomu, že struna má své vlastní pnutí (cca 600-700 N), dochází tím de facto k regulaci tlaku, který je vyvíjen na rezonanční desku. Velikost tlaku na kobylyku lze odvodit poměrně jednoduchým rozkladem sil, přičemž je patrné, že s rostoucím vyvýšením kobylyky nad závěs a sedlo agrafu také roste tlak na rezonanční desku nástroje. Průměrná síla běžné klavírní struny, která působí na kobylyku, je přibližně 10-20 N (Rafaj 2000). Tím, že velikostí přetlaku zasahujeme přímo do napětí rezonanční desky, ovlivňujeme zásadním způsobem akustiku ozvučnicku. Proto se jedná o velmi důležitý faktor, který je nutné brát v úvahu při konstrukci klavírů i pianin. Nelze bohužel snadno uvést ideální vyvýšení, neboť toto je vždy závislé nejen na pnutí strun, ale také na síle a konstrukci žeber i celé rezonanční desky a na vlhkosti jednotlivých dřevěných částí. Doporučené hodnoty se zpravidla pohybují v řádu jednotek milimetrů. Dalším důležitým faktorem je pak sklon kobylyky (Obr. 21- y), který určuje, pod jakým úhlem povede struna přes kobylyku k závěsu litinového rámu. Tomuto sklonu se rovněž někdy říká zadní přetlak a jeho tvorba je nedílnou součástí při operaci formování kobylyky nad litinovým rámem.



Obr. 21- Strunový přetlak

## Patenty v oblasti řešení pianových kobylek

V historii výroby klavírů bylo provedeno nesčetné množství různých řešení, vylepšení a patentů nejen v oblasti výroby mechaniky a ozvučníků, ale právě i v oblasti řešení pianinových a klavírových kobylek, můstků a způsobu jejich uchycení či odlehčení. Některé vynálezy a konstrukční řešení se zachovaly dodnes, jiné upadly v zapomnění, avšak je nutné dodat, že vývoj a optimalizace klavírových kobylek probíhá dodnes, ale v současnosti se celkově konzervativní svět klavírů mění výrazně pomaleji, nežli tomu bylo v historii. Patenty nejenže umožňovaly firmě získat technologický náskok před ostatními výrobci, ale byly často i hojně marketingově využívány. Tuto skutečnost poměrně dobře ilustruje historický limitovaný model Centennial firmy Steinway, na jehož rámu jsou vylity patenty s datem jejich podání, přičemž cílem bylo nepochybně demonstrovat náskok značky před konkurenčními výrobci.

V příloze této práce jsou na Obr. 71 - Obr. 82 jsou zobrazeny různá řešení, jež byla výrobci patentována. Ze současných patentů je v příloze možné vidět odlehčenou kobylku firmy Schimmel, rozšíření rezonanční desky pod kobylkou používané u prémiových nástrojů firmou Petrof, nebo kobylkové agrafy firmy Steingraeber. Dále je zde k vidění výčet různých patentů historických: odlehčení můstku kobylky, odlehčení basové kobylky unikátní způsoby uchycení strun a kobylkových hřebů, různé poměrně bizarní geometrie kobylek apod...

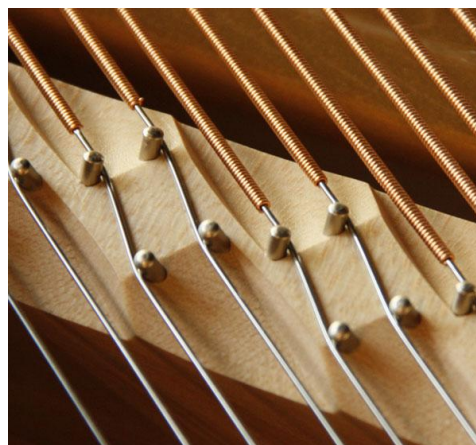


Obr. 22- Litinový rám modelu Centennial

## Přehled řešení kobylek jednotlivými vybranými výrobci

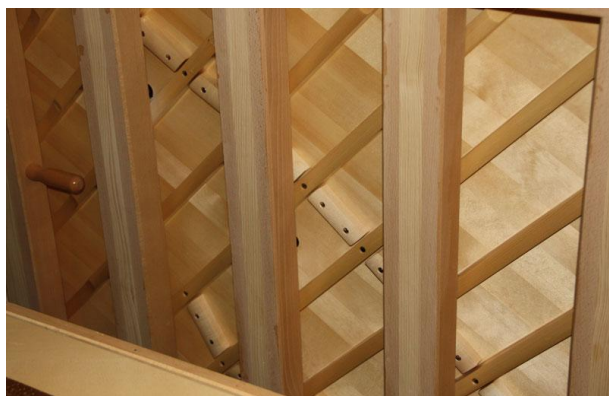
### August Förster

Firma August Förster se řadí k menším, avšak tradičním výrobcům klavírů a pianin. Přesto, že dnes přistupuje ke stavbě klavírů spíše konzervativnějším způsobem, nebylo tomu tak vždy. Mezi léty 1924 a 1931 Förster postavil několik čtvrttónových klavírů pro experimentální hudbu českého skladatele Aloise Háby, v roce 1933 pak postavil jeden z prvních elektrochordů (Williams 2002). Co se týče kobylek, využívá tento



Obr. 24 – Opředené struny nástroje August Förster

výrobce k jejich výrobě u klavírů i u pianin masivního skalního javoru (<http://www.august-foerster.de>). Zvláštností tohoto výrobce je, že jako jeden z mála používá při výrobě pianin tzv. protikobylek. Jedná se o tvarované přířezy, které se nacházejí na rezonanční desce na straně žebér a jsou s kobylkou pevně spojeny vruty. Tyto elementy, které se nacházejí mezi žebry, zajišťují lepší kontakt kobylky s rezonanční deskou a lepší přenos chvění na desku, nevýhodou je pak výrazně složitější výroba ozvučnicku a rovněž zvýšení váhy rezonanční desky. Firma August Förster u svých nástrojů zpravidla nepoužívá povrchové dokončení kobylek. Tento výrobce sází na velmi jednoduchý design, nepoužívá ani duplex systém, ani jednotlivé uchycení strun, přesto se však jeho nástroje řadí ke světové špičce. Za povšimnutí rovněž stojí opřádané struny, neboť tento výrobce i přes nepoměrně vyšší nároky na složitost a chybovost výroby používá opřádky, která zacházejí neobvykle hluboko do kobylkových štechů.



Obr. 23- Protikobylka firmy August Förster



## Petrof

Pianinové kobylky firmy Petrof jsou vyrobeny z masivního buku vysoké jakosti. Vzhledem k technologii, kterou tato firma využívá, jsou polotovary kobylek nalepeny na rezonanční desku spolu s žebry ve specializovaném hydraulickém lisu a poté jsou při operaci kování



Obr. 25- Kobylky firmy Petrof

odbornými pracovníky dohotoveny pomocí speciální štechovací frézy a pneumatické vrtačky. Odlehčení basových kobylek je pak provedeno ručním hoblíkem a poté se do obou kobylek umístí kobylkové hřebce. Pianinová basová kobylka je u nástrojů Petrof zpravidla rovná, s přiměřeně velkým můstkem a je vybavena dvěma poměrně dlouhými jazyky, které zajišťují rovnoměrné rozložení tahu strun na rezonanční desce. Klavírové kobylky jsou vyrobeny z masivního horského javoru. Opracování těchto kobylek je provedeno tradiční rukodělnou prací za pomoci velmi ostrého dláta. Tato práce je pak svěřována skutečným odborníkům, přičemž je na tuto operaci kladen velký důraz a je zde, jak je možné vidět z přiložených fotografií, dosahováno velmi vysoké přesnosti i při standardním ručním obrábění. Můstek je použit pouze u menších salónních křidel, kde je potřeba dosáhnout maximální délky strun a zároveň umístit kobylku ve větší vzdálenosti od kraje. U mistrovských nástrojů jsou kobylky zpravidla bez můstků a jsou odlehčeny speciálními otvory, aby byla maximalizována možnost chvění rezonanční desky. Nástroje high-endové značky Ant. Petrof jsou pak pod kobylkou opatřeny speciálním rozšířením rezonanční desky.



Obr. 26- Štechování kobylky Ant. Petrof

## Bösendorfer

Vídeňská firma Bösendorfer založená v roce 1827 patří ke skutečně tradičním výrobcům hudebních nástrojů ([www.pianos.cz](http://www.pianos.cz)). Je výrobcem s nejhlubší historií v celém souboru firem zmíněných v této diplomové práci a zároveň je jedním z nejstarších výrobců, kteří vyrábějí nástroje i v současnosti. Klavírové



*Obr. 27- Odlehčení basové kobyly firmy Bösendorfer*

kobyly firmy Bösendorfer jsou vyrobeny z vysoce kvalitního javoru. Nástroje tohoto výrobce se vyznačují značně kulatými, barevnými a velmi mohutnými basy, přičemž i konstrukce kobyly je tomu značně uzpůsobena. Výrobce tvrdí, že je u basových kobyly použito speciálního odlehčení, které je odvozeno ze smyčcových nástrojů a které maximálně redukuje hmotnost kobyly a činí ji citlivější k vysokofrekvenčnímu chvění (<http://www.perarts.com/>). Zvláštností je, že Bösendorfer používá toto odlehčení i v případě, že kobyly je vybavena můstkem. Kobyly tohoto nástroje jsou štechovány zpravidla ručně, přičemž způsob štechování je u těchto nástrojů prováděn tradiční cestou ([www.bosendorfer.com](http://www.bosendorfer.com)).



*Obr. 28- Štechování kobyly firmy Bösendorfer*



### Fazioli

Nejmladší z uvedených firem, firma Fazioli, používá značně odlišný způsob výroby klavirových kobylek. Vzhledem k tomu, že se zabývá pouze výrobou luxusních klavírů, jsou všechny kobylinky vyráběné stejnou a poměrně nákladnou technologií. Kobylinky jsou vyrobeny ze slepených tenkých mahagonových a javorových lamel. Koruna kobylinky je



*Obr. 29- Lepení kobylek u firmy Fazioli*

pak tvořena několika druhy dřevin, které mají předpoklady pro dobré „vedení“ daných frekvencí. Basová a nižší přechodová část je tvořena z javoru, přechodová část pro vyšší frekvence je z habru a diskantová část je pak tvořena ze zimostrázu. Firma Fazioli rovněž používá poměrně neobvyklý styl štechování kobylek, kdy na boční straně otvorů pro kobylové hřeby zarazí dláto, čímž přesně určí menzuru a dlabání pak provádí proti tomuto zářezu, tzn. štechování je prováděno s 90°rozdílem oproti běžnému postupu. Můstky kobylek jsou u těchto nástrojů používány pouze u dvou nejmenších modelů – F 156 a F 183. Fazioli u svých basových kobylek nepoužívá žádné odlehčení, pouze v oblasti basu je kobylička zúžená, aby bylo podpořeno lepší chvění desky ([www.fazioli.com](http://www.fazioli.com)).



*Obr. 30- Štechování kobylek firmy Fazioli*

### Steinway and Sons

Firma Steinway, patří bezesporu k nejznámějším výrobcům klavírů a je proslulá nejen vynikající kvalitou svých nástrojů, ale také velmi tradiční technologií, která po prvním překotném vývoji k modernímu typu klavíru doznala jen minimálních změn. Materiál na kobyly – masivní skalní javor – je řezán tzv. čtvrtkovým požezem, z čehož je patrné, že se jedná o radiální řezivo, kteréžto má předpoklady pro kvalitní akustické vlastnosti. Dřevo pro kobyly pochází z různých částí Spojených států amerických, jako je například Adirondacké pohoří, Vermont, Wisconsin, anebo z východní Kanady.



*Obr. 31- Kobyly klavírů firmy Steinway*

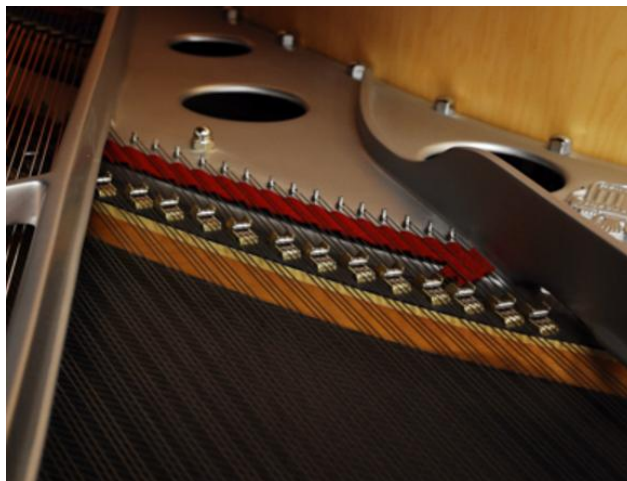
Samotná kobyly je pak tvořena z vertikálně lepených přísně radiálních javorových lamel vysoké kvality. ([www.steinwaypianos.com](http://www.steinwaypianos.com)) Na vrchní část kobyly je pak naklizen masiv, vyrobený ze stejného materiálu, který zajišťuje stabilní upevnění kobylykových hřebů. U koncertních nástrojů firmy Steinway (model D, B, C) je rovněž typickým znakem propojení jazyků přechodové a basové kobyly. Velký důraz je rovněž kladen na připevnění kobyly. Při lepení kobyly je lepená kobyly přichycena přednostně v místě žeber, aby došlo k lepšímu propojení celého ozvučného systému. Kobyly je dále připevněna kolíky a vruty tak, aby byla maximalizována její soudržnost s rezonanční deskou (<http://www.thepianostore.com/>). Na povrchu kobyly se nachází grafitová povrchová úprava, která zajišťuje nejen vysokou estetickou hodnotu, ale i vysokou kluznost strun. Štechování kobyly je prováděno zpravidla ručně a to tradičním způsobem pomocí ostrého dláta ([www.steinway.com](http://www.steinway.com)).



*Obr. 32- Hoblování strunového přetlaku*

### Steingraeber and Söhne

Německá firma Steingraeber and Söhne má na trhu s nástroji poněkud zvláštní ikonické postavení, které je občas odbornou veřejností přirovnáváno k postavení firmy Rolls-Royce v automobilovém průmyslu. Luxusní nástroje tohoto výrobce se vyznačují na jednu stranu značně konzervativním a tradicionalistickým přístupem ke konstrukci a ke



*Obr. 33- Kobylka a rez. deska experimentálního modelu Phoenix*

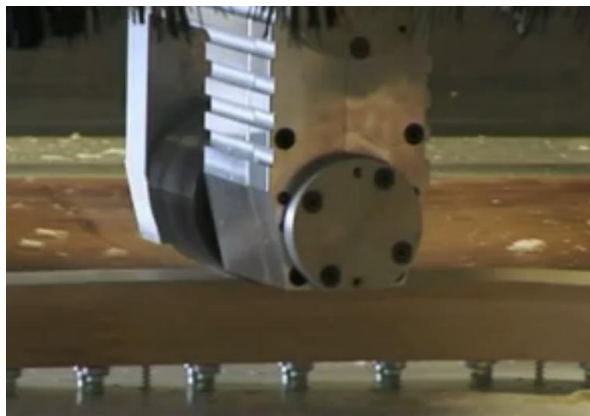
zvoleným materiálům, na druhou stranu se firma nebojí v mnoha věcech experimentovat a přicházet na trh s výjimečnými novinkami. Mezi nejnovější inovace by se dal především zařadit systém Mozart Rail, který umožňuje významné snížení ponoru kláves a přibližuje nástroj svým charakterem k nástrojům klasicistním při zachování rychlé repetice a citlivé dynamiky. Mnohé inovace pak tato firma provedla i v oblasti klavírových kobytek, které jsou vyráběny pomocí ohýbané javorové lamely. Za zmínku stojí především kobytkové agrafy, s nimiž tato firma dlouhodobě experimentuje a naposledy je použila ve svém modelu E 272 Phoenix. Tento model si nedělá ambice uspět a kralovat na trhu „standartních“ klavírů, nýbrž se snaží nastínit cestu vývoje tohoto nástroje do budoucna. Výhodou těchto agrafů by mělo být především zvýšení akustického potenciálu nástroje a dále pak stavitelný tlak (přetlak) u každého jednotlivého chóru na kobytku ([www.steingraeber.de](http://www.steingraeber.de)).



*Obr. 34- Standardní kobylka malého modelu firmy Steingraeber*

### C. Bechstein

V současnosti velmi úspěšný výrobce klavírů firma C. Bechstein, založená roku 1853 v Berlíně, má velmi bohatou historii. V současnosti se hlavní závod nachází v Seifhennersdorfu v Sasku a dceřiná společnost, zaměřená na nástroje středního cenového segmentu pak působí v Hradci



Obr. 35- Výroba kobyly firmy Bechstein na CNC

Králové. Firma v současné době využívá při výrobě nástrojů všech dostupných

moderních technologií, což se projevuje ve velmi vysoké přesnosti a kvalitě jejích nástrojů.

U všech svých klavírů používá při výrobě CNC obráběcích center, které jsou schopny zajistit maximální přesnost vyráběných dílů. Kobyly těchto nástrojů jsou vyrobeny z vysoce kvalitního buku, přičemž vršek kobyly je tvořen habrem. Výroba kobylyk probíhá z velké části samostatně a kobylyka je do nástroje lepena již de facto dokončená.

Kobyly jsou z pravidla vloženy do CNC obráběcího centra, které zajistí nejen jejich naformátování, ale i provedení štechů a následné naražení kobylykových hřebů. Diskantová kobylyka je poté nalepena na rezonanční desku, přičemž přetlak je u diskantové kobylyky prováděn úpravou výšky alikvotních prážců a u basové kobylyky metodou spodního přetlaku, ještě před jejím nalepením. Povrchová úprava u kobylyk firmy Bechstein se zpravidla neprovádí a kobylyka je ponechána ve svém přírodním vzhledu ([www.bechstein.com](http://www.bechstein.com)).



Obr. 36- Naražení kobylykových hřebů za pomoci CNC



## Yamaha

Yamaha patří mezi největší výrobce pianin a klavírů na světě (Williams 2002). Přesto, že v současné době je její výrobní portfolio výrazně větší a neomezuje se pouze na výrobu klavírů a pianin, byla výroba klávesových hudebních nástrojů prvním



Obr. 37- Ohýbání a lepení lamelové kobyly

artiklem, s kterým tato firma vyrazila na trh, o čemž mimo jiné svědčí i logo firmy, tvořené třemi zkříženými ladičkami. Výroba klavírů a pianin zahrnuje velké množství cenových i kvalitativních tříd, které pokrývají celé spektrum od low-endových nástrojů, které jsou vyráběné mimo Japonsko např. v Indonésii ([usa.yamaha.com](http://usa.yamaha.com)) a jejichž kvalitu si Yamaha pouze externě hlídá, až po nástroje nejvyšší kvality, které se vyrábějí ručně v místě svého původu. Jak již bylo řečeno, pod značkou Yamaha se skrývá opravdu široký trh nástrojů, čemuž odpovídá i velké spektrum použitých technologií. Výroba levnějších pianin je značně automatizována a je zde použita metoda spodního přetlaku, tzn.: rezonanční deska se vlepí do nástroje již dokončená a opatřená kobyly, naopak u špičkových nástrojů je výroba prováděna zcela ručně. Kobyly mistrovského nástroje CFX je podobná kobylyce firmy Steinway. Je zde použito javorové lamely, která je z vrchní části překlížena kusem masivního javoru. Polotovar kobyly u tohoto nástroje je průběžný a basová a diskantová kobylyce je propojená v jeden celek. Přetlak je prováděn standardním ručním způsobem za pomoci hoblíku. Štechování se pak provádí klasickou cestou a to pilou čepovkou a dlátem, tvorba štechů se provádí z boku stejně jako u firmy Fazioli.

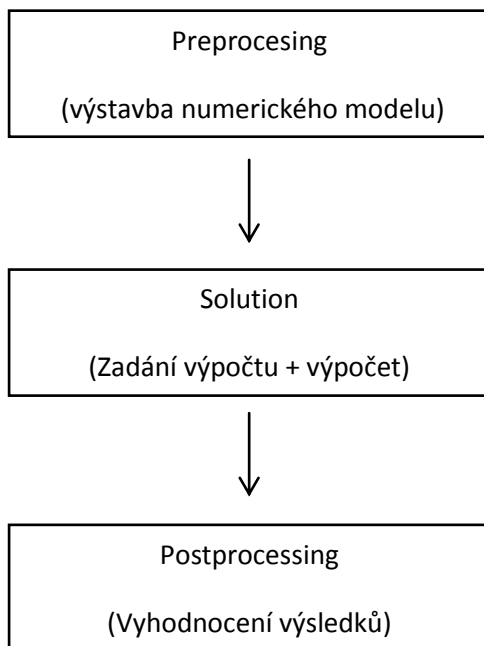


Obr. 38- Lepení kobyly koncertního nástroje řady CFX

#### 4) Metodika:

##### a) Sestrojení konečně prvkového modelu

Ke zmapování chování měřených vzorků byl sestaven jeho jednoduchý model a to pomocí výpočetního systému ANSYS Mechanical APDL, který je licencován Lesnickou a dřevařskou fakultou Mendelovy univerzity v Brně. Postup při vytváření modelu je zřejmý z níže uvedeného schématu.

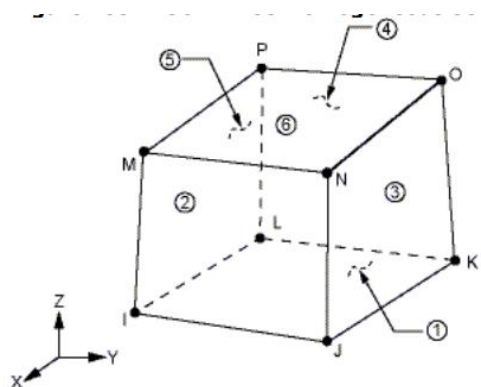


### 1) Preprocessing:

Při tvorbě modelu byl jako výchozí zvolen kvádr o rozměrech shodných s rozměry vzorku. Rozměry vzorku byly změřeny a poté použity při rýsování modelu v programu ANSYS. Poté bylo provedeno vysítování objektu. K vysítování byl určen obdélníkový element Brick 8 node 185 viz.: Obr. 39. Do modelu byly zadány materiálové vlastnosti buku, Youngovy moduly pružnosti, smykové moduly pružnosti ve třech rovinách, a Poissonova čísla viz.: Tab. 2. Buk byl zvolen proto, že je ve vzorcích nejhojněji zastoupen a proto byl určen jako referenční materiál.

Tab. 2- Materiálové konstanty (Heraon 1948)

Bk	
PRXZ	0,49
PRYZ	0,044
PRXY	0,073
EX	2240
EY	13700
EZ	1140
GXZ	46
GYZ	1060
GXY	1010



Obr. 39 Element Solid Brick 8 node 185

### 2) Solution

Cílem výpočtové fáze je definování typu analýzy a její následné provedení. Vzhledem k požadavkům na výstup (zobrazení vlastních frekvencí vzorku), byla zvolena modální analýza. Dále byl zvolen požadovaný počet zobrazení vlastních frekvencí, tzn.: první vlastní frekvence + zvolený počet následujících vlastních frekvencí.

### 3) Postprocessing

Výstupy z provedených výpočtů umožňují zobrazit velikost a tvar deformace při vlastních ohybových frekvencích a dále pak porovnat velikost vlivu jednotlivých parametrů, a to i v grafickém zobrazení. Pro zobrazení deformací je použito barevné rozlišení podle velikosti pohybu jednotlivých prvků. Měřítko zobrazovaných deformací je možné nastavit a v případě potřeby je možné průběh deformace spustit i jako animaci. Program ANSYS umožňuje rovněž export všech zobrazených obrázků, grafů nebo videa do běžně používaných formátů (JPEG, PNG apod...).

## **b) Přístrojové nedestruktivní testování:**

### 1) Měření vlastních ohybových frekvencí vzorků

K měření byly použity vzorky o rozměrech 15 mm x 50 mm x 300 mm. Vzorky byly vyhotoveny v následujících variantách: 3 ks masivní eben, 3 ks masivní skalní javor, 4 ks lamela BK- lignamon, 18 ks lamela BK, 40 ks BK masivní radiál- tangenciál, 20ks BK příčně lepený, 12ks habr radiál- tangenciál, 30 ks lamela JV-MHG, 18 ks lamela JV, 22 ks masivní horský JV radiál-tangenciál. Vzorky byly dlouhodobě uloženy ve skladu za teploty 20°C a 50% RVV. Zkušební vzorky byly zváženy a poté byly v bezdozvukové komoře uloženy na přípravek s gumovými závěsy, aby bylo dosaženo co nejmenšího styku s pevným podkladem a to pouze v místech, kde docházelo k minimální deformaci - uchycení vycházelo z konečněprvkového modelu vytvořeného v programu ANSYS. Vnitřní část bezodrazové místnosti tvoří železobetonový monolit, jehož stěny jsou 30 cm silné s vnitřními rozměry prostoru 8,6 m x 7,1 m x 6,6 m. Tento monolit je uložen na pružinách. Hmotnost monolitu osazeného pohltivými klíny je cca 300 tun a společně s poddajností odpružení má rezonanci přibližně na kmitočtu 5,5 Hz. Klíny mají délku 1m a rozměry základny jsou 24 cm x 24 cm. Pohltivé klíny jsou vyříznuty vodním paprskem o objemové hmotnosti 100 kg/m<sup>3</sup> a jsou potaženy velmi tenkou silonovou pleteninou. Místnost je osazena 4 180 klíny na všech čtyřech stěnách včetně stropu a podlahy o celkové váze cca 15 tun (<http://www.petrof.cz>).

Chvění vzorku bylo snímáno kondenzátorovým mikrofonem, který byl napojen na zvukovou kartu: Edirol FA 101-FireWire audio Interface, jež byla spojena s laptopem, na němž byl nainstalován program FFT Analyzer pro FFT analýzu, který zaznamenával, zpracovával a vyhodnocoval chvění desky, prováděl výpočet velikosti LDD a zobrazoval vlastní ohybové frekvence měřených vzorků. Jako iniciátor k vybuzení chvění byla používána gumová palička. Měřicí soustavu ilustruje Obr. 40. U každého vzorku bylo provedeno více úderů a vždy byl vybrán záznam, který nejlépe reprezentoval všechny relevantní předchozí pokusy, a jeho parametry byly ihned zaznamenány. FFT Analyzer bylo nutné vhodně nastavit, vybrat správné měřítko zobrazovaného frekvenčního spektra a nastavit velikost tolerance na okolní rušivé zvuky (Divos F. 2005). K problematice výpočtu dalších charakteristik bylo postupováno způsobem uvedeným níže (str. 47). Následně byla data statisticky zpracována v programech Gnumeric a Statistica.





Obr. 40 Měřicí soustava

- a) Mikrofon EMC 8000
- b) Měřený vzorek + xylofonová palička
- c) Externí zvuková karta
- d) Laptop



Obr. 41- Měřené vzorky

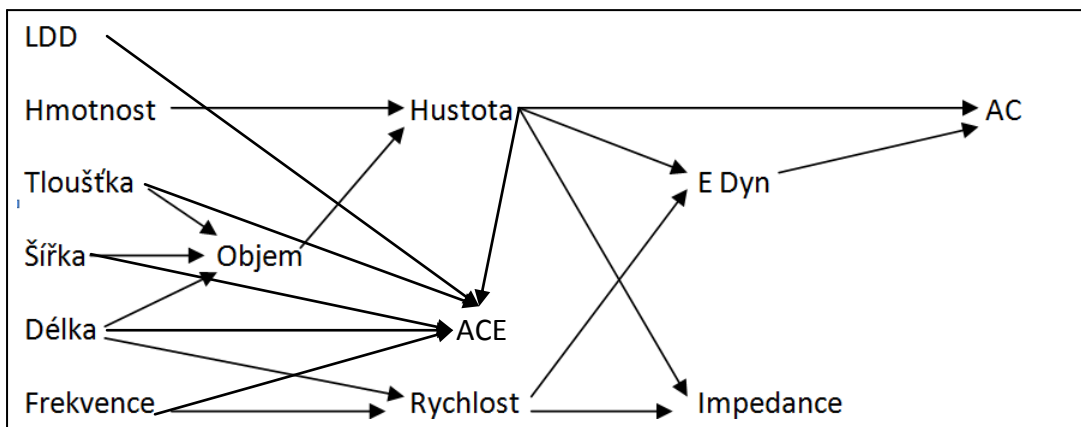
## 2) Měření vlastních frekvencí klavírového ozvučnicku

Jako součást diplomové práce bylo rovněž provedeno měření polotovaru ozvučnicku nástroje, tzn.: dřevěného rámu s nalepenou zažebrovanou rezonanční deskou osazenou kobyčkami. Měření bylo provedeno za pomoci stejného hardwarového vybavení jako v předchozím případě uvedeném výše, přičemž výsledky byly nahrány v programu Audacity a dále pak vyhodnoceny pomocí softwaru Matlab. Mikrofon byl při měření zavěšen nad nástrojem a vyvolání zvukového impulsu probíhalo pomocí úderů gumové palice do vyznačených míst na kobyлке (viz.: Obr. 42). Vzhledem k náročnosti transportu ozvučnicku nakonec měření oproti plánu neproběhlo v bezdozvukové komoře, ale ve výrobních prostorách mimo pracovní dobu z důvodu požadavku na minimální množství rušivého hluku.



*Obr. 42 - Měření vlastních frekvencí ozvučnicku nástroje*

### 3) Výpočet jednotlivých podélných charakteristik



Použité vzorce:

#### Objem:

$$V = a \cdot b \cdot c \quad 2-1$$

V-objem [m<sup>3</sup>]

a – výška [m]

b- šířka [m]

c- délka [m]

#### AC

$$AC = \rho^{-1} \sqrt{\frac{E_{dyn}}{\rho}} \quad 2-5$$

$\rho$ - hustota [kg/m<sup>3</sup>]

E dyn- modul pružnosti [Pa]

AC- akustická konstanta [m<sup>4</sup>/(kg.s)]

#### Impedance

$$Z = \rho * c \quad 2-7$$

c- rychlost [m/s]

$\rho$ - hustota [kg/m<sup>3</sup>]

Z- impedance [kg/(m<sup>2</sup>.s)]

#### Hustota:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad 2-2$$

$\rho$ - hustota [kg/m<sup>3</sup>]

m- hmotnost [kg]

#### ACE

$$ACE = \frac{\sqrt{\left[ \left( \frac{2f_n}{\gamma_n \pi} \right)^2 \frac{m \cdot L^3}{I} \right]}}{\rho^3} \cdot \frac{LDD}{\pi} \quad 2-6$$

#### Rychlost

$$v = 2Lf \quad 2-3$$

v- rychlost [m/s]

L- délka vzorku [m]

f- frekvence [Hz]

ACE - akustická konstanta

$f_n$  - frekvence ( 1.ohybová frekvence) [Hz]

$\gamma_n$  – pro  $f_n$  2,267

m – hustota [kg/m<sup>3</sup>]

L- délka vzorku [m]

I – pro obdélníkový průřez (bh<sup>3</sup>)/12

b- šířka [m]

h – tloušťka [m]

$\rho$  – hustota [kg/m<sup>3</sup>]

LDD – Logaritmický dekrement útlumu

#### E dyn

$$E_{dyn_{long}} = \rho v^2 \quad 2-4$$

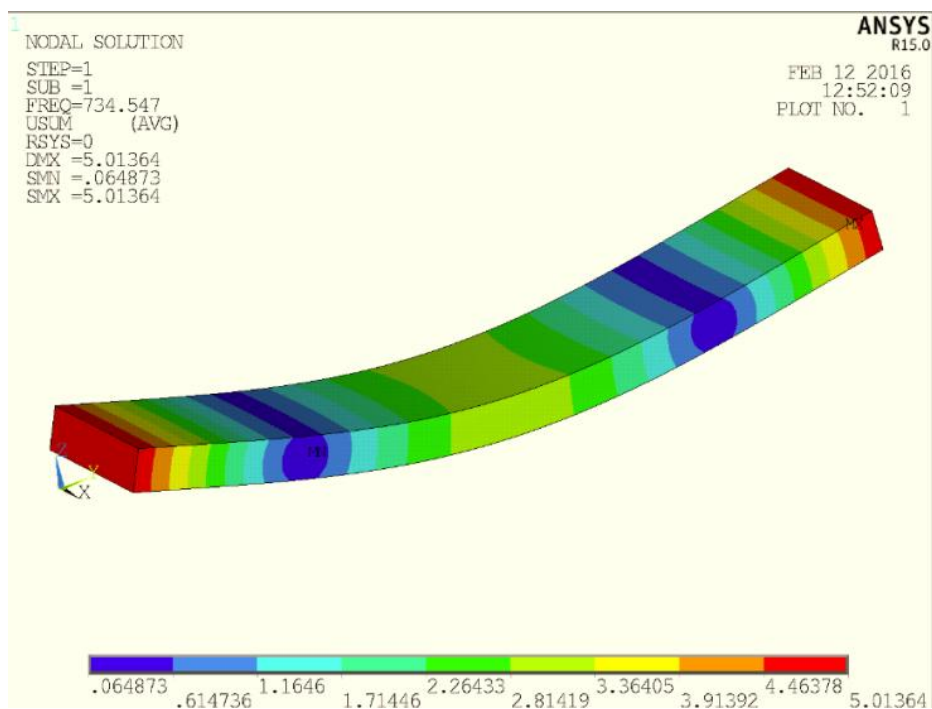
$\rho$ - hustota [kg/m<sup>3</sup>]

v- rychlost [m/s]

## 5) Výsledky a diskuze

### a) Konečně prvková analýza vzorku

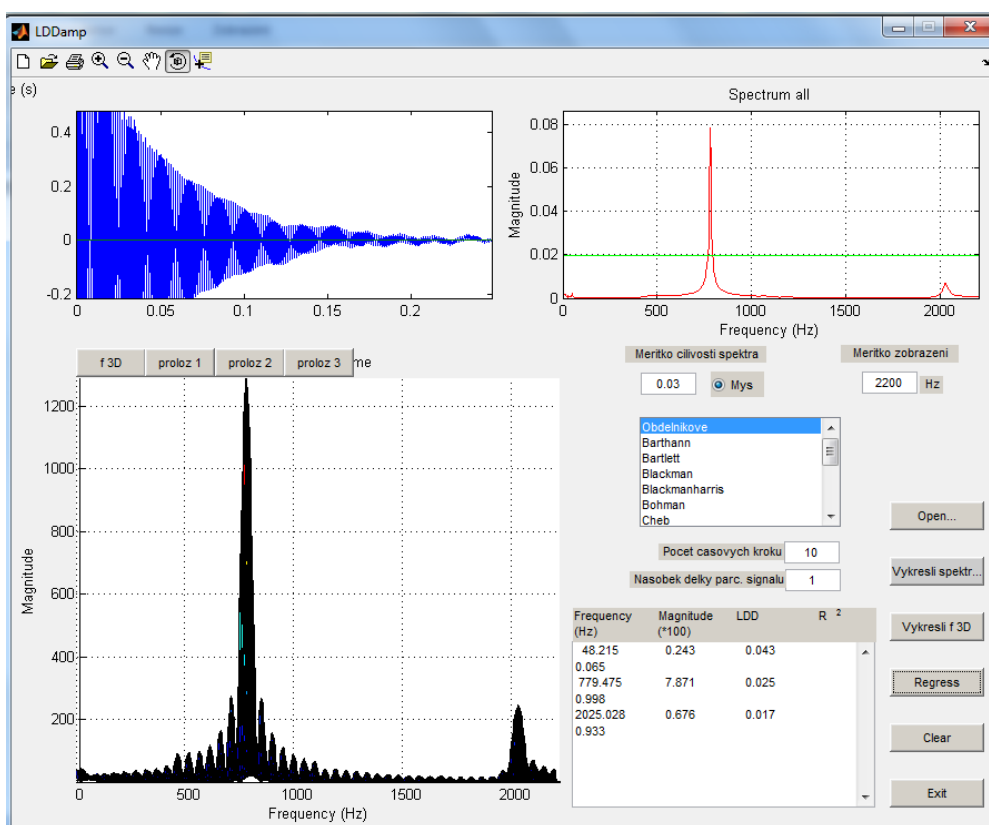
Jak je uvedeno výše, byl jako součást práce sestaven rovněž konečně-prvkový model vzorku v programu ANSYS, který pomáhá popsat chování měřených vzorků a naznačuje, které vlastní frekvence byly měřeny. Zároveň byl tento model použit pro rozmístění podpěr při měření. Vzhledem k tomu, že v souladu s výsledky simulace bylo zjištěno, že první měřená frekvence je frekvence ohybová, byly podpěry při měření umístěny do uzlových bodů tam, kde dochází k nejmenší (teoreticky nulové) deformaci vzorku. Tyto místa jsou na Obr. 43 vyznačena modře.



Obr. 43 – Deformace zkušebního vzorku

Prvních pět vypočítaných vlastních frekvencí je možné vidět v Tab. 3, o jaké jednotlivé vlastní tvary kmitání se jedná, je pak možné zjistit z přílohy této práce. Jak je zřejmé z Tab. 3 a z přílohy, dochází u jednotlivých módů vlnění ke značnému inharmonickému posunu. Tento je způsoben nízkou štíhlostí tělesa a jeho velmi malým vnitřním pnutím. Cílem této práce je však především porovnání nejvíce signifikantní 1. vlastní ohybové frekvence.

Porovnáme li teoreticky vypočtené hodnoty z konečně-prvkové simulace s ohybovým měřením vzorku, který se svými parametry (sklonem vláken 90° a hustotou 790kg/m<sup>3</sup>) nejvíce blíží modelu, shledáme, že simulace poměrně přesně popisuje chování vzorku (Obr. 44). Při vyvolání a naměření ohybového kmitání je možné z Obr. 44 odečíst naměřenou frekvenci o velikosti 779,5 HZ, přičemž vypočtená hodnota činila 735 Hz. Odchylka v tomto případě činí tedy asi 44 Hz, které v tomto případě představují rozdíl přibližně jednoho půltónu. V grafu je možné rovněž zaznamenat i další, i když méně významnou frekvenci kolem 2025 Hz, není však možné zjistit, kterému módu odpovídá, zda li se jedná o druhou frekvenci ohybovou Obr. 61, anebo o ohybovou frekvenci napříč Obr. 62.



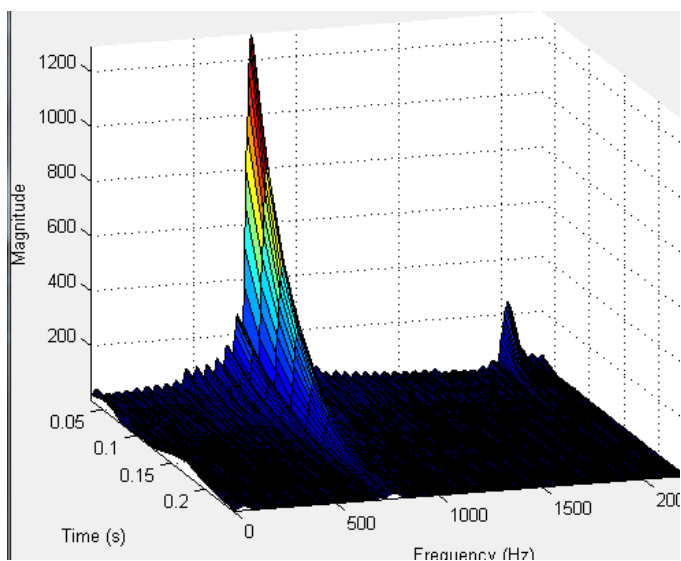
Obr. 44 – Naměřené frekvence u nejvíce reprezentativního vzorku

Tab. 3- Vlastní frekvence vzorku

#### Vlastní frekvence BK vzorku

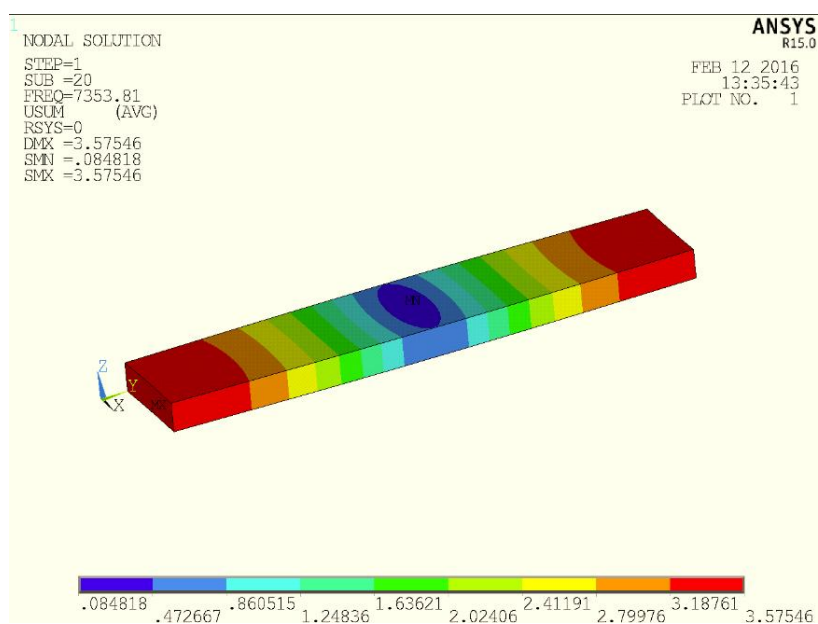
Pořadí	1.	2.	3.	4.	5.
Frekvence [Hz]	735	1253	1935	2152	2389

Rozložíme-li průběh frekvenční spektrum v čase, získáme lepší představu o průběhu tlumení kmitání. Z grafu Obr. 45 je zřejmé, že doba útlumu činí asi 0,2sec.

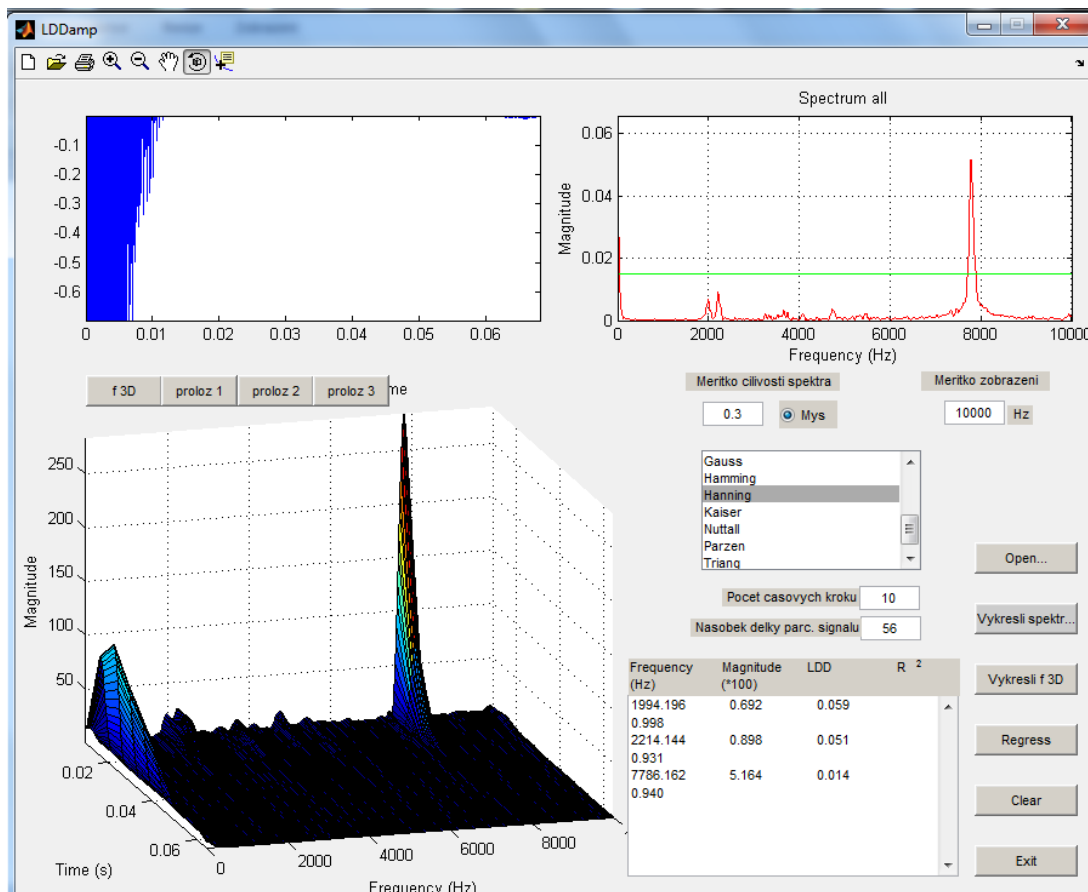


Obr. 45- Ohybový útlum v čase

Dalším účelem konečněprvkového modelu pak bylo pomoci zjistit rychlost podélného šíření zvuku, tzn. velikost frekvence podélného kmitání. Ze simulace vyplývá, že naměřená frekvence při měření podélného vlnění, by se měla pohybovat v oblasti kolem 7,5 KHz viz.: Obr. 46. Porovnáme-li tuto teoretickou hodnotu s hodnotou naměřenou (Obr. 47) shledáme, že odchylka činí cca 400 Hz, a rovněž v tomto případě odpovídá přibližně půltónu. Porovnáme-li z grafu (Obr. 47) dobu dozvuku, shledáme že tato je řádově menší. I když je nutné podotknout, že část záznamu musela být oříznuta, neboť program LDDamp běžící pod výpočetním softwarem Matlab se s prudkým nástupem hladiny zvuku po úderu nedovede vyrovnat a výpočet pak není možné uskutečnit.



Obr. 46 – Podélná frekvence chvění



Obr. 47- naměřená podélná frekvence chvění

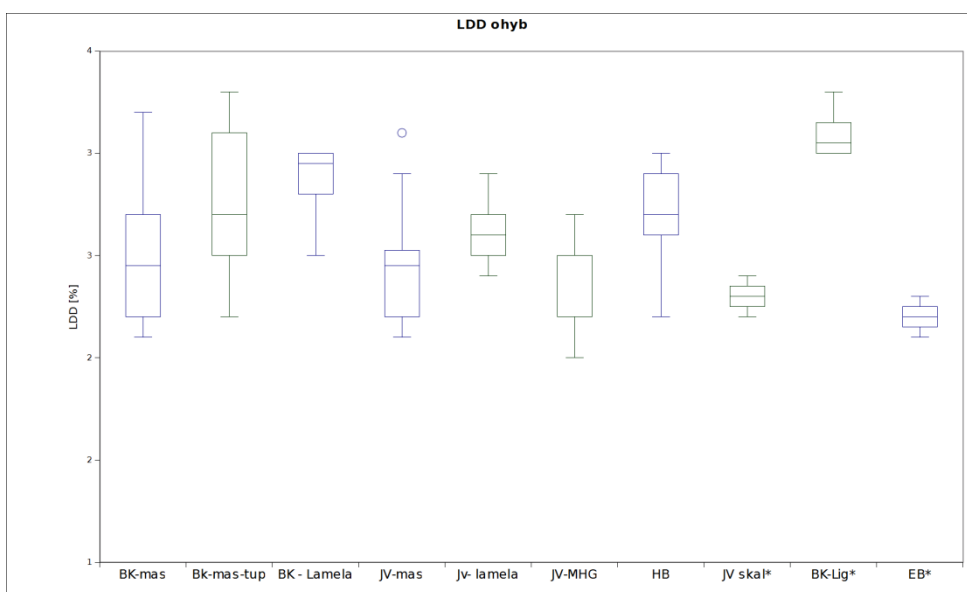
Jak je možné z výše uvedených skutečností zjistit, program Ansys dokáže s poměrně velkou přesností vypočítat vlastní frekvence vzorku, a může být při měření poměrně užitečnou pomůckou pro popsání frekvenčního spektra. Zjištěné odchylky ve výpočtu a měření, které budou pravděpodobně způsobeny jak nedokonalým modelem, který nebere v potaz uchycení vzorku ani odpor vzduchu, tak i anizotropií měřeného vzorku, lze považovat za relativně malé.



## b) Analýza vibroakustických vlastností vzorků kobylek

### Hodnocení z hlediska logaritmického dekrementu útlumu

Fyzikální interpretace logaritmického útlumu je charakterizována jako tlumící kapacita testovaného materiálu. Na velikost logaritmického dekrementu útlumu mají vliv následující parametry: vnitřní tření, vyzařování zvuku, a vliv uchycení materiálu (www.fakopp.com). Z výše zmíněné citace je zřejmá důležitost této veličiny při měření akustických parametrů vzorků. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny na Obr. 48 a v Tab. 4.



Obr. 48- Krabicový graf logaritmického dekrementu útlumu v ohybu

Tab. 4- ANOVA – LDD ohyb

Dávkovací soubor	LDD ohyb průměr	1	2	3	4
EB	2,20	****	****		
JV skal	2,30	****	****	****	
JV MHG	2,39	****			
BK mas	2,48	****			
JV mas	2,48	****			
JV lam	2,62	****	****	****	****
HB	2,68	****	****	****	****
BK mas tup lep	2,75		****	****	****
BK lam	2,88			****	****
BK Lig	3,10				****

HSD při nestejných N; proměnná LDD ohyb (Tabulka1) □  
Homogenní skupiny, alfa = ,05000 □  
Chyba: meziskup. PČ = ,06600, sv = 154,00

Tab. 5- ANOVA - LDD podél

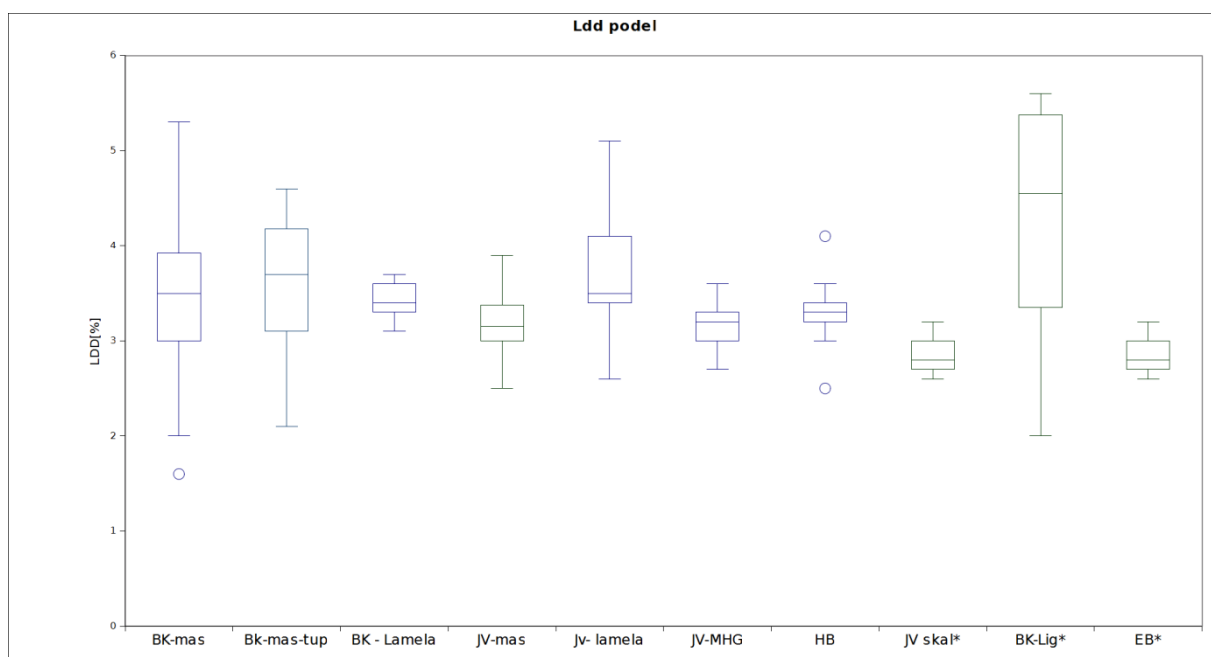
Dávkovací soubor	LDD podél průměr	1
JV skal	2,87	****
EB	2,87	****
JV MHG	3,16	****
JV mas	3,22	****
HB	3,30	****
BK lam	3,43	****
BK mas	3,47	****
BK mas tup	3,61	****
JV lam	3,74	****
BK lig	4,18	****

HSD při nestejných N; proměnná LDD-podél (Tabulka2)  
Homogenní skupiny, alfa = ,05000 □  
Chyba: meziskup. PČ = ,37239, sv = 142,00



Na výše uvedeném grafu, je možné vidět velikost útlumu jednotlivých materiálů. Je patrné, že největší m útlum má vzorek vyrobený z lamely BK a Lignamonu, nejmenší útlum se pak zobrazuje u masivního JV- skalního a vzorku ebenu. Nutno však podotknout, že tyto vzorky byly měřeny jen kusově a proto je porovnání těchto hodnot nerelevantní. Ve všech níže uvedených grafech jsou vzorky, které nedosahují dostatečně velkého množství pro statistiku označeny hvězdičkou a jsou umístěny na levé straně grafu. Porovnáme li pak ostatní, relevantní skupiny vzorků, je patrné, že se díky velkému rozptylu naměřených hodnot téměř překrývají. Ze zobrazených krabicových diagramů je pak patrné, že všechny hojněji zastoupené vzorky mají normální (Gaussovo rozdělení) a že tedy velmi pravděpodobně nedošlo k nějakému nestandardnímu ovlivňování vzorků při měření. Nahlédneme li do statistického vyhodnocení Tab. 4, ke kterému byla ve všech případech použita jednofaktorová ANOVA a zobrazení Tukeyova testu upraveného pro nestejně velikosti výběrů, dojdeme k závěru, že přestože se mnohé naměřené vzorky překrývají, lze mezi nimi najít rozdílné skupiny, přičemž do jedné skupiny s nižším LDD lze z významně zastoupených vzorků zařadit všechny javorové vzorky, dále pak vzorky z habru a z masivního buku.

U podélného měření je možné z grafu Obr. 49 zaregistrovat výrazně větší rozptyl dat. Tuto skutečnost však můžeme u dřeva sledovat u většiny podélných charakteristik podélnou vlastní frekvencí počínaje a pevností dřeva v tahu podél vláken konče. Naměřené rozptyly dat jsou pak natolik velké, že se navzájem překrývají, což potvrzuje i statistická analýza v Tab. 5.



Obr. 49 - Krabicový graf logaritmického dekrementu útlumu při podélném měření

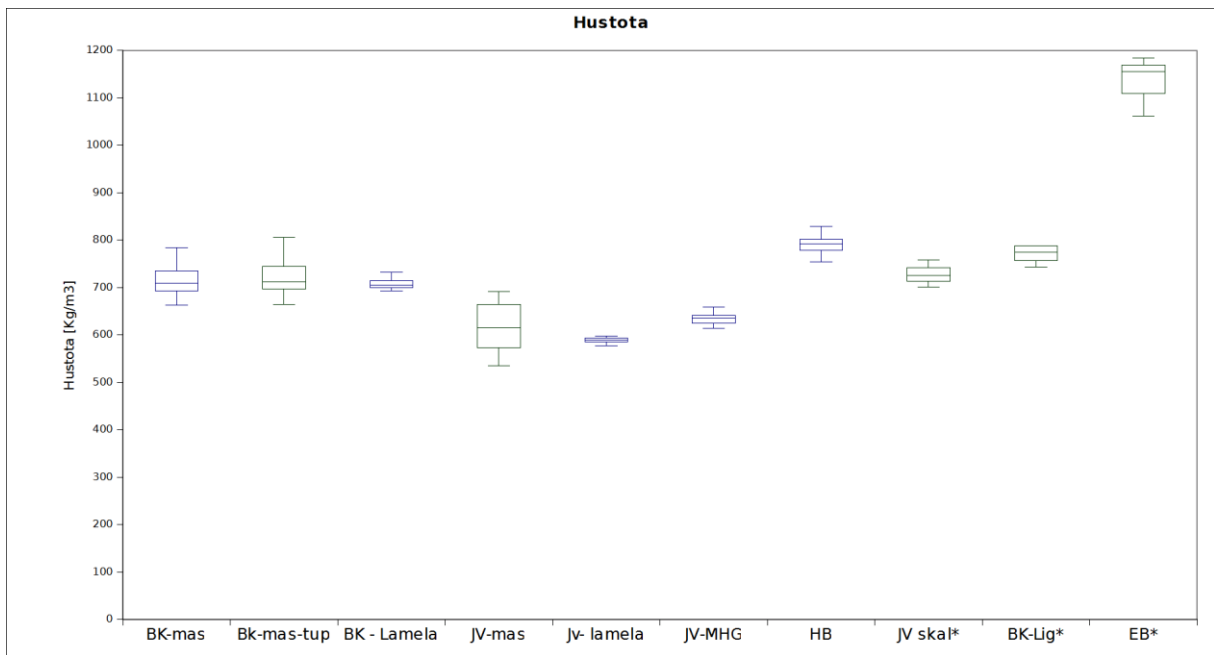
## Hodnocení vzorků podle hustoty

Hustota dřeva byla předmětem mnohých prací, protože jde o charakteristiku, která významně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva (Požgaj et. al. 1997). Jak je patrné mimo jiné i z předchozí citace, je hustota při hodnocení akustických vlastností materiálu poměrně důležitou veličinou. Nejen že vstupuje do mnoha vzorců pro výpočet dalších odvozených veličin, jako je: E-dyn, AC a ACE, ale i hustota sama o sobě nám dává přibližně tušit, jaké vlastnosti od dřeva můžeme očekávat, neboť s rostoucí hustotou rostou zpravidla i hodnoty sloužící k měření mechanických vlastností. Jak je známo, hustotu velmi výrazně ovlivňuje vlhkost dřeva. Proto bylo k výrobě vzorků použito materiálu, jež byl předtím vysušen na 9% abs. vlhkosti, přičemž tato skutečnost byla ověřena vstupní referenční gravimetrickou zkouškou. Poté byly vzorky dlouhodobě uloženy v prostředí o teplotě 22°C a vlhkosti 50%, takže lze předpokládat, že jejich vlhkost byla v rámci možností identická. Jak je patrné z grafu Obr. 50 a z Tab. 6, byl jako nejhustší z relevantně zastoupených materiálů habr, z materiálů, jež byly zastoupeny jen okrajově, pak eben. Dále z naměřených dat vyplývá, že hustota buku je výrazně větší nežli hustota horského javoru, přičemž toto zjištění je zcela v souladu s odbornou literaturou a je potvrzeno i statistickým testem v Tab. 6. Zároveň je patrné, že variabilita u lamelovaných vzorků je výrazně menší, přičemž je velmi blízká průměru masivních dřevin, z nichž je vyrobena. Tato skutečnost je dána tím, že lamela byla úmyslně poskládána z více odlišných částí toto materiálu, takže de facto došlo k fyzickému zprůměrování měřených hodnot, přičemž se tato skutečnost, snížení variability naměřených hodnot, projevila téměř ve všech dalších měřených veličinách.

Tab. 6- ANOVA- hustota vzorků

Dávkovací soubor	Hustota průměr	1	2	3	4	5
JV lam	588,86			****		
JV mas	617,00			****	****	
JV MHG	634,72				****	
BK lam	708,68	****				
BK mas	710,95	****				
BK mas tup	717,04	****				
JV skal	727,96	****	****			
BK lig	769,93	****	****			
HB	789,04		****			
EB	1133,69					****

HSD při nestejných N; proměnná Hustota (Tabulka13) □  
Homogenní skupiny, alfa = ,05000 □  
Chyba: meziskup. PČ = 1006,6, sv = 152,00



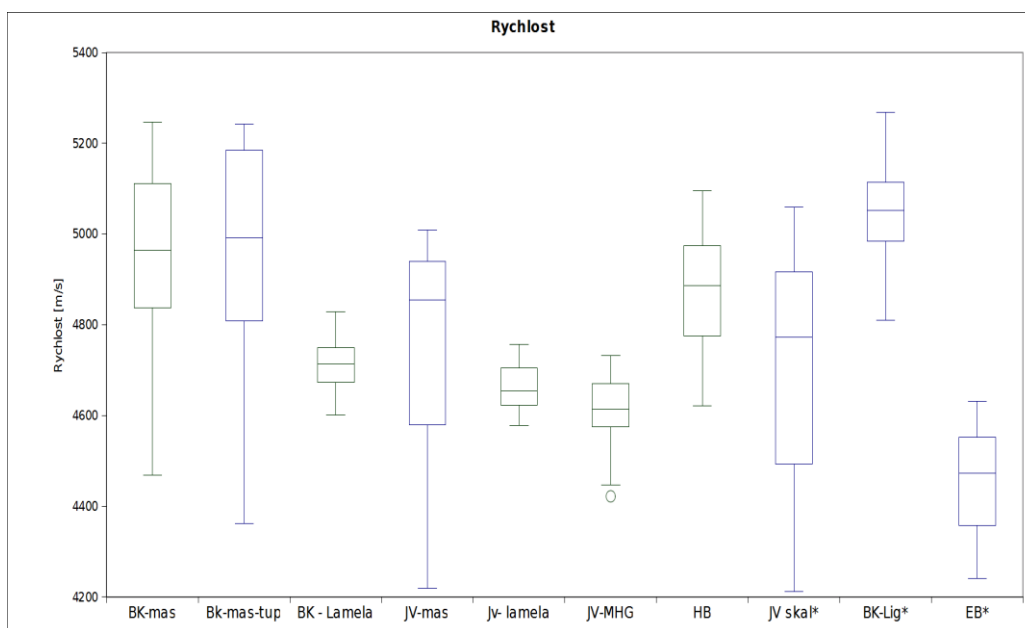
Obr. 50 - Hustota jednotlivých vzorků

Je otázkou, jak hustotu materiálu vhodně interpretovat pro použití při konstrukci kobylek. Josef Prach uvádí ve své knize stavba klavírů a pianin a její problematika následující: „Vhodný profil kobylky byl hledán pokusně. Přitom se zjistilo, že kobylka s malou styčnou plochou s ozvučnou deskou a s malou měrnou hmotností má příznivý vliv na velikost tónu. Avšak tón je poněkud krátký. Naproti tomu kobylka s větší měrnou hmotností a s větší dosedací plochou podporuje více zpěvnost tónu, avšak zmenšuje možnost většího tónového stupňování.“ (Prach 1987). Pokud bychom volili tento citát jako výchozí pro konstrukci piána, jevil by se např. javor jako ideální materiál pro spíše „ostřejší“ nástroje, naopak např.: lamelovaná kobylka s použitím tvrdších dřevin by byla vhodná pro nástroje romantické. Z textu je však patrné, že nezáleží pouze na hustotě ale i na geometrii kobylky, přičemž je nutné konstatovat že kobylka sama o sobě charakter nástroje nedělá, nýbrž ten je tvořen mnoha dalšími proměnnými jako je tuhost rez. desky, její geometrie, velikost menzur, strunového přetlaku atd. ...

Zároveň je nutné konstatovat, že rozdíl naměřených hustot u relevantních vzorků, přesto, že je statisticky významný není natolik velký, aby samotná volba materiálu podle hustoty mohla nějak radikálně ovlivnit charakter nástroje. Přičemž je důležité brát zřetel i na další veličiny, které jsou uvedeny níže.

## Hodnocení vzorků podle rychlosti vedení zvuku

Přesto, že hodnocení rychlosti vedení zvuku materiálem nemá samo o sobě téměř žádný význam, je rychlost vedení zvuku důležitým vstupem pro výpočet dynamického modulu pružnosti, který je naopak při hodnocení tuhosti kobylek poměrně značně důležitý (viz.: níže). Vzhledem k tomu, že sama rychlost vedení se vypočítá mimo jiné z vlastní podélné frekvence (vzorec 2-3 na str. 51), mají naměřené hodnoty poměrně velkou variabilitu (dřevo vykazuje větší variabilitu v podélném směru ve většině zjišťovaných hodnot). Tuto skutečnost je možné si rovněž ověřit na Obr. 51.



Obr. 51- Rychlost vedení zvuku

Vzhledem k velké variabilitě je možné sledovat, že při analýze rozptylu se téměř většina naměřených hodnot překrývá, o čemž svědčí i Tab. 7. Je zajímavé, že na rozdíl od většiny měřených hodnot nekoreluje rychlost vedení zvuku s hustotou. Je to dáno tím, že rychlost vedení zvuku záleží především na mikroskopické stavbě materiálu a nikoliv na již zmíněné hustotě.

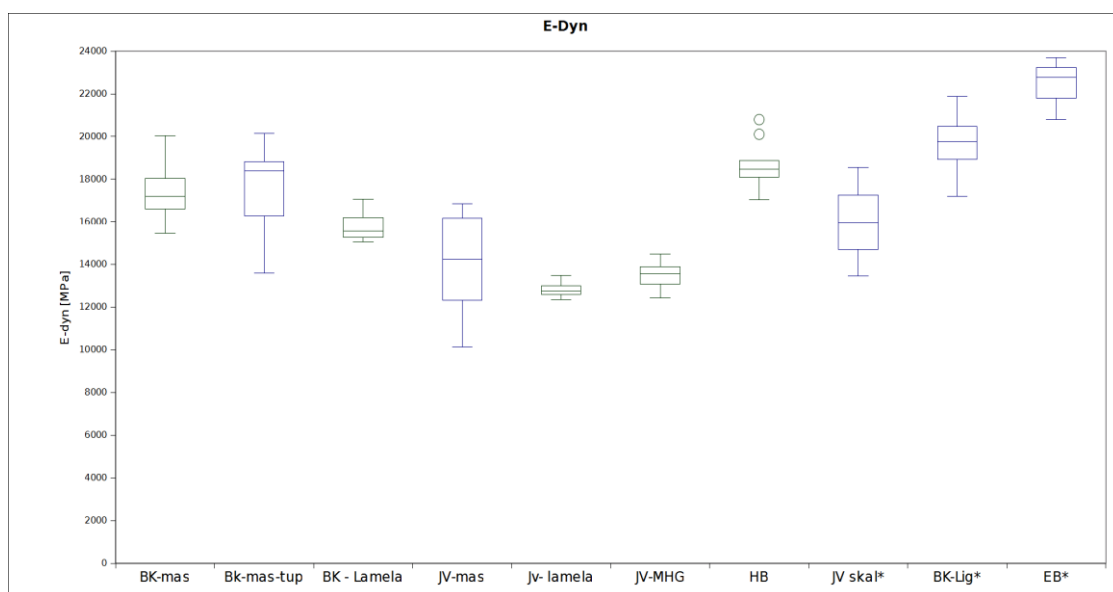
Tab. 7- ANOVA- rychlost vedení zvuku

Dávkovací soubor	Rychlost průměr	1	2	3	4
EB	4448,800	****	****		
JV MHG	4610,060	****			
JV lam	4663,467	****	****	****	
* JV skal	4681,600	****	****	****	****
BK lam	4709,833	****	****	****	
JV mas	4767,570	****	****	****	
HB	4860,480		****	****	****
BK mas tup lep	4948,926				****
BK mas	4955,870				****
BK Lig	5045,850			****	

HSD při nestejných N: proměnná Rychlost (Tabulka1) □  
 Homogenní skupiny, alfa = ,05000 □  
 Chyba: meziskup. PČ = 30483., sv = 152,00

## Hodnocení vzorků z hlediska dynamického modulu pružnosti

Dynamický modul pružnosti je velmi důležitou hodnotou pro měření akustických vlastností dřeva, neboť chceme-li materiál hodnotit vícero způsoby a ne pouze pomocí LDD, který je přímým výstupem z frekvenční analýzy pomocí FFT Analyzeru, je nutné tyto hodnoty vypočítat teoreticky přičemž E-dyn je jedním z důležitých vstupů pro výpočet. Dynamický modul pružnosti vypočteme pomocí vzorce 2-4 na str. 51. Tato teoreticky určená hodnota nám udává velikost odporu proti deformaci vzorku. Otázkou zůstává, zda-li je u nástroje žádoucí nižší či větší tuhost kobylyky. Z konstrukcí nástrojů většiny výrobců je zřejmé, že v basové části se příliš tuhá kobylyka pravděpodobně projevuje negativně, neboť ji v tomto místě výrobci velmi často odlehčují pomocí různých otvorů. Naopak v diskantu se kobylyka obvykle nechává celistvá, aby dodávala rezonanční desce již výše zmíněnou tuhost a přenášela chvění zvuku. Z grafu Obr. 52. je zřejmé, že mezi vzorky s nejvyšší tuhostí spadá eben a dále pak kobylyka tvořená lamelou z buku a lignamonu. Nutno však podotknout, že tyto vzorky mají zároveň největší hustotu (Tab. 6), přičemž jak již bylo zmíněno, vyšší hustota znamená zpravidla rovněž vyšší naměřené hodnoty mechanických vlastností. Ze vzorků, které byly zastoupeny ve větším množství, má pak nejvyšší dynamický modul pružnosti habr, který spadá do skupiny našich dřevin s nejvyšší hustotou. Vzhledem k jeho výjimečným vlastnostem jej můžeme občas vídat na kobylykových náklížcích, a to především v diskantové části kobylyky.



Obr. 52 – Ohybový dynamický modul pružnosti

Nahlédneme-li do statistiky v Tab. 8, shledáme, že nejmenší tuhost byla naměřena u javorových vzorků a jeho variací, střední pak u buku, přičemž toto rozdělení poměrně do značné míry kopíruje rozložení hustoty v Tab. 6, i když u dynamického modulu pružnosti je zjištěná variabilita dat výrazně vyšší. Nutno však podotknout, že vysoký modul pružnosti není zřejmě tím nejdůležitějším kritériem při výběru materiálu pro kobylinky, neboť většina špičkových výrobců u svých nástrojů nejvyšší kategorie používá zpravidla javor (ať již masivní či lamelovaný) a to napříč celou kobyolkou, včetně její diskantové části, přičemž náklížky z jiných materiálů se zde vyskytují téměř ojediněle. Důležité však je uvědomit si, že v diskantové části jsou kladeny na kobyliku i další vysoké nároky, a to především v pevnosti v tahu napříč vláken, přičemž tato není určována pouze hustotou, ale výrazně ji ovlivňuje také počet, vrstevnatost a rozmístění dřevných paprsků, které mají na tuto mechanickou veličinu dosti zásadní vliv.

Tab. 8 - ANOVA- E dyn

Dávkovací soubor	E dyn průměr	1	2	3	4	5
JV lam	12807,45	****				
JV MHG	13491,40	****				
JV mas	14099,56	****				
BK lam	15726,19				****	
JV skal	15991,56	****	****			****
BK mas	17369,31		****	****		
BK mas tup lep	17603,97		****	****		
HB	18648,45		****	****		
BK lig	19648,18			****		****
EB	22417,54					****

HSD při nestejných N; proměnná E dyn (Tabulka11) □  
 Homogenní skupiny, alfa = ,05000 □  
 Chyba: meziskup. PČ = 1744E3, sv = 151,00

## Hodnocení vzorků z hlediska velikosti akustické konstanty a akustického vlnového odporu

Jak je známo, energie odevzdaná ozvučnici strunou se ztrácí na okrajích kde je upnutá, vnitřním třením ozvučnice a také ve formě zvukové části energie, která se vyzařuje do okolí. Aby se odevzdalo co nejvíce energie do vzduchu, musí být ztráty způsobené vnitřním třením co nejmenší a naopak koeficient vyzařování co největší (Požgaj et. al. 1997). Jak je patrné z předchozí citace, ukazuje nám akustická konstanta „množství“ vyzářeného do vzduchu. Přestože klavírová kobylka nemá primárně za úkol sama vyzařovat zvuk, nýbrž jej pouze převést na rezonanční desku, je hodnocení z hlediska akustické konstanty užitečné, neboť nám alespoň rámcově ukazuje schopnost materiálu zvuk vést a vyzářit, a tudíž pomáhá při vytipování vhodného materiálu rovněž pro další konstrukční části nástroje i mimo rezonanční desku. Poměrně zajímavé je pak porovnání akustické konstanty s akustickým vlnovým odporem (Obr. 54 vs. Obr. 53), který naopak udává velikost vnitřního tření v materiálu a tudíž podíl „ztraceného“ zvuku, který se promění v teplo.

Tab. 9- ANOVA – akustická konstanta

Dávkovací soubor	AC- průměr	1	2	3	4	5
EB	3,94					****
HB	6,23			****		
JV skal	6,45	****	****	****		
BK lig	6,55	****	****	****		
BK lam	6,65	****		****		
BK mas tup lep	7,00	****	****			
BK mas	7,00	****	****			
JV MHG	7,27		****			
JV mas	7,78				****	
JV lam	7,92				****	

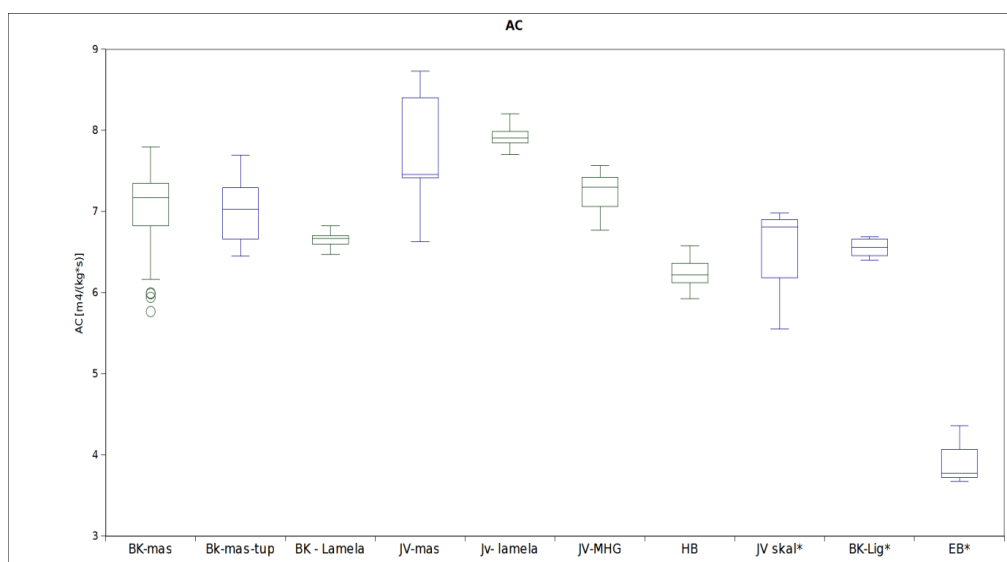
HSD při nestejných N; proměnná AC (Tabulka7) □  
Homogenní skupiny, alfa = ,05000 □  
Chyba: meziskup. PČ = ,15339, sv = 149,00

Tab. 10 - ANOVA akustický vlnový odpor Z

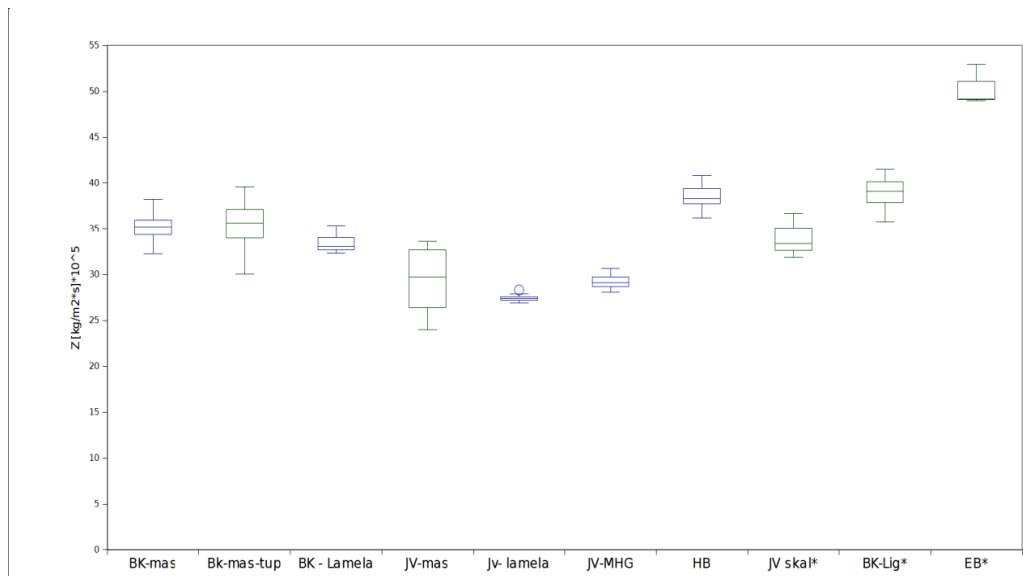
Dávkovací soubor	Z průměr	1	2	3	4	5	6	7	8	9
JV lam	27,46				****					
JV MHG	29,26				****	****				
JV mas	29,46					****	****			
BK lam	33,38	****								
JV skal	34,02	****	****				****	****		
Bk mas	35,07	****	****	****						
BK mas tup lep	35,48		****	****						
HB	38,34							****	****	
BK lig	38,87			****					****	
EB	50,38									****

HSD při nestejných N; proměnná Z (Tabulka9) □  
Homogenní skupiny, alfa = ,05000 □  
Chyba: meziskup. PČ = 3,3553, sv = 151,00

Z výše uvedeného statistického porovnání je zřejmé, že v pořadí naměřených hodnot jsou jednotlivé materiály z hlediska AC a Z téměř protikladné. Je to dáno do jisté míry tím, že se jedná o teoretické veličiny stanovené výpočtem, do jisté míry je to pak dáno skutečností, že materiál, který dobře vyzařuje zvuk, jej jen z malé části mění v teplo. Vzhledem k tomu, že se jedná o hodnoty, které jsou vypočtené, a do vzorce jejich výpočtu spadá i rychlost vedení zvuku, jež vychází z první vlastní podélné frekvence vzorku, je variabilita naměřených hodnot poměrně velká, o čemž svědčí nejen statistická analýza s poměrně bohatým vzorcem překrytí, ale i krabicové grafy na Obr. 54, Obr. 53. Dovolíme-li si simplifikovat naměřené výsledky, shledáme, že do skupiny vzorků s nejlepšími akustickými vlastnostmi se zařadily vzorky z horského javoru a jeho modifikací, bukové vzorky patří k průměrným, a naopak jako neideální se z hlediska akustických vlastností pro ozvučnický jeví vzorky s vysokou, anebo extrémně vysokou hustotou jako je HB, lignamon, eben apod.



Obr. 54- Akustická konstanta



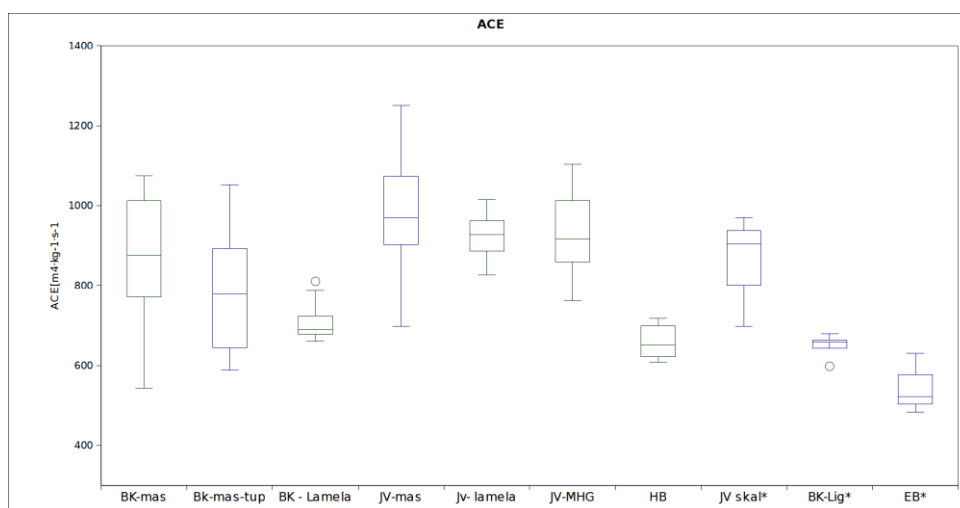
Obr. 53- Akustický vlnový odpor Z



## Hodnocení vzorků z hlediska přeměněné akustické účinnosti

Jak je možné zjistit výše, byly vzorky hodnoceny jak z hlediska velikosti logaritmického dekrementu útlumu, tak z hlediska akustické konstanty a akustického vlnového odporu. Vzhledem k tomu, že LDD je přímým výstupem z FFT analýzy a akustická konstanta je pak teoretická hodnota vypočtená na základě velikosti podélné frekvence, rozměrů vzorku a hustoty, jeví se jako vhodné tyto hodnoty agregovat a získat tak co možná nejobektivnější způsob hodnocení vzorků. Jednou z těchto sdružených konstant je pak právě ACE, neboli přeměněná akustická účinnost, která výše popsané jednotící prvky ve svém vzorci obsahuje.

Podíváme-li se na Obr. 55, je vidět, že naměřené hodnoty mají poměrně velký rozptyl. Nicméně je patrné, že mezi měřenými vzorky byly nalezeny poměrně značné rozdíly, což potvrzuje i statistická analýza v Tab. 11.



Obr. 55- Přeměněná akustická účinnost

Jak je z analýzy zřejmé, dosahují největších hodnot ACE javorové vzorky, tzn.: vzorky z masivního horského javoru, z javorové lamely a z lamely vyrobené z javoru a mahagonu. Přestože se tyto vzorky se z hlediska zjištěného LDD jeví jen jako průměrné, z hlediska všech naměřených a vypočítaných hodnot se jeví při použití ACE jako vzorky nejvhodnější. Rovněž malá hustota a nižší tuhost předurčuje tento materiál jako pravděpodobně nejvhodnější možný k užití při výrobě hudebních nástrojů. Jeho jedinou nevýhodou je pak vyšší cena, která neumožňuje užití javoru a jeho kombinací v nástrojích všech cenových kategorií, ale vyplatí se pouze výběrových značek s vyšší cenou, kde je, jak potvrzuje i tato práce, použití dražších vstupů odůvodnitelné nejen marketingově, ale i z hlediska teoretických předpokladů pro maximální kvalitu daného výrobku.

Z Tab. 11 je pak patrné, že bukové vzorky jsou u hudebních nástrojů rovněž poměrně dobře uplatnitelné, i když zde, stejně jako u vzorků javorových, dochází k negativnímu vlivu při použití lepidel. Výhodou lamelových vzorků však, jak již bylo zmíněno, je výrazné snížení rozptylu měřených hodnot, přičemž toto snížení a vyrovnaní kvalit materiálu do jisté míry odůvodňuje celkový pokles měřených hodnot, a proto se jeví krom technologických výhod při výrobě jako vhodné pro použití u výroby klavírů a je rovněž poměrně hojně využíváno. Nejhorší akustické vlastnosti pak byly zjištěny u těžkých dřevin, jako je např. habr. Jeho využití se proto mimo odůvodněné případy v diskantu jeví jako nevhodné, stejně tak ebenové vzorky i přes jejich vysokou tvrdost nelze pro využití při stavbě nástrojů z teoretického hlediska nijak zvlášť doporučit.

Tab. 11- ANOVA- přeměnná akustická účinnost

Dávkovací soubor	ACE průměr	1	2	3	4
EB	545,5015	****			
BK lig	648,2314	****	****		****
HB	659,6230	****	****		
BK lam	704,5870	****	****		
BK mas tup	778,3017	****	****		****
JV skal	857,2406		****	****	****
BK mas	880,2585			****	****
JV lam	926,0511			****	
JV MHG	933,0501			****	
JV mas	983,8584			****	

HSD při nestejných N; proměnná ACE (Tabulka15) □  
 Homogenní skupiny, alfa = ,05000 □  
 Chyba: meziskup. PČ = 13378,, sv = 149,00

## Korelační analýza měřených vzorků

U nejhojněji zastoupených vzorků (BK) byla provedena korelační analýza - tzn. byl sledován vliv jednotlivých zjištěných hodnot. Korelační analýzu je možné vidět v Tab. 12. Interpretace této analýzy je poněkud obtížná. Je nutné si uvědomit, že korelace neimplikuje kauzalitu a proto, není možné zcela jasně interpretovat některé naměřené výsledky bez znalosti hlubších souvislostí. A dále je nutné čtenáře upozornit, že některé silné korelace u odvozených veličin jsou způsobeny tím, že se jedná o porovnávání veličin, jež jsou spolu spjaty výpočtem. Proto je vhodné při hlubším studiu

Tab. 12, využít vzorců ze stránky 51 a být tak informován o vztazích některých veličin.

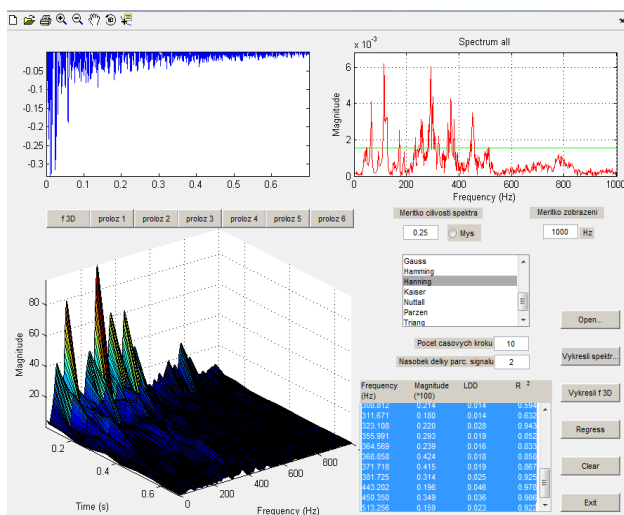
Přesto, že byl zjištěn záporný korelační vztah mezi úhlem vláken, velikostí ohybové i podélné frekvence a velikostí akustické konstanty, nelze výsledek interpretovat tak, že je tato skutečnost způsobena právě úhlem vláken. Při pozorném pohledu nemůže čtenáři uniknout skutečnost, že úhel vláken poměrně silně koreluje s hustotou. Tudiž je pravděpodobné, že vzorky s větším úhlem vláken (radiální vzorky) měly v našem výběru bohužel zpravidla i větší hustotu tzn., že velikost frekvence byla ovlivněna rovněž hustotou. Silné korelační vazby mezi hustotou a AC, ACE a Z jsou pak způsobeny tím, že hustota přímo vstupuje do těchto veličin při výpočtu, a jedná se tak o veličiny odvozené. Další silná korelace byla nalezena mezi LDD a hustotou, v tomto případě se lze domnívat, že velikost LDD je hustotou značně ovlivněna. V korelační analýze byl rovněž nalezen silný vztah mezi příčnou a podélnou frekvencí. Tato zjištěná skutečnost plně odpovídá praxi, neboť je známo, že dynamický ohybový modul pružnosti lze vypočítat jak z podélné, tak i vhodnými koeficienty přepočítané ohybové frekvence, přičemž výsledek se liší zpravidla jen nepatrně. Zajímavou nepřímou úměru pak lze nalézt rovněž mezi LDD a ohybovou frekvencí, kdy je patrné, že vzorky s vyšší naměřenou ohybovou frekvencí měly zpravidla menší LDD. Za zmínku rovněž stojí poměrně silná záporná korelace mezi LDD a AC ta nám říká, že vzorky s malým LDD mají zpravidla vyšší koeficient vyzářeného zvuku.

Tab. 12- korelace jednotlivých hodnot u BK

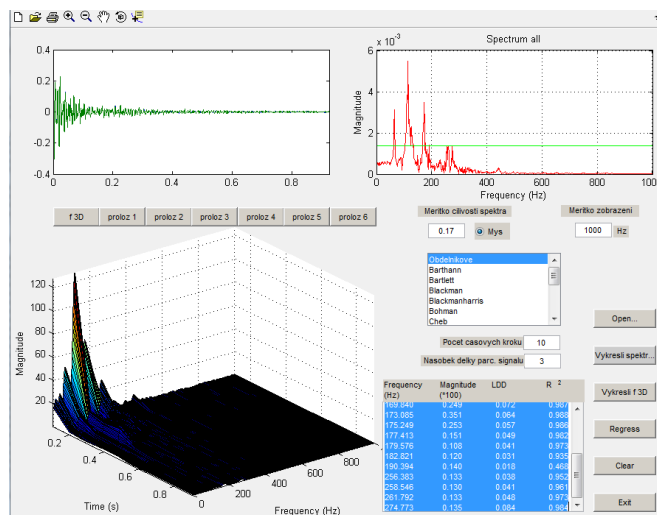
Korelace	úhel vláken [°]	Hustota [Kg/m <sup>3</sup> ]	Frekvence ohyb [Hz]	Frekvence podel [Hz]	rychlost [m/s]	LDD% ohyb	LDD% podel	E-dyn [Mpa]	AC	Z*E-5	ACE
úhel vláken [°]	1,00										
Hustota [Kg/m <sup>3</sup> ]	0,39	1,00									
Frekvence ohyb [Hz]	-0,50	-0,18	1,00								
Frekvence podel [Hz]	-0,50	-0,20	0,94	1,00							
rychlost [m/s]	-0,50	-0,20	0,94	1,00	1,00						
LDD% ohyb	0,14	0,41	-0,49	-0,41	-0,41	1,00					
LDD% podel	0,11	0,13	-0,31	-0,26	-0,26	0,13	1,00				
E-dyn [Mpa]	-0,28	0,32	0,82	0,86	0,86	-0,17	-0,19	1,00			
AC	-0,56	-0,80	0,69	0,75	0,75	-0,53	-0,24	0,32	1,00		
Z*E-5	-0,07	0,66	0,57	0,60	0,60	0,03	-0,10	0,92	-0,08	1,00	
ACE	-0,33	-0,57	0,64	0,57	0,57	-0,95	-0,19	0,24	0,74	-0,04	1,00

### c) Vibroakustická analýza klavírového ozvučnicku

Podíváme li se na výsledky měření v diskantové části nástroje na Obr. 57 (bod. 1 viz metodika), shledáme, že interpretace naměřených výsledků je velmi složitá, ne-li neproveditelná. Bylo naměřeno skutečně velké množství vlastních frekvencí desky. Tato skutečnost odpovídá tomu, že na rezonanční desku jsou kladeny právě ty požadavky, aby byla schopná maximálně rezonovat při všech žádoucích frekvencích a ty věrně zesílit a vyzářit do okolí, proto „naladění desky“ musí tomuto požadavku maximálně odpovídat. Při konstrukci nástroje je žádoucí, aby deska v diskantu byla laděna na vyšší frekvenci nežli v basové poloze, tomuto požadavku se snaží výrobci vyhovět nejen tvarováním, ale i klenutím a zeštíhlováním desky v basové části.



Obr. 57- Měření vlastních frekvencí v diskantové části nástroje



Obr. 56 Měření vlastních frekvencí v basové části nástroje

Hodnoty naměřené v basové části nástroje je možné vidět na Obr. 56. Učiníme-li porovnání těchto dvou měření na krajních místech rozsahu rezonanční desky, shledáme, že v basové části má rezonanční deska již výrazně méně vyšších vlastních frekvencí a je uzpůsobena právě vyzářování hlubších basových tónů, přičemž první vlastní frekvence rezonanční desky se nachází v oblasti kolem 65Hz. Celkový charakter rez. desky je uzpůsoben tak, aby v diskantové části bylo spektrum co nejbohatší, přičemž postupem do basu vyšších harmonických tónů ubývá a deska je laděna do basové polohy. O této skutečnosti je pak možné se přesvědčit v příloze této práce kde je vyobrazeno všech sedm měření.

## 6) Závěr:

Literární přehled pojednává o konstrukci piana se zvláštním zřetelem na ozvučnou část nástroje. Práce seznamuje čtenáře s názvoslovím a konstrukcí moderních pianových kobytek. Je zde uveden přehled technologií jednotlivých vybraných výrobců a rovněž popis vývoje a výzkumu v oblasti klavírových ozvučníků u nás i v zahraničí.

V experimentální části práce pak byl vyroben konečněprvkový model měřených vzorků v programu ANSYS, který pomohl při hledání jejich vlastních frekvencí. Nejpodstatnější částí tohoto modelu pak byla tvorba materiálového modelu sledovaných materiálů a jejich funkčnost v dynamické úloze. Tento model je rovněž možné dále využít při testování nových potenciálních materiálů pro výrobu kobytek a to nejen samostatně při teoretickém modelování, ale především při propojení s experimentálním měřením identickým způsobem, jaký byl použit i v této práci.

Bylo vyrobeno deset vybraných typů vzorků kobytek v celkovém množství cca 160 ks a tyto vzorky byly následně měřeny v bezdozvukové komoře sw. Matlab a FFT Analyzer. Vzorky byly statisticky hodnoceny v sw. Statistica a Gnumeric a to z hlediska LDD, hustoty, rychlosti vedení zvuku, akustické konstanty akustického vlnového odporu, dynamického modulu pružnosti a přeměněné akustické účinnosti.

Mezi vzorky byly nalezeny statisticky významné rozdíly, přičemž v celkovém hodnocení se jako nejvhodnější pro konstrukci nástroje jeví kobytky vyrobené z horského javoru, javorové lamely a z lamely vyrobené z javoru v kombinaci s mahagonem. Bukové vzorky byly hodnoceny jako průměrné. Nejhorší akustické vlastnosti pro výrobu hudebních nástrojů pak byly zjištěny u tvrdých dřevin jako je habr nebo eben, a na základě výsledků této práce nelze tyto vzorky doporučit pro výrobu jejich ozvučných částí. U vzorků vyrobených z lamely byl shledán výrazně menší rozptyl všech měřených hodnot, přičemž při srovnání zjištěných průměrů lamelových vzorků s masivními ze stejného materiálu bylo shledáno, že lamelové vzorky mají zpravidla nepatrně horší akustické vlastnosti, i když tento rozdíl je tak malý, že je při analýze rozptylu statisticky neprokazatelný. Praktickým přínosem této práce by pak mohla být možnost, při použití stávající metodiky, poměrně rychle poskytnout výrobcům nástrojů srovnání dalších potenciálních materiálů pro výrobu kobytek z hlediska akustických vlastností s materiály již měřenými.

Součástí práce byla rovněž frekvenční analýza rezonanční desky. Při této analýze bylo naměřeno bohaté spektrum vlastních frekvencí, přičemž základní ohybová frekvence byla nalezena v oblasti kolem 65Hz. Bylo zjištěno, že směrem do basu spektrum vlastních frekvencí klesá a přesouvá se do nižších kmitočtů. Toto měření a „ladění“ rezonanční desky je v praxi poměrně běžně používáno např. při výrobě houslí, kdy je na rezonanční desku nasypána krupice a deska je pak rozechvívána tónovým generátorem, přičemž je sledována změna pozice krupice a jí nabyté tvary, při docílení vlastní rezonance desky. Poněkud jednodušší postup pak využívají někteří výrobci klavírů a pianin, kdy je zaklížená deska do dřevěného rámu rovněž posypána krupicí a vlastní kmitání je pak vyvoláváno údery gumovou palicí.

V příloze této diplomové práce je pak zobrazeno prvních pět vlastních frekvencí vzorků z konečněprvkové simulace. Přehled frekvenčního spektra naměřeného při analýze ozvučnicku klavíru a vybrané patenty v oblasti klavírových kobylek.

## Summary:

The first part of diploma thesis is about piano construction, with particular emphasis on acoustic part of the instrument. A reader meets with terminology and construction of modern piano bridges. In the work there is mentioned a summary of particular listed producers technologies and description of development and research in the field of piano production in our republic as well as abroad.

In experimental part of the work was made final element model of measuring samples in ANSYS software which helped finding of their own frequencies. Ten chosen types of bridges samples were produced in total number of 160 pcs. And these samples were later measured in anechoic chamber. The samples were statistically evaluated in sw. Statistica and Gnumeric in the view of LDD, density, speed of sound, acoustic constant and acoustic impedance, Young's modul and acoustic conversion efficiency.

Statistically eminent differences were found among the samples. However, in the final summary piano bridges made of maple, laminated maple, and laminated maple and mahogany are the most convenient for instrument construction. Beech samples were evaluated as average. The worst acoustic properties for musical instrument production were found out some hardwoods like hornbeam or ebony so on these bases these samples would never be recommended for acoustic parts of musical instrument production. In lamination samples smaller dispersion was found out.

Another part of the work was about soundboard frequency analysis. In this analysis a very rich frequency spectrum was measured. The first own frequency was found out in the sphere around 65 Hz. It was determined that in the direction to bass the spectrum of own frequencies decreases and moves lower.

## Zdroje:

### Literatura:

- BRAUCHLI, B., 1998. The Clavichord, Cambridge, Cambridge University Press, 275 s., ISBN: 0521630673
- BONHARD, V., PRACH, J., 1958. Piana a Pianina, Státní nakladatelství technické literatury Praha., 284 s., ISBN: není k dispozici
- BOUTILLON, X., 1988. Model of piano hammers, Experimental determinativ and digital simulation, J. Acoust. Soc. Am., vol. 11 str.: 311-320, ISBN: není k dispozici
- BUCUR, V., 1995. Acoustics of Wood, Boca Raton: CRC Press, 284 s., ISBN 0849348013.
- BURRED, J.J., 2004. Acoustic of the Piano, Professional Conservatory of Music Arturo Soria, Madrid 41 s., ISBN: není k dispozici
- ČÍŽEK B., 2010. Historické klavíry v Čechách a na Moravě, Togga, spol s.r.o., 182 s., ISBN 978-80-87258-45-3
- DIVOS F. 2005. Nondestructive Testing of. Wood Manuál pro FFT ISBN: není k dispozici
- FENNER, K., GROSSBACH, J., 2000. Praktisches Handuch der Klavierkonstruktion, PPV Medien (Verlag) 148 s., ISBN 978-3-923639-39-7
- FLETCHER, N. H., ROSSING, T. D., 1998. The physics of musical instrument. 2<sup>nd</sup> edition, Springer Science and Business Media, Inc., 756 s., ISBN 0-387-98374-0
- FLETCHER, N. H., 1964. Normal vibrafon of a Stiff Piano Strings, J. Acoust. Soc. Am., vol. 36, No. 1, ISBN: není k dispozici
- GRÁC R., 1985. Náuka o hudobných nástrojoch., 2 vyd., Slovenské pedagogické nakladatelstvo Bratislava, 131 s., ISBN 67-401-85
- HERAMON R., F., S., 1948. The elasticity of wood and plywood. Department of Science and Industry Research. Forest Products Research Special Rep7. HMSO, London 87 s., ISBN: není k dispozici
- HORNYCH, V., 2008. Vliv povrchové úpravy na akustické vlastnosti, Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Brno, ISBN- není k dispozici
- KIPNIS, I., 2006. The Harpsichord and Clavichord: An Encyclopedia., Routledge Taylor & Francis Group, 576 s., ISBN 13: 9780415937658



- KLÍMOVÁ, H., 2011. Modální analýza rezonanční desky pianina metodou konečných prvků, Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Brno, 52 s., ISBN- není k dispozici
- KURFÜRST, P., 2004. Hudební nástroje, Praha, Togga, 1176 s., ISBN: 80-902912-1-X
- LIEBER, E., 1986. Moderne Theorien über die Physik der schwingenden Saite und ihre Bedeutung für die musikalische Akustik, *Acoustica* 33, str.: 324-335, ISBN- není k dispozici
- MORAVČÍKOVÁ, O., 2005. Sofiologický pohľad na vývoj hudobných nástrojov, Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici – rigorózná práca 179 s., ISBN- není k dispozici
- MEYNELL, H.E. 1956. Malá kronika Anny Magdaleny Bachové, Státní nakladatelství krásné literatury, hudby a umění Praha 156 s ISBN: není k dispozici
- MODR, A. 2002. Hudební nástroje, Praha, Editio Bärenreiter s.r.o. 283 s., ISBN: 80-86385-12-4 (9. Vydání)
- OLING, B., WALLISCH, H., 2004. Encyklopedie hudebních nástrojů, Rebo Productions CZ 256 s., ISBN 80-7234-289-4
- PILÁŘ, V., ŠRÁMEK, F., 1986. Umění houslařů. 1 vydání. Praha 1, Panton, 524 s., ISBN: 35-065-86.
- PODOBSKY, J., NOSEK J., VEICHEROVA, H., 1975. Výzkum vlivu materiálu na akustickou kvalitu rezonanční desky pianina. Základní výzkum rezonančních desek – závěrečná zpráva výzkumného úkolu RD 8.1, Československé hudební nástroje oborový podnik Hradec Králové. ISBN- není k dispozici
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M., 1997. Štruktura a vlastnosti dreva. Bratislava, Priroda, 488 s., ISBN 80-07-00960-4.
- PRACH J., 1987. Stavba klavírů, pianin a její problematika., Státní pedagogické nakladatelství Praha, 165 s., ISBN- není k dispozici
- RAFAJ A., 2000 Příspěvek k numerickému modelování soustavy pianinová struna-ozvučná deska, Disertační práce, České vysoké učení technické v Praze 86 s., ISBN- není k dispozici
- REBNITZ, A. A., 1993. Piano servicing, Tuning, and Rebuilding. 2<sup>nd</sup> edition, Vestal Press , 344s., ISBN 1-879511-03-7
- SUZUKI, H., NAKAMURA, I., 1990. Acoustic of piano. *Appl. Acoust.*, vol. 30 s. 147-205., ISBN- není k dispozici
- TESAŘOVÁ M., 2006. Hudební nástroje subsaharské Afriky ve sbírkách Náprstkova muzea, bakalářská práce, FHS UK, 100 s., ISBN- není k dispozici
- THWAITES. S., FLETCHER. N. H., 1980. Some notes about clavichord, Department of Physics, Unioersity of New England, str.: 1476- 1483, ISBN- není k dispozici

TIPPNER, J., 2010. Numerická simulace rezonanční desky klavíru. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně. Brno, 327 s., ISBN- není k dispozici

SÝKORA, V. J., 2005. Dějiny klavírního umění: Dějiny nástroje. I. Netolice: Jiří Churáček JCAudio, 65 s. ISBN 80-7232-267-2., ISBN- není k dispozici

VALÁŠKOVÁ Z., MACHÁČEK F., ZRŮBEK R., 1984. Výroba klavírů a pianin v Československu 1984, Kruh Hradec Králové., ISBN: 46-016-84

YANAGISAWA, Z., NAKAMURA, K., 1982. Experimental study on force-time curve during the contact between hammer and piano string, Transactions of Musical Acoustics Technical Group Meeting of the Acoustic Society of Japan ISBN- není k dispozici

WILLIAMS, J. P., 2002. Piano, Bratislava, Slovart s.r.o., 160s., ISBN: 80-7209-473-4

WOGRAM, K., 1980. Akustische Untersuchungen an Klavieren, Teil I, Schwingungseigenschaften des Resonanzbodens, Das Musikinstrument 23, 380-404 , ISBN- není k dispozici

#### **On-line:**

BEEBE, C., 2014. Stringing IV: Wire type identification [online] citováno 5. prosince 2015 dostupné na: <http://www.hpschd.nu/>

SANKEY, J., 2014. Bridge Pins of Harpsichords / [online] citováno 11. listopadu 2015 Dostupné na: <http://www.johnsankey.ca/string.html>

SARTORIUS, M. Gottfried Silbermann: Master Organ-BUILDER of the German Baroque [online] citováno 27. září 2015. Dostupné na: <http://www.baroquemusic.org>

SVOBODA, J., BRDA, J., 1981., Elektro-akustika do kapsy, Praha [online] citováno 12. dubna 2015

Dostupné na:

<https://googledrive.com/host/0B3iAqBIIM8c2YXZrNG1Qb0tYdzA/Dokumenty/rozsahy.jpg>

POWERS, W.,. The Piano: The Pianofortes of Bartolomeo Cristofori (1655–1731), New York: The Metropolitan Museum of Art, [online] citováno 27. září 2013 Dostupné na: <http://www.metmuseum.org>

[www.august-foerster.de/](http://www.august-foerster.de/) [online] citováno 8. listopadu 2015

[www.bechstein.com /](http://www.bechstein.com/) [online] citováno 12. listopadu 2015

[www.bosendorfer.com](http://www.bosendorfer.com/) [online] citováno 10. listopadu 2015

[www.consumer.wesselnickelandgross.com/](http://www.consumer.wesselnickelandgross.com/) [online] citováno 15. listopadu 2015

www.fakopp.com PC based Fast Fourier Vibration analyzer [online] citováno 23. února 2016

www.fazioli.com [online] citováno 3. prosince 2015

http://www.kawaius.com [online] citováno 23. března 2016

www.metmuseum.org 2015 art [online] citováno 18. listopadu 2015

www.perarts.com/files/bos/What\_Makes\_It\_A\_Bosendorfer.pdf [online] citováno 10. listopadu 2015

www.petrof.cz/bezodrazova-mistnost.html [online] citováno 24. listopadu 2015

www.pianos.cz/ [online] citováno 12. prosince 2015

www.steingraeber.de [online] citováno 15. listopadu 2015

www.steinway.com [online] citováno 23. listopadu 2015

www.thepianostore.com/ [online] citováno 23. listopadu 2015

www.usa.yamaha.com [online] citováno 11. prosince 2015

### **Seznam tabulek:**

Tab. 1- Tabulka vypočtených menzur

Tab. 2- Materiálové konstanty

Tab. 3- Vlastní frekvence vzorku

Tab. 4- ANOVA LDD ohyb (výstup z programu Statistica)

Tab. 5- ANOVA LDD podél (výstup z programu Statistica)

Tab. 6- ANOVA- hustota vzorků (výstup z programu Statistica)

Tab. 7- ANOVA- rychlost vedení zvuku (výstup z programu Statistica)

Tab. 8 - ANOVA- E dyn (výstup z programu Statistica)

Tab. 9- ANOVA – akustická konstanta (výstup z programu Statistica)

Tab. 10 - ANOVA akustický vlnový odpor Z (výstup z programu Statistica)

Tab. 11- ANOVA- přeměňená akustická účinnost (výstup z programu Statistica)

Tab. 12- korelace jednotlivých hodnot u BK (výstup z programu Gnumeric)

### **Seznam obrázků:**

Obr. 1- <http://www.baltimorerecorders.org/clavichords.html>

Obr. 2- <http://phys.unsw.edu.au/music/people/publications/Thwaitesetal1981.pdf>

Obr. 3- <http://www.claviantica.com/>

Obr. 4- Ilustrace autora

Obr. 5- Ilustrace autora

Obr. 6- Ilustrace autora

Obr. 7- Ilustrace autora

Obr. 9- Ilustrace autora

Obr. 8- Ilustrace autora

Obr. 10- Ilustrace autora

Obr. 11- Ilustrace autora

Obr. 13- Ilustrace autora

Obr. 12- Ilustrace autora

Obr. 14- Ilustrace autora

Obr. 15- Ilustrace autora

Obr. 16- Ilustrace autora

Obr. 17- <https://s-media-cacheak0.pinning.com/>

Obr. 18- <http://msumusichistory.pbworks.com/>

Obr. 19- <http://www.brownfieldpiano.com/>

Obr. 20- <https://www.youtube.com/watch?v=SmLkRyxgh1U>

Obr. 21- Ilustrace autora

Obr. 22- Litinový rám modelu Centennial- <http://www.klavierland.at/>

- Obr. 23- <http://www.pianoworld.com>
- Obr. 24- <http://www.pianoworld.com>
- Obr. 25- <http://antpetrof.com/cs/>
- Obr. 26- <http://antpetrof.com/cs/>
- Obr. 27- <http://www.georgekolasis.com/piano-bridge.html>
- Obr. 28- <http://photo.boesendorfer.com>
- Obr. 29- <https://www.youtube.com/watch?v=SmLkRyxgh1U>
- Obr. 30- <https://www.youtube.com/watch?v=SmLkRyxgh1U>
- Obr. 31- [www.steinway-piano.com](http://www.steinway-piano.com)
- Obr. 32- <https://www.youtube.com/watch?v=jAInt7hIZIU>
- Obr. 33- <http://www.pianoworld.com/forum/ubbthreads.php/topics/1350411>
- Obr. 34- <http://www.robertspianos.com>
- Obr. 35- <http://bechstein.com/en/bechstein-the-legend/piano-craftsmanship.html>
- Obr. 36- <http://bechstein.com/en/bechstein-the-legend/piano-craftsmanship.html>
- Obr. 37- <https://www.youtube.com/watch?v=OICs5IiyNCs>
- Obr. 38- <https://www.youtube.com/watch?v=OICs5IiyNCs>
- Obr. 39 – Solid Brick 8 node 185- <http://inside.mines.edu/>
- Obr. 40- Měření vzorků kobylek - fotografie autora
- Obr. 41- Sada měřených vzorků - fotografie autora
- Obr. 42 - Měření vlastních frekvencí ozvučnicku nástroje - fotografie autora
- Obr. 43- Ohybová deformace zkušební vzorku (ANSYS)
- Obr. 44- Naměřené vlastní frekvence reprezentativního vzorku (Matlab)
- Obr. 45- Ohybový útlum v čase (Matlab)

Obr. 46- Podélná deformace zkušební vzorku (ANSYS)

Obr. 47- naměřená podélná frekvence chvění (Matlab)

Obr. 48- Krabicový graf logaritmického dekrementu útlumu v ohybu (Gnumeric)

Obr. 49 - Krabicový graf logaritmického dekrementu útlumu při podélném měření (Gnumeric)

Obr. 50 - Hustota jednotlivých vzorků (Gnumeric)

Obr. 51- Rychlost vedení zvuku (Gnumeric)

Obr. 52 – Ohybový dynamický modul pružnosti (Gnumeric)

Obr. 53- Akustický vlnový odpor  $Z$  (Gnumeric)

Obr. 54- Akustická konstanta (Gnumeric)

Obr. 55- Přeměněná akustická účinnost (Gnumeric)

Obr. 56 Měření vlastních frekvencí v basové části nástroje (Gnumeric)

Obr. 57- Měření vlastních frekvencí v diskantové části nástroje (Gnumeric)

Obr. 58- První vlastní frekvence vzorku (ANSYS)

Obr. 59- Druhá vlastní frekvence vzorku (ANSYS)

Obr. 60- Třetí vlastní frekvence vzorku (ANSYS)

Obr. 61- Čtvrtá vlastní frekvence vzorku (ANSYS)

Obr. 62- Pátá vlastní frekvence vzorku (ANSYS)

Obr. 63- První podélná vlastní frekvence vzorku (ANSYS)

Obr. 64- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 1 (Matlab)

Obr. 65- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 2 (Matlab)

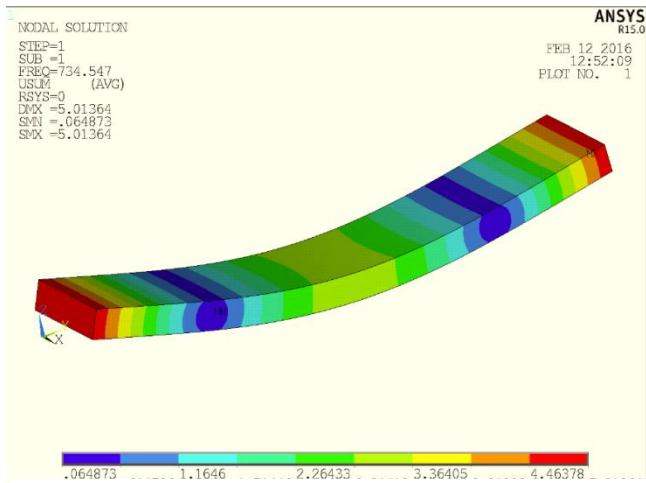
Obr. 66- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 3 (Matlab)

Obr. 67- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 4 (Matlab)

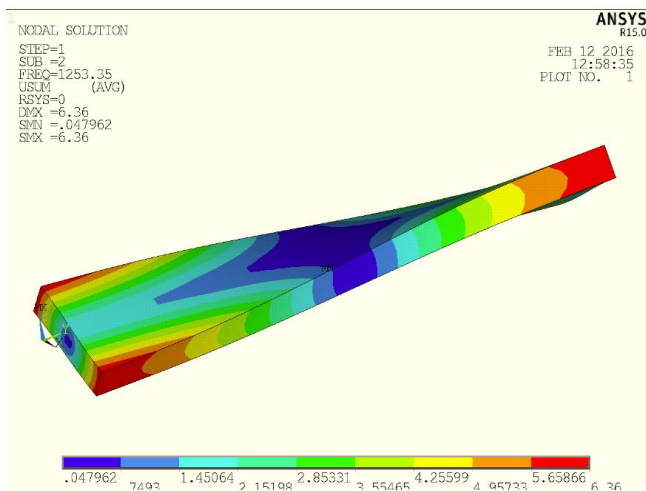
- Obr. 68- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 5 (Matlab)
- Obr. 69- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 6 (Matlab)
- Obr. 70- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 7 (Matlab)
- Obr. 71- Patentované odlehčení kobyly (Schimmel) - <http://worldwide.espacenet.com/>
- Obr. 72- Patentované smrkové zesílení rez. desky pod kobyly (Petrof) -  
<http://worldwide.espacenet.com/>
- Obr. 73- Patentovaný kobylykový agraf modelu Phoenix (Steingraeber) -  
<http://worldwide.espacenet.com/>
- Obr. 74- Kobylykový agraf firmy Steingraeber - <http://worldwide.espacenet.com/>
- Obr. 75- Patentované odlehčení basové kobyly - <http://worldwide.espacenet.com/>
- Obr. 76- Patentované způsoby uchycení struny na kobyly -  
<http://worldwide.espacenet.com/>
- Obr. 77- Patentovaný způsob uchycení kobylykových hřebů -  
<http://worldwide.espacenet.com/>
- Obr. 78- Patentové řešení odlehčeného basového můstku -  
<http://worldwide.espacenet.com/>
- Obr. 79- Patentované řešení basového můstku umístěného za rezonanční deskou -  
<http://worldwide.espacenet.com/>
- Obr. 80- Patentované uchycené kobyly pomocí vyduté rozety -  
<http://worldwide.espacenet.com/>
- Obr. 81- Patentované řešení kobyly bez kobylykových hřebů (Kawai) -  
<http://worldwide.espacenet.com/>
- Obr. 82- Patentované historické řešení kobyly - <http://worldwide.espacenet.com/>

## Příloha:

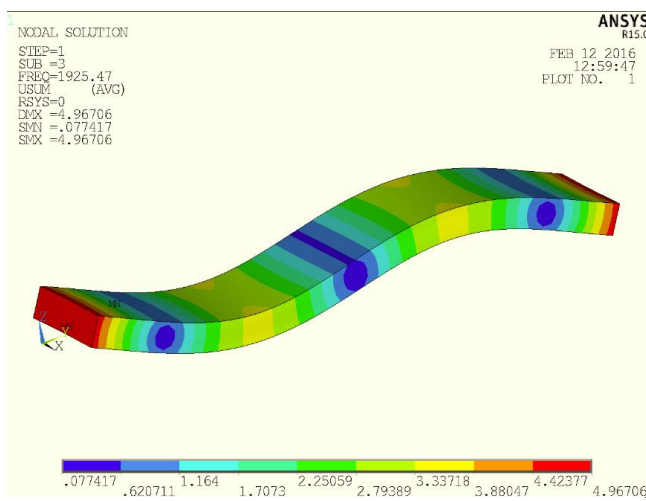
### Zobrazení prvních pěti vlastních frekvencí vzorků



Obr. 58- 745 Hz

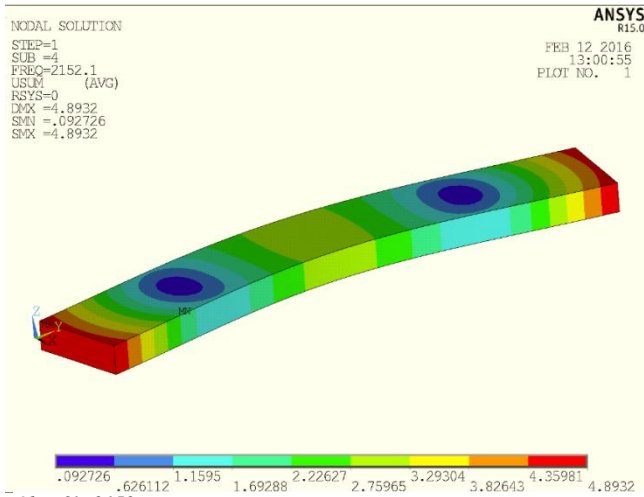


Obr. 59- 1253 HZ

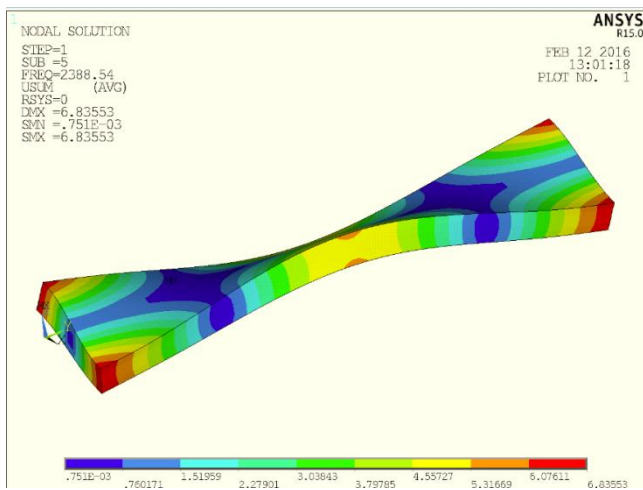


Obr. 60- 1935 Hz



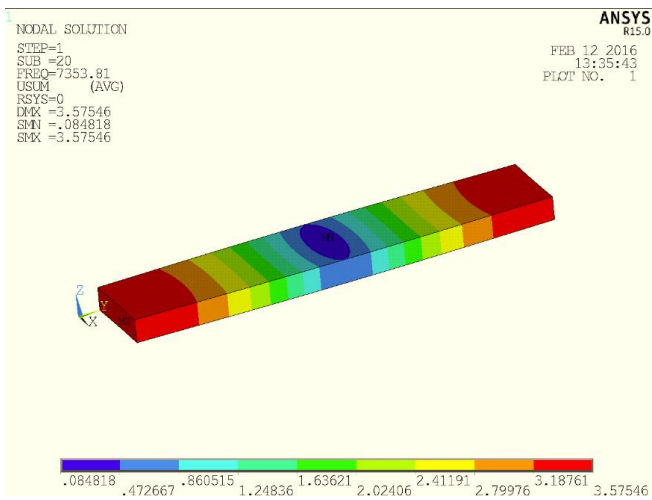


Obr. 61- 2152 Hz



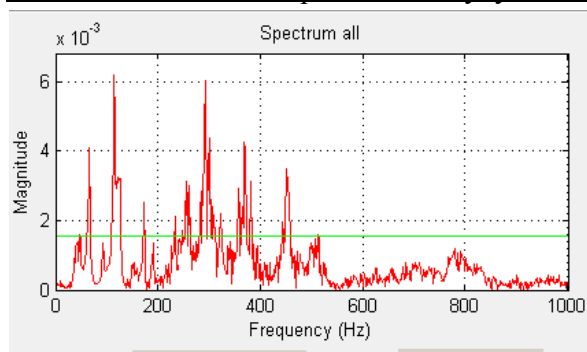
Obr. 62 - 2389 Hz

### Zobrazení první vlastní podélné frekvence

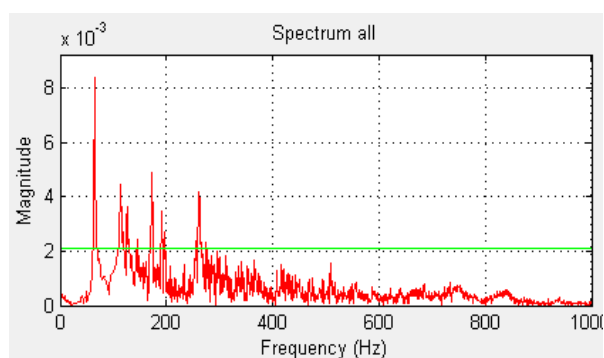


Obr. 63- 7354 Hz

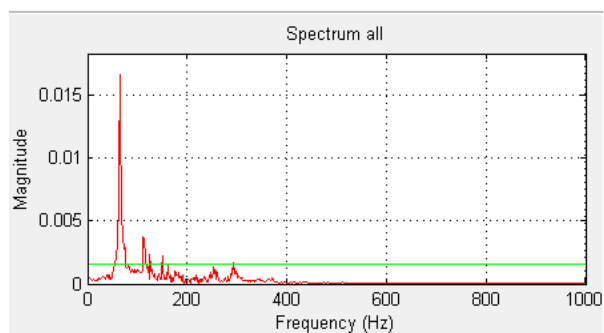
## Přehled frekvenčního spektra z analýzy ozvučnicku klavíru



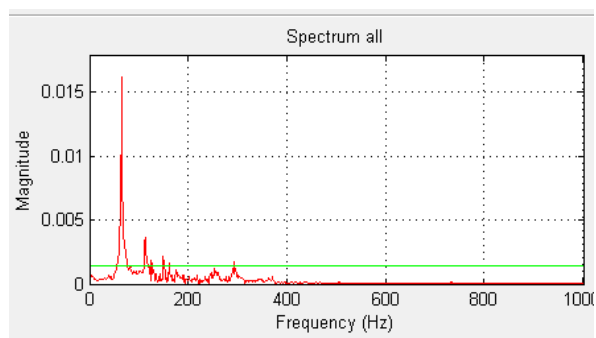
Obr. 64- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 1



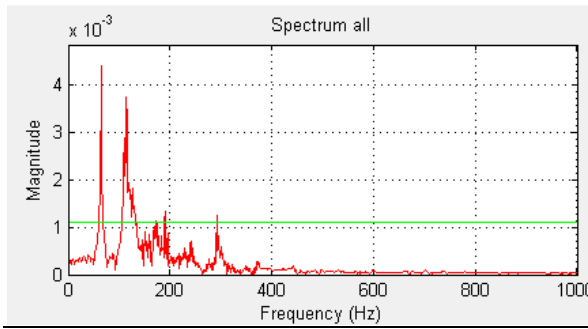
Obr. 65- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 2



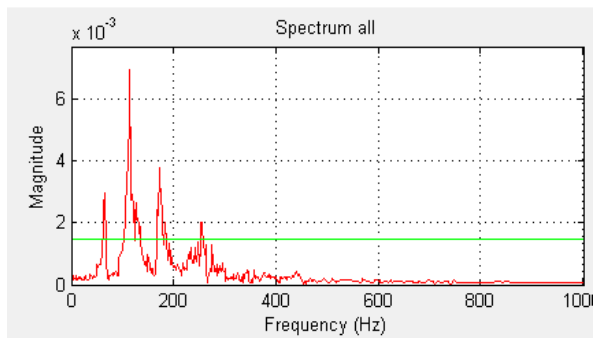
Obr. 66- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 3



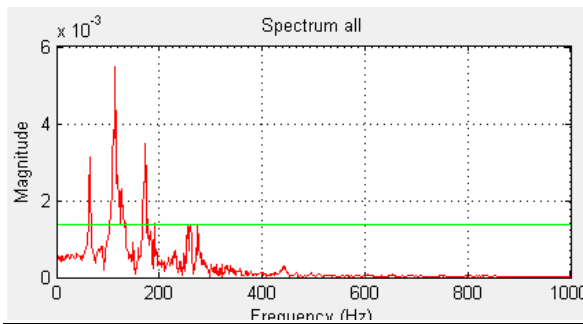
Obr. 67- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 4



Obr. 68- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 5

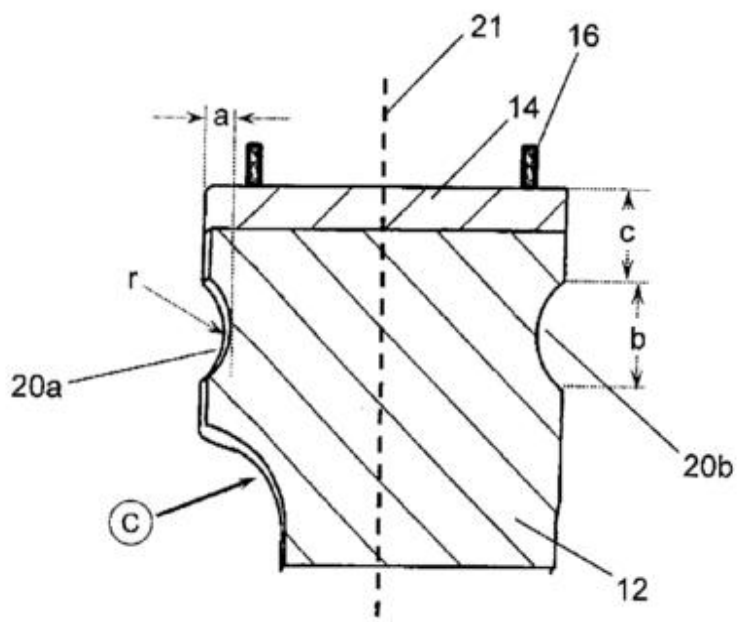


Obr. 69- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 6

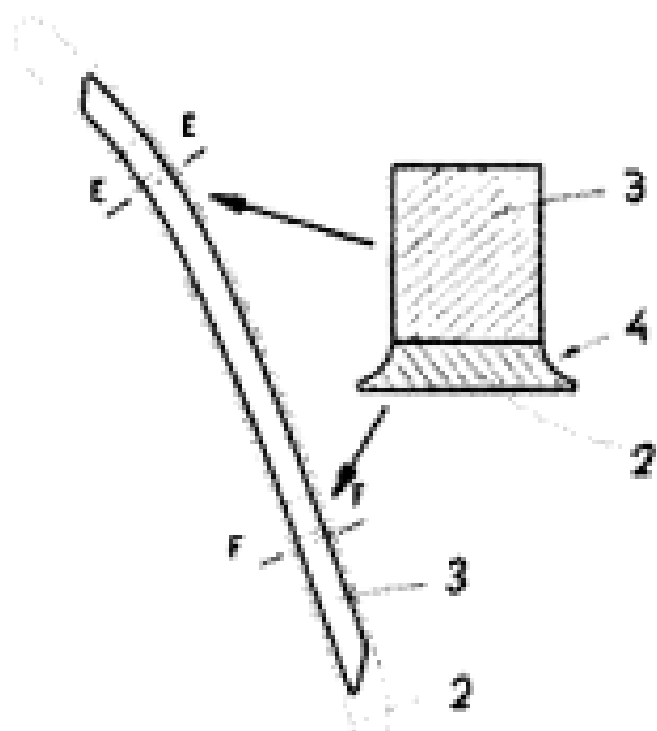


Obr. 70- Frekvenční spektrum naměřené v bodě č. 7

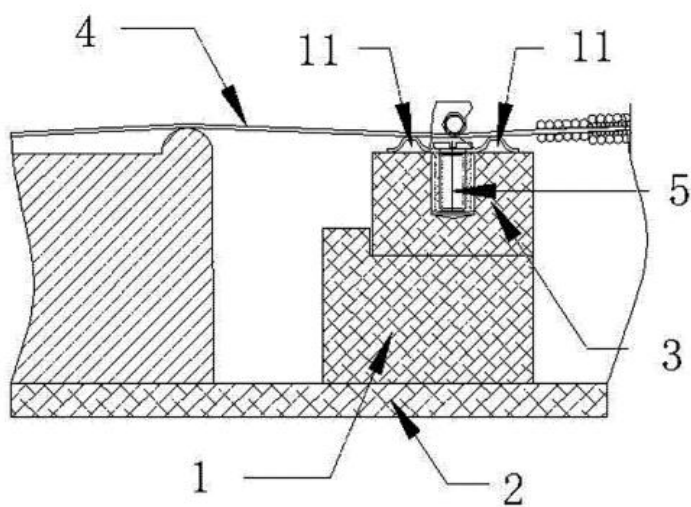
Přehled vybraných patentových řešení kobylek



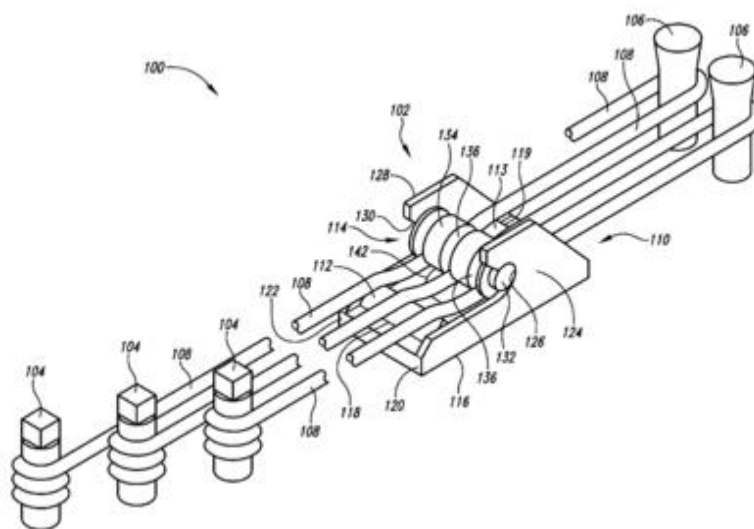
Obr. 71- Patentované odlehčení kobyčky (Schimmel)



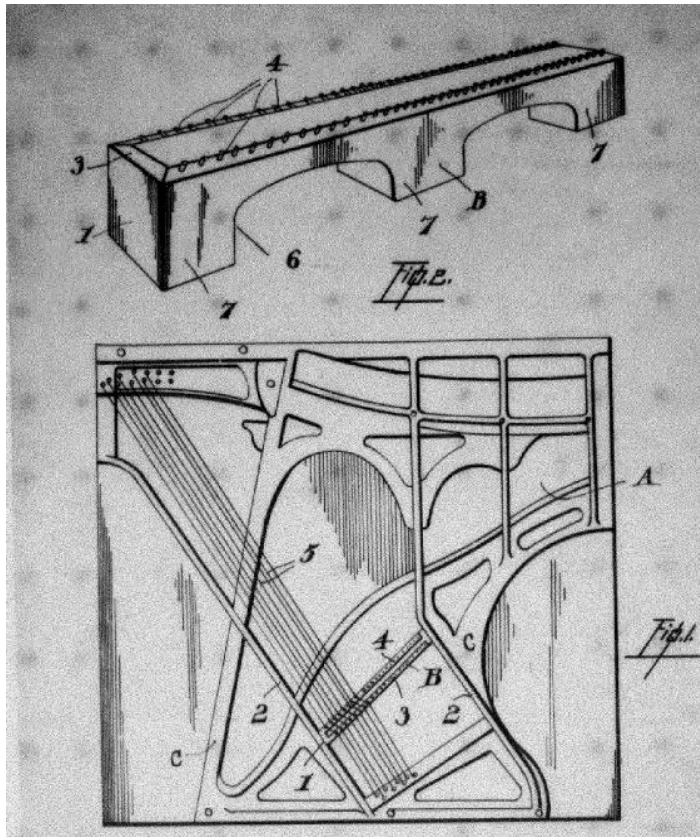
Obr. 72- Patentované smrkové zesílení rez. desky pod kobyčkou (Petrof)



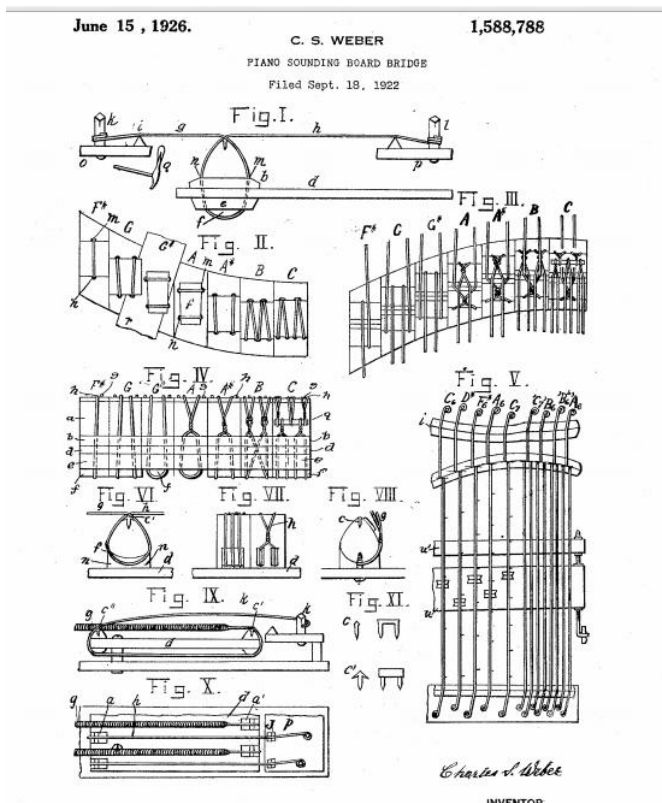
Obr. 73-Patentovaný kobyľkový agraf modelu Phoenix (Steingraeber)



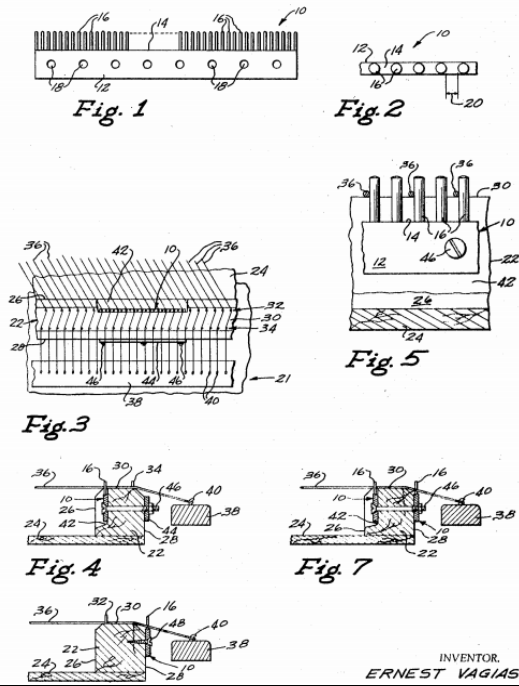
Obr. 74- Kobyľkový agraf firmy Steingraeber



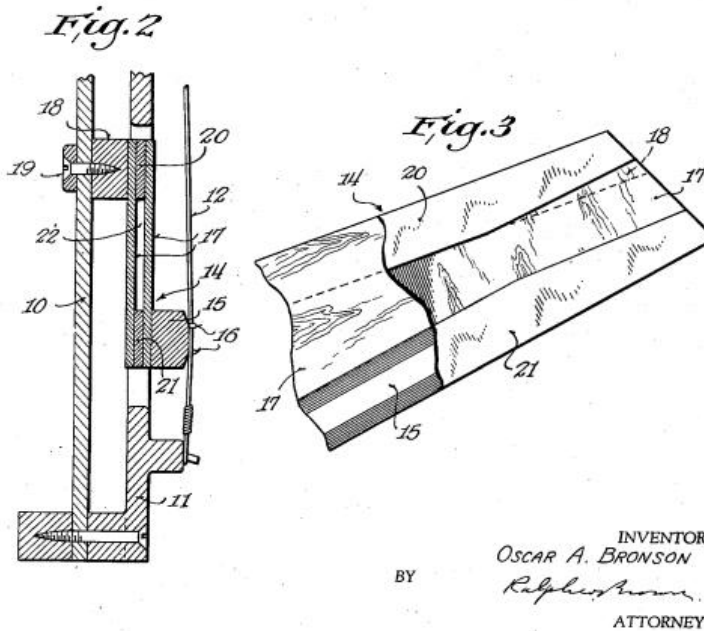
Obr. 75- Patentované odlehčení basové kobylyky



Obr. 76- Patentované způsoby uchycení struny na kobylyku



Obr. 77- Patentovaný způsob uchycení kobylkových hřebů

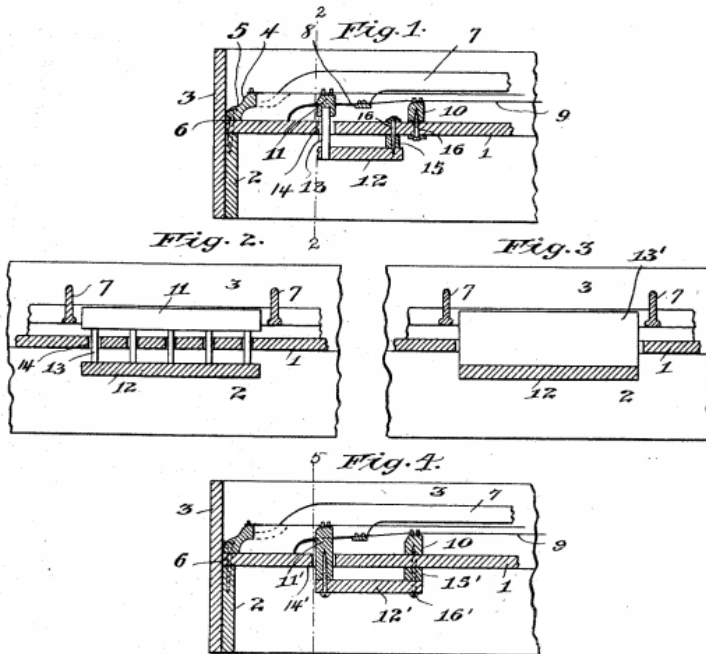


Obr. 78- Patentové řešení odlehčeného basového můstku

No. 812,510.

PATENTED FEB. 13, 1906.

F. MEYER.  
PIANO BRIDGE.  
APPLICATION FILED OCT. 6, 1904.



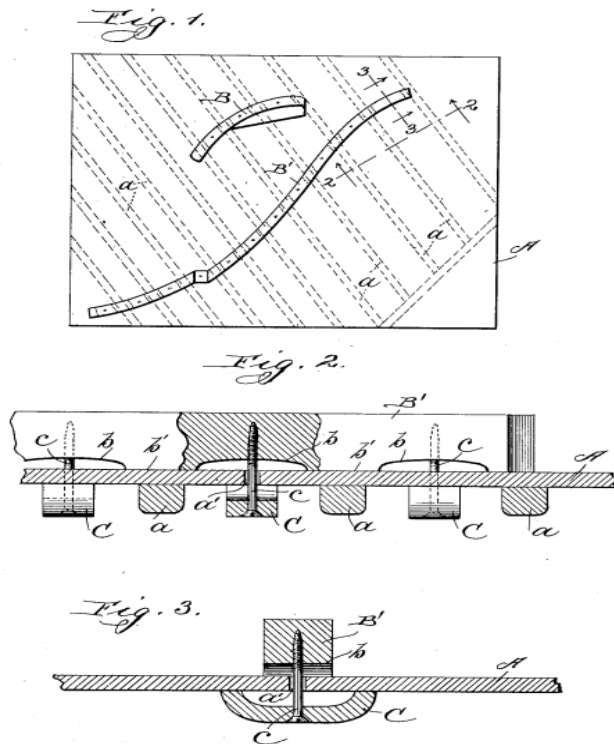
Obr. 79- Patentované řešení basového můstku umístěného za rezonanční deskou

No. 662,521.

Patented Nov. 27, 1900.

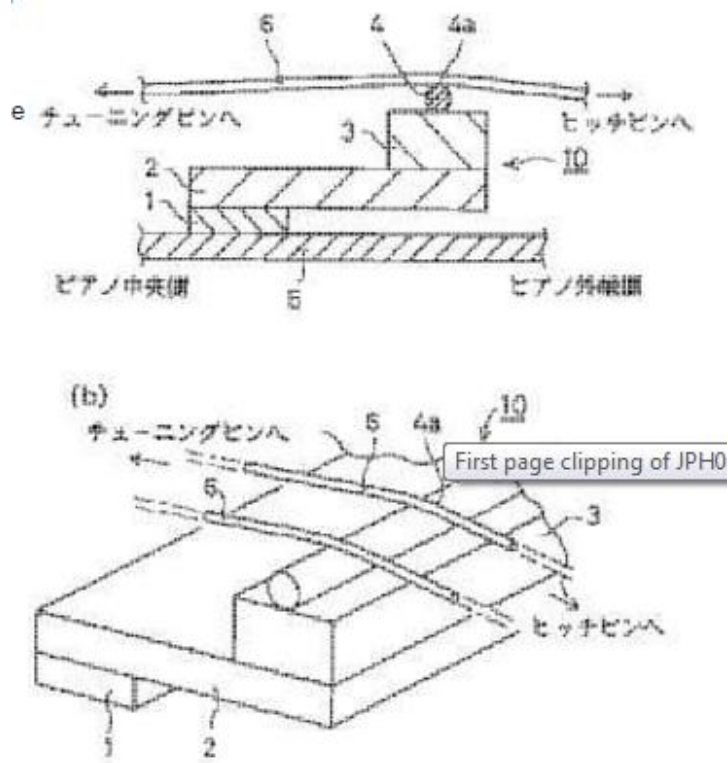
J. H. BUTLER  
PIANO BRIDGE.  
(Application filed July 12, 1900.)

(No Model.)

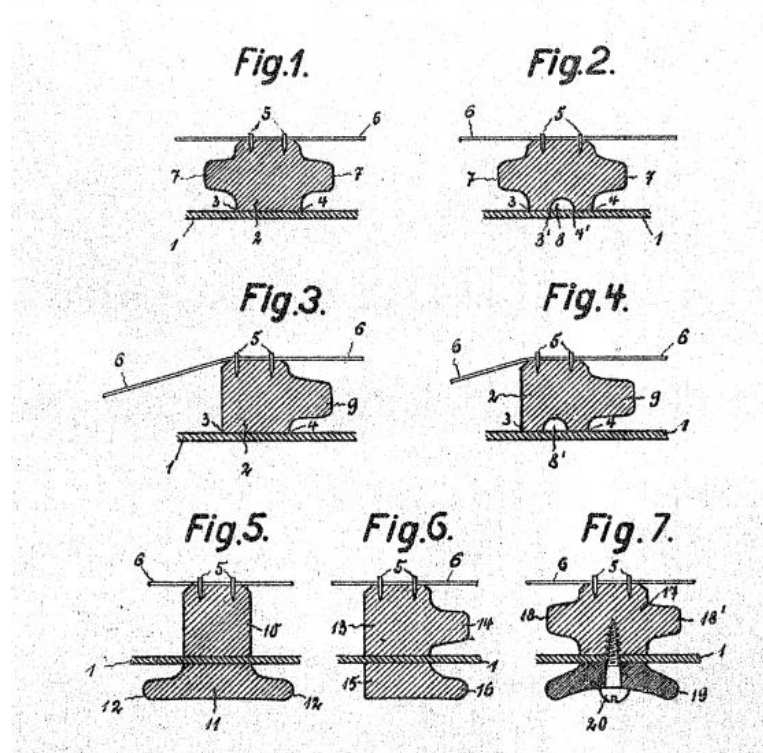


Obr. 80- Patentované uchycení kobyly pomocí vyduuté rozety





Obr. 81- Patentované řešení kobylky bez kobylkových hřebů (Kawai)



Obr. 82- Patentované historické řešení kobylek