

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

KATEDRA BIOFYZIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Měření rezonančních vlastností hlasivek preparátu hrtanu pomocí externí
excitace**



Wypracoval: Václav Prokúpek

Studijní obor: Biofyzika

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Jan G. Švec, Ph.D. et Ph.D.

OLOMOUC 2020

Autor: Václav Prokůpek

Název: Měření rezonančních vlastností hlasivek preparátu hrtanu pomocí externí excitace

Typ práce: Bakalářská práce

Pracoviště: Katedra biofyziky

Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan G. Švec, Ph.D. et Ph.D.

Rok obhajoby práce: 2020

Abstrakt: Cílem této práce je ustanovit metodiku pro měření rezonančních vlastností hlasivek u preparátu jeleního hrtanu, která bude sloužit jako základní kámen pro podrobnější experimenty zaměřené na zjištění rezonančních vlastností hlasivek, a vliv těchto rezonančních vlastností na produkci hlasu u člověka. Hrtan byl nejprve rozfonován zavedením externího přívodu vzduchu a byla zjištěna příslušná frekvence kmitání hlasivek. Následně byl tento hrtan rozvibrován pomocí technického shakeru, který byl buzen v širokém pásmu frekvencí a byla sledována odezva hlasivek pomocí vysokorychlostní kamery s připojeným laryngoskopem. Z vysokorychlostních videozáznamů byly vytvořeny digitální kymogramy a z nich byly odečteny rezonanční frekvence a šířka rezonančního pásma hlasivek. Tyto hodnoty byly poté porovnány s frekvencí samobuzených kmitů hlasivek. Frekvence samobuzených kmitů jeleních hlasivek byla 55 Hz. Při buzení technickým shakerem byly zjištěny dvě rezonanční frekvence a to přibližně 80 Hz a 140 Hz. U těchto rezonančních frekvencí byly také zjištěny dva rozdílné módy vibrací v horizontální rovině. Během experimentu se vyskytlo několik technických problémů. V budoucnu bude potřeba vyřešit současné spuštění technického shakeru a videokymografické kamery, odstranění šumu měřených dat a uchycení hlasivek tak, aby byla lépe viditelná hlasivková štěrbina. Výsledky však ukazují, že tato metoda je vhodná pro zkoumání rezonančních vlastností hlasivek u preparátů hrtanu.

Klíčová slova: rezonance, hlasivky, preparáty hrtanu, externí excitace

Počet stran: 46

Jazyk: Čeština

Author: Václav Prokůpek

Title of thesis: Measurement of resonance properties of the vocal folds in excised larynges using external excitation

Type of thesis: Bachelor thesis

Department: Department of biophysics

Supervisor: doc. RNDr. Jan G. Švec, Ph.D. et Ph.D.

The year of defence: 2020

Abstract: The aim of this thesis is to develop methodology for measurement of resonance properties of the vocal folds in excised deer larynges, which will serve as a foundation for more detailed experiments focused on resonance properties of vocal folds and effect of these resonance properties on voice production in humans. At first, the larynx was phonated by external air flow and the frequency of the vibration of the vocal folds was detected. Then, the larynx was vibrated using a technical shaker, which was excited in wide range of frequencies. Response of the vocal folds was observed using a high-speed camera with attached laryngoscope. The high-speed video recordings were processed into digital kymograms. From these, resonance frequencies and resonance bandwidths of the vocal folds were measured. These values were compared to the self-sustained vibration of the vocal folds. The frequency of the self-sustained deer vocal folds was 55 Hz. Two resonance frequencies at about 80 Hz and 140 Hz were observed during excitation via technical shaker. Two different modes of vibration were identified at these resonance frequencies in horizontal plane. Several technical difficulties emerged during the experiment. Future investigations will need to solve problems with simultaneous initiation of the vibrations of the shaker and start of the high-speed video recordings, elimination of noise in the measured data and attachment of the larynx, so that the visibility of glottis is improved. However, the initial results show, that this method is suitable for investigation of resonance properties of the vocal folds in excised larynges.

Key words: resonance, vocal folds, excised larynx, external excitation

Number of pages: 46

Language: Czech

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením doc. RNDr. Jana Švece, Ph.D. et Ph. D. a za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne.....

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. RNDr. Janu Švecovi, Ph.D. et Ph. D. za cenné rady při sestavování experimentu, odborné vedení, věcné připomínky a trpělivost během celé doby vypracovávání bakalářské práce. Dále děkuji konzultantům Pravinovi Kumarovi M.Eng. a Ketaki Phadke, M.Sc za odbornou výpomoc při sestavení experimentu a za přípravu preparátu jeleního hrtanu. A nakonec bych rád poděkoval mamce a bratrovi za finanční i morální podporu během vypracovávání bakalářské práce i celého studia.

Bakalářská práce souvisí s řešením výzkumného projektu GAČR 19-04477S „Modelování a měření strukturálně-akustických interakcí s prouděním v biomechanice tvorby hlasu člověka“.

SEZNAM ZKRATEK

DKG – digitální kymogram

Obsah

Úvod	1
Teoretická část	2
1. Mechanický oscilátor	2
1.1. Charakteristika kmitání	2
1.2. Volné harmonické kmitání netlumené	2
1.2.1. Časové veličiny	3
1.2.2. Rovnice kmitání	3
1.2.3. Fáze kmitání	4
1.3. Volné harmonické kmitání tlumené	5
1.3.1. Rovnice volného tlumeného harmonického kmitání	5
1.3.2. Amplituda tlumených kmitů a relaxační doba	6
1.3.3. Faktor kvality	7
1.4. Nucené harmonické kmitání	7
1.4.1. Rovnice nuceného harmonického kmitání	8
1.4.2. Rezonance	8
1.4.3. Šířka rezonance	9
2. Rezonance hlasivek	10
2.1. Lištový model	11
2.2. Rezonanční frekvence, rezonanční módy	11
2.3. Operační módy hlasivek	13
3. Experimenty zaměřené na externí excitaci:	15
3.1. Ex vivo metody	15
3.1.1. Tanabe a kol.: Damping Ratio of the Vocal Cord	15
3.1.2. Garrel a kol.: Optoreflectometry Determination of the Resonance Properties of a Vocal Fold	16
3.2. In vivo metody	18
3.2.1. Švec a kol.: Resonance properties of the vocal folds: In vivo laryngoscopic investigation of the externally excited laryngeal vibrations.	18

3. 2. 2. Hertegård a kol.: Vocal fold resonances at low and high pitch tuning.	19
Experimentální část	21
4. Experimentální uspořádání:	21
4.1 Pomůcky a jejich rozmístění:	21
5. Metodika	26
5.1 Odečítání základní frekvence hlasivek	26
5.2 Externí excitace	27
5.2.1. Vytvoření frekvenčního sweepu	28
5. 2. 2. Aplikace sweepu na hlasivky.....	30
6. Analýza dat.....	31
6.1. Digitální kymogram (DKG).....	31
7.2. Analýza kymogramů v ImageJ.....	32
7.3 Analýza dat v Excelu:	35
8. Výsledky:	37
9. Diskuze:	42
9.1. Frekvenční sweep 50 Hz – 200 Hz.....	42
9.2. Frekvenční sweep 200 Hz – 50 Hz.	43
9.3 Porovnání obou sweepů.	44
Závěr:.....	46
Seznam literatury:.....	47
Internetové zdroje:.....	49

Úvod

Lidské hlasivky jsou důležitým nástrojem v mezilidské komunikaci. Jsou důležitým sdělovacím prostředkem, který nás provází od narození až do posledního výdechu. I přes jeho důležitost započalo podrobnější vědecké zkoumání lidského fonačního ústrojí teprve v druhé polovině 19. století, kdy byly vyvinuty potřebné výzkumné metody. Soustředění se na hlasivky samotné přišlo na začátku 20. století. Zobrazovací technologie umožňovaly detailnější pohled na rychle kmitající hlasivky, což umožňovalo zkoumání jejich mechanických vlastností z různých úhlů pohledu. Postupně se vytvářely matematické modely pro popis chování kmitání. Výzkum však byl omezen na excitaci vzduchem. Teprve na konci 20. století a začátku 21. století se začalo uvažovat i nad excitací jinými metodami, než byl proud vzduchu. A právě externí excitace bude zaměření této bakalářské práce.

V teoretické části se seznámíme s fyzikálními veličinami, které se pojí s kmitáním obecně, přejdeme k aplikaci kmitů na hlasivky a ukážeme si některé experimenty, které se zabývaly externí excitací.

V experimentální části se zaměříme na hlavní cíl této bakalářské práce, a tou je vypracování metodiky pro externí excitaci vypreparovaných jeleních hrtanů. Tato metodika má za cíl zkoumat mechanické vlastnosti hlasivek, neboť informace o nich jsou velmi kusé a neúplné. Metodika si klade za cíl její možnost úpravy pro zkoumání nejen zvířecích hlasivek, ale i hlasivek lidských. Do budoucna by tato metodika mohla přinést nové možnosti zkoumání jak patologických jevů hlasivek, tak i výzkum účinnosti například uměle syntetizovaných hlasivek.

Teoretická část

1. Mechanický oscilátor

Mechanický oscilátor je zařízení, které je schopno periodicky kmitat. Příkladem tohoto zařízení může být například kulička zavěšená na provázku, která se kýve po vychýlení z rovnovážné polohy, nebo závaží na pružině, které po natažení kmitá nahoru a dolů.

1.1. Charakteristika kmitání

Závaží na pružině, které se nehýbe, se nachází v rovnovážném stavu. Aby začalo těleso kmitat, je třeba jej vybudit neboli excitovat. To je provedeno vnější silou, která dodá oscilátoru energii k jeho periodickým přeměnám. V případě pružiny takovou excitační silou může být její počáteční stlačení či natažení ve směru osy pružiny. Po této excitaci se začne závaží pohybovat nahoru a dolů – kmitat.

Tento pohyb lze popsat pomocí sil. Natáhneme pružinu do určité meze, která nepřekročí mez pružnosti. Natáhnutí představuje vnější sílu. Jakmile pustíme těleso, natažená pružina jej stáhne zpět do rovnovážné polohy, kde by se zastavilo, nebýt setrvačné síly, která jej vymrští dále po ose pružiny, a bude ji tak stlačovat. Těleso se na okamžik zastaví v bodě, kterému říkáme bod obratu, a pružina jej bude tlačit opět opačným směrem, tedy směrem dolů, do rovnovážné polohy, kde by se opět zastavilo, nebýt setrvačnosti. Takto těleso kmitá nahoru a dolů.

Pokud na tyto kmity nepůsobí žádné tlumení okolním prostředím či jinými silami, bude toto kmitání pokračovat do nekonečna. Takovému kmitání se říká netlumené. Takový typ kmitání je však idealizovaný, neboť v přírodě vždy působí nějaký druh odporové síly, proti kmitání. Pokud taková síla působí, říkáme, že je to kmitání tlumené (Lepil, 2012).

1. 2. Volné harmonické kmitání netlumené

Volné harmonické kmitání je takové kmitání, které je netlumené, a jeho vývoj v čase má sinusový průběh. K popisu takového průběhu se užívá rovnice kmitání.

1. 2. 1. Časové veličiny

Časové veličiny spojené s kmitáním jsou perioda a frekvence. Perioda je čas, za který těleso vykoná jeden kmit. Kmit je definován jako pohyb z libovolného počátečního bodu, přes rovnovážnou polohu zpět do počátečního bodu. Značí se T a jednotkou je sekunda [s].

Frekvence neboli kmitočet je obrácenou hodnotou periody. Říká, kolik kmitů vykoná soustava za jednu sekundu (Halliday 2013). Značí se f a jednotkou je hertz [Hz] = [s⁻¹] a vypočítá se ze vztahu

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

1. 2. 2. Rovnice kmitání

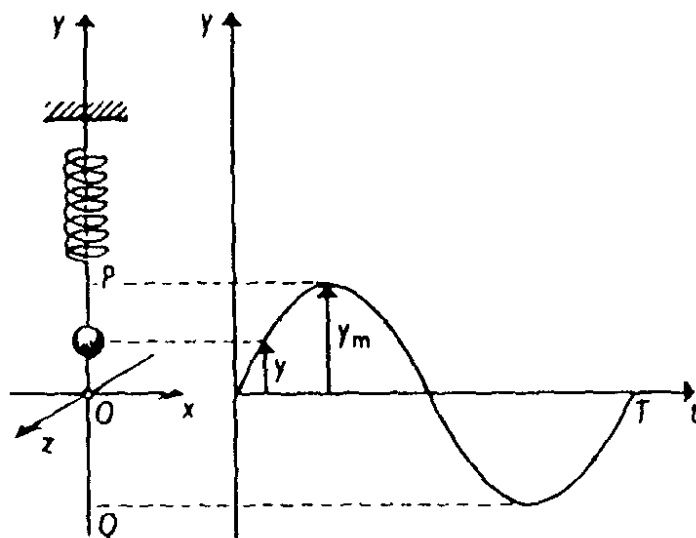
Rovnice kmitání popisuje periodu, resp. frekvenci kmitání a velikost maximální výchylky. Dokáže určit okamžitou výchylku y v libovolném čase podle vztahu (Lepil 2012)

$$y = y_m \sin(\omega t), \quad (2)$$

kde y_m je amplituda kmitů, ω je úhlová frekvence a t bod v čase, kde je zkoumána okamžitá výchylka. Tato rovnice popisuje kmitání, které začíná v čase $t = 0$ a má v tomto čase nulovou výchylku neboli nachází se v rovnovážném stavu (viz Obrázek 1). Veličina y_m je maximální výchylka neboli amplituda. Amplituda je obecná veličina pro jakékoliv kmitání, ať už mechanického charakteru, nebo elektromagnetického charakteru. V případě mechanického kmitání má význam dráhy, a značí vzdálenost, v jaké je těleso oproti rovnovážné poloze a má tedy jednotku metr [m].

Veličina ω v rovnici (2) vystupuje jako úhlová frekvence a je definována vztahem

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}. \quad (3)$$



Obrázek 1: Ukázka jedné periody kmitů mechanického oscilátoru tvořeného pružinou se závažím. Vpravo je časový průběh těchto kmitů, kde y je okamžitá výchylka a y_m je amplituda.

Dostupné z <http://kvinta->

[html.wz.cz/fyzika/mechanicke_kmitani_a_vlneni/kmitani_mechanickeho_oscilatoru/harmonicke_kmitani.htm](http://kvinta.html.wz.cz/fyzika/mechanicke_kmitani_a_vlneni/kmitani_mechanickeho_oscilatoru/harmonicke_kmitani.htm)

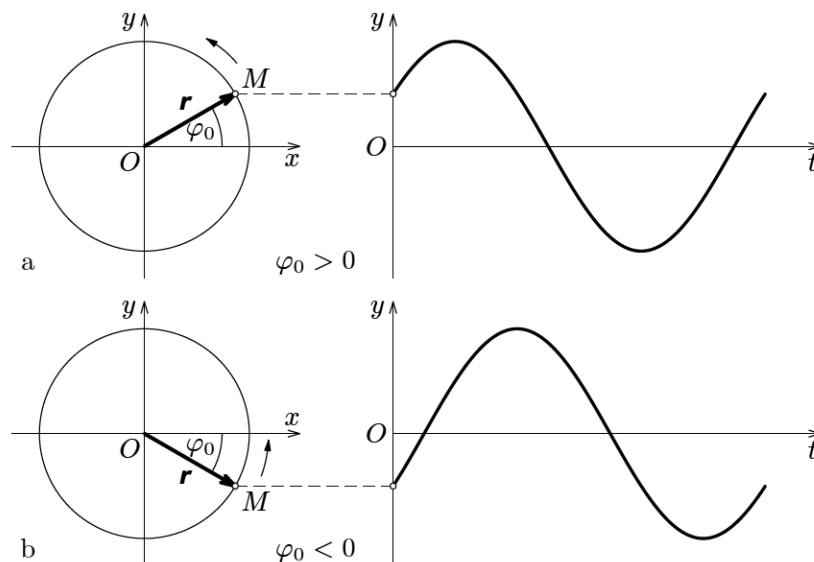
1. 2. 3. Fáze kmitání

Kmitání často začíná s nějakou počáteční výchylkou. Je to z toho důvodu, že je potřeba oscilátor nejprve excitovat, aby vykonával kmity. V případě závaží na pružině je nutné nejprve závaží přesunout z rovnovážné polohy, aby se natáhla pružina. Od této výchylky začíná oscilátor kmitat. Tomuto bodu se říká počáteční fáze, která se vyjadřuje pomocí úhlu φ , který nabývá jak kladných, tak i záporných hodnot podle toho, v jakém vztahu je k rovnovážné poloze. Pokud je $\varphi < 0$, pak vlna začíná pod osou t a pokud je $\varphi > 0$, pak nad osou t .

Počáteční fáze se v rovnici kmitání projeví v argumentu funkce sinus následujícím způsobem

$$y = y_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (4)$$

Toto je obecnější rovnice volného harmonického netlumeného kmitání (Obrázek 2).



Obrázek 2: Kmitání s fází φ_0 . Převzato z [Lepil 2012].

1.3. Volné harmonické kmitání tlumené

Jak bylo řečeno výše, v přírodě se vyskytuje spíše tlumené kmitání, které není periodické, ale je kvaziperiodické a tlumené (Bajer 2006). Tlumení znamená pokles amplitudy kmitání v čase. Tento pokles je exponenciální a je způsoben působením odporové síly, například odpor prostředí či tíhová síla, která působí v jiném směru. Tlumení je charakterizováno podle jeho původu a také podle rychlosti utlumení kmitání. K tomu slouží faktor kvality Q , popsany níže.

1.3.1. Rovnice volného tlumeného harmonického kmitání

Do rovnice (2) je kvůli tlumení nutno zavést faktor, který toto tlumení bude popisovat. Tento faktor má tvar exponenciální funkce, která je závislá na koeficientu tlumení b . Tento koeficient je získán empiricky. Rovnice kmitání poté získává tvar (Gorová, 2017)

$$y = y_m e^{-bt} \sin(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

kde y_m je amplituda počátečního kmitání a ω je v tomto případě frekvence tlumeného kmitání, která se popisuje vztahem

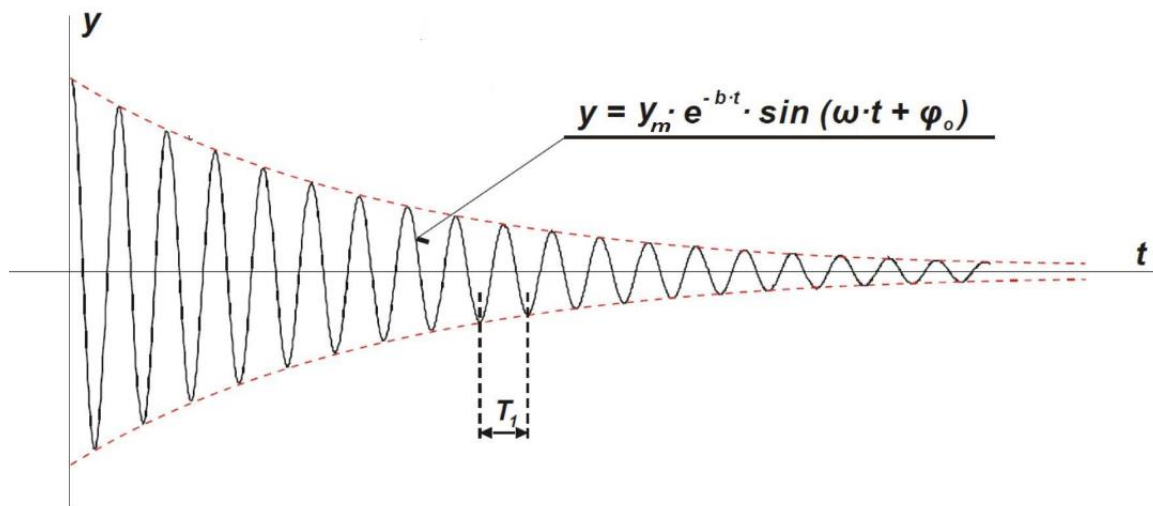
$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - b^2}, \quad (6)$$

kde ω_0 je frekvence netlumeného oscilátoru. Rozbor vztahu (6) poskytuje tyto informace.

Pokud bude $\omega_0^2 > b^2$ pak bude tlumené kmitání realizováno podle vztahu (5).

Pokud bude $\omega_0^2 < b^2$ pak bude tlumené kmitání aperiodické, tj. takové, které se po vychýlení pozvolna vrací zpět do své rovnovážné polohy, ale nekmitá. V některé literatuře se toto tlumení označuje jako nadkritické (Pospíšil 1987).

Pokud bude $\omega_0^2 = b^2$ pak bude toto tlumení kmitání rovněž aperiodické jako v předchozím případě. Rozdíl je v tom, že pokles do klidové rovnovážné polohy neprobíhá pozvolna, ale v co nejkratším čase. Tohoto tlumení se využívá pro konstrukci různých tlumičů nežádoucího kmitání.



Obrázek 3: Ukázka tlumeného mechanického kmitání. Upraveno, převzato z [<http://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FYII/tlum.kmity.pdf>]

1. 3. 2. Amplituda tlumených kmitů a relaxační doba

Ze samotné podstaty tlumených kmitů i z obrázku 3 je vidět, že amplituda tohoto kmitání klesá přímo úměrně s exponenciálou tlumení. Lze tedy psát, že reálná okamžitá amplituda se vypočítá, jako

$$y = y_0 e^{-bt}, \quad (7)$$

kde y_0 je amplituda netlumených kmitů.

Je vidět, že koeficient tlumení b ovlivňuje jak frekvenci kmitání, tak i amplitudu. Slouží tedy jako dobrá charakteristická veličina.

Vedle koeficientu tlumení, se jako charakteristická veličina používá také relaxační doba τ , která popisuje, za jakou dobu poklesne amplituda kmitů na $1/e$ původní hodnoty (Bajer 2006). Platí tedy

$$\frac{y_{i-1}}{y_i} = e^{-b\tau} = \frac{1}{e}, \quad (8)$$

kde y_{i-1} a y_i jsou dvě po sobě jdoucí amplitudy, i je přirozené číslo. Po osamostatnění τ z rovnice (8) bude získán vztah pro relaxační dobu ve tvaru

$$\tau = \frac{1}{b} \quad (9)$$

Koeficient b a relaxační doba τ dávají informace o míře tlumení kmitavého pohybu a mezi těmito dvěma parametry je nepřímá úměra.

1. 3. 3. Faktor kvality

K popisu tlumeného kmitání se používá faktor kvality zvaný též Q – faktor. Tento faktor vyjadřuje podíl velikosti amplitudy energie v maximu, a velikost rozdílu velikosti amplitudy v bodě o 2π dál. Pro Q – faktor platí vztah (Rusňák K.

$$Q = \frac{\omega_0}{2b} \quad (10)$$

Čím je faktor kvality větší, tím déle bude oscilátoru trvat, než se utlumí, a tedy vykoná velký počet kmitů. (Kolesnikov, 1988)

1. 4. Nucené harmonické kmitání

Nucené kmitání představuje situaci, kdy tlumenému oscilátoru je dodávána energie, aby kmitání nevymizelo. Pokud bude energie dodávána oscilátoru nahodile, kmitání nebude harmonické. Netlumené harmonické kmitání vznikne, když je energie oscilátoru dodávána v

průběhu celé periody (Lepil 2012). Tomuto typu kmitání se pak říká nucené harmonické kmitání. Takový oscilátor kmitá s frekvencí, kterou mu dodává periodická vnější síla (Lepil 1994). Oscilátoru, který dodává energii, se říká budící oscilátor, a oscilátoru, který je buzen říkáme rezonátor.

1. 4. 1. Rovnice nuceného harmonického kmitání

Na tlumený oscilátor působí nepřetržitě vnější síla, která mu dodává energii k tomu, aby si udržela netlumený, harmonický průběh. Podmínkou je, aby tato síla byla harmonická. To lze realizovat druhým oscilátorem s harmonickým průběhem, který kompenzuje energetické ztráty tlumeného oscilátoru. Rovnice nuceného harmonického kmitání má tedy tvar

$$y = y_m e^{-bt} \sin(\omega t + \varphi) + y_m \cos(\omega_b t - \varphi), \quad (11)$$

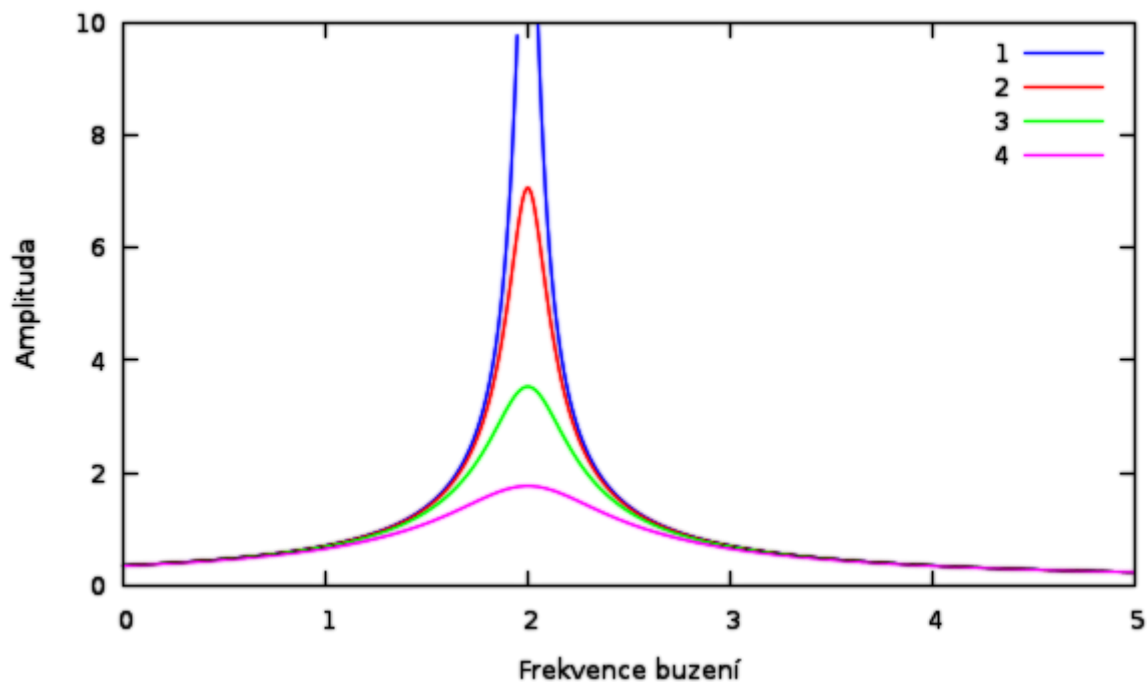
kde ω je úhlová frekvence tlumeného oscilátoru a ω_b je úhlová frekvence budícího oscilátoru. Tato rovnice je řešením lineární diferenciální rovnice druhého řádu pro harmonicky nucené kmity, která se skládá z řešení obecného a partikulárního. Obecným řešením je rovnice tlumených harmonických kmitů a partikulárním řešením je kmitání budícího oscilátoru. (Bajer, 2006)

1. 4. 2. Rezonance

Rezonance je jev, kdy malá změna jedné veličiny způsobí velkou změnu druhé veličiny (Kvasnice 2004). To může nastat u dvou oscilátorů, kde jeden působí jako oscilátor a budí kmitání na druhém oscilátoru, rezonátoru. Tuto soustavu popisuje rovnice (11), kde první člen je rezonátor, a druhý je budící oscilátor. Aby nastala maximální výchylka rezonátoru, musí platit podmínka rezonance. (Halliday, 2013)

$$\omega = \omega_b, \quad (12)$$

kde ω je rezonanční frekvence a ω_b je budící frekvence. Pro popis závislosti amplitudy rezonance na frekvenci buzení slouží rezonanční křivka. Tato křivka je také závislá na tlumení. Pokud je tlumení malé, amplituda dosahuje vyšší maximální hodnoty. Pokud je tlumení velké, amplituda dosahuje menších hodnot.



Obrázek 4: Rezonanční křivka pro 4 případy s různým tlumením. Modrá křivka má nejmenší tlumení, růžová křivka má největší tlumení. Dostupné z <http://vojtahanak.cz/files/kmity/rezonance.html>

1. 4. 3. Šířka rezonance

Šířka rezonance je kvantitativní označení pro interval frekvencí, kde amplituda dosahuje poloviční hodnoty rezonanční křivky, tedy platí, že (Pospíšil 1986)

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1. \quad (13)$$

Vztah (13) tedy určuje interval, na kterém dochází k výraznému zvýšení amplitudy, oproti budícímu kmitání. Tento interval souvisí s tlumením rezonátoru vztahem (Gorová 2017)

$$\Delta\omega = 2b = \frac{2}{\tau}. \quad (14)$$

Je zřejmé, že frekvenční šířka je závislá na energii budícího systému. Tato energie je dána podobným vztahem, jako je pro kinetickou energii, a to vztahem (Pospíšil 1986)

$$W = \frac{1}{2}mV^2, \quad (15)$$

kde V je amplituda rychlosti oscilátoru, m je hmotnost závaží. Je tedy zřejmé, že energie budícího systému je dána kvadrátem jeho amplitudy rychlosti.

Šířku rezonance se určuje tak, že se naleznou dvě frekvence ω_1 a ω_2 takové, jejichž hodnota amplitudy rychlosti bude $\sqrt{2}$ krát menší než její maximum neboli (Gorová 2017)

$$V(\omega_2) = \frac{V(\omega_1)}{\sqrt{2}}. \quad (16)$$

Amplituda rychlosti je získána z amplitudy kmitání, která má tvar podle (Pospíšil 1987)

$$A(\omega) = \frac{F}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + 4b^2\omega^2}}, \quad (17)$$

a tedy pro amplitudu rychlosti platí podle (Pospíšil 1987)

$$V(\omega) = \omega A = \frac{\omega F}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + 4b^2\omega^2}}, \quad (18)$$

Měření rezonance, a zejména její šířky se užívá hlavně ve stavebnictví pro konstrukci mostů. Vnější síla, která způsobí rozkývání mostu, je zpravidla způsobena lidmi nebo poryvy větru. Hledají se tedy takové frekvence rezonanční šířky, kdy dojde k rezonanci mostu, a podle toho se uzpůsobí stavba most, umístění tlumičů a jiných stavebních prvků, aby k této rezonanci nedošlo.

Pokud se porovnají vztahy (10) a (14), je možné psát pro faktor kvality v rezonanci vztah

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{f_0}{\Delta f}. \quad (19)$$

2. Rezonance hlasivek

Hlasivkový aparát představuje složitou soustavu chrupavek, vazů, svalů a nervů, které nám umožňují vytvářet hlas pro každodenní komunikaci. Takto složitý systém je velmi těžké popsat jednoduchými rovnicemi, a proto se přistupuje k aproximacím, které napomáhají k hlubšímu pochopení jejich vlastností. Mezi ně patří i rezonanční frekvence a rezonanční módy hlasivek, které se během fonace objevují.

Mezi první aproximace patří jednohmotnostní oscilátor, kdy je uvažována hlasivka jako jedno závaží o hmotnosti m , které je upevněno na stěně chrupavky pomocí pružiny s tuhostí k a které má tlumící element b . Tuhost k představuje tuhost jednotlivých vrstev tkáně v hlasivce a tlumící

element b představuje viskozitu tkáně (Titze, 2000). Z různých stroboskopických a pozorování je známo, že hlasivky se nechovají jako oscilátor s jedním závažím (Titze, 2000). Přístupuje se tedy k lištovému modelu hlasivek, které si popíšeme v následující kapitole. Kapitola se zaměří na souvislosti mezi rezonanční frekvencí a normálními módy hlasivek, a celkovou souvislost s operačními módy.

2. 1. Lištový model

Hlasivku si lze představit jako lištu, jejíž oba konce jsou upevněny na hlasivkové a štítné chrupavce. Tuto lištu lze uvažovat jako několik v řadě usazených závaží, které jsou spojené pružinou k sobě navzájem. Takto upevněná lišta se může ohýbat a napínat ve svém středu. Díky tomuto modelu je možné popisovat nerovnoměrné pohyby tkáně, a to za pomoci normálních módů (Titze, 2000), které souvisejí s rezonancí hlasivek. Je možné si představit hlasivku, jako nestlačitelnou tkáň (Berry 1996b), tedy nebude uvažován pohyb slizniční vlny, která se může pohybovat jinak než celá hlasivka.

Flexibilita se popisuje pomocí stupňů volnosti. Tuhé těleso konečných rozměrů má 6 stupňů volnosti, 3 translační a 3 rotační. Jedna lišta v lištovém modelu představuje jedno tuhé těleso. Hlasivky se teoreticky skládají z nekonečného počtu tuhých těles, respektive z buněk tkáně, a můžeme tedy říci, že hlasivky mají nekonečné množství stupňů volnosti (Berry 2001a). Pro hlasivky budou uvažovány pouze translační stupně volnosti, protože rotační nejsou pro další úvahy důležité.

2.2. Rezonanční frekvence, rezonanční módy

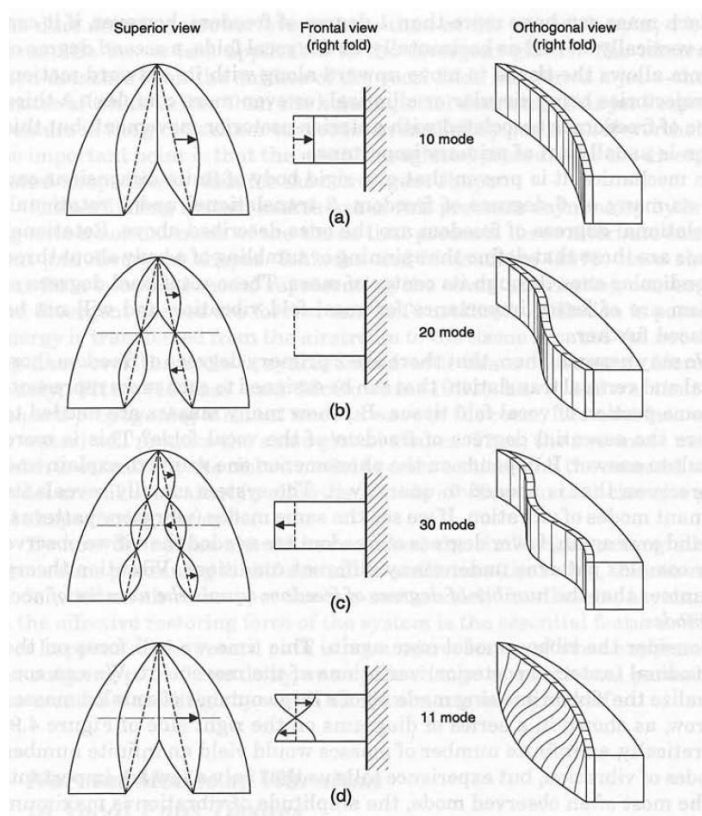
Téměř každá struktura je schopna za určitých podmínek rezonančně kmitat (Richardson, 1997). Kmitající struktura zaujímá tvary, které lze popsat pomocí normálních módů. Počet stupňů volnosti je stejný, jako počet vibračních módů. Vibrační módy se také označují jako normální módy nebo také přirozené módy (Berry 1994). Tyto módy slouží k fyzikální interpretaci vibrující struktury, tedy hlasivek. Někdy i složité vibrační vzory mohou být vysvětleny pomocí několika ortogonálních módů.

V lištovém přiblížení hlasivek lze nalézt několik typických normálních módů (též vibrační módy). Normální módy se popisují pomocí počtu půlvln, které struktura zaujímá. Pokud se

projevuje jen jedna půlvlna, pak se jedná o mediální mód, pokud dvě půlvlny (neboli celá vlna), tak se jedná o anteriorně-posteriorní mód a tak dále. Takové rozdělení platí pro projev módu v horizontální rovině hlasivek. Módy se mohou projevovat obdobně i ve vertikální rovině, a mohou se kombinovat s těmi horizontálními. Takové dvourozměrné módy jsou poté označeny dvěma čísly mn , kde m značí mód v horizontální rovině a n značí mód ve vertikální rovině (Titze 2000, str. 106) (Obrázek 5). V některé literatuře se objevuje také písmeno „x“ či „y“ v závislosti na tom, jaký v jaké rovině jsou módy pozorovány. Mediální mód se tak může značit x_{10} a pokud se vyskytne i vertikální mód, mediální mód pak dostává označení x_{11} , x_{12} atd. v závislosti na tvaru vertikálního módu.

S normálními módy také souvisí tvorbou formantů, kde frekvence formantů je frekvence normálních módů vokálního traktu. Vibrační módy jsou teoreticky vypočteny (Titze a Strong 1975), v realitě se však projevuje jen několik z nich, ačkoliv hlasivky dokáží vibrovat různými typy vibrací (Berry 2001a).

Lištový model poskytuje sice detailnější představu o vibracích hlasivek, nicméně je potřeba po detailnějším přístupu. Proto se přechází ke kontinuálnímu či konečnoprvkovému modelu, který se již neskládá z několika jednotek či desítek tuhých těles, ale rovnou stovek. Výpočetní technika a počítačové modelování značně usnadňuje výpočty, potřebné k simulacím vibrací těchto tohoto modelu. Do těchto modelů lze zavést i další faktory, jako například směr kolagenních vláken, který ovlivňuje projevy některých vibračních módů, hustotu tkáně atd.



Obrázek 5: Lištový model hlasivek s vyobrazením několika vibračních módů. (Převzato z Titze 2000, str. 106)

Důležitou vlastností rezonančních módů a rezonančních frekvencí je jejich nezávislost na zdroji jejich vybuzení. Stejných rezonančních módů lze dosáhnout metodou mechanické externí excitace, či jiné.

2. 3. Operační módy hlasivek

Z předchozí kapitoly je patrné, že vibrační módy dávají hlasívkám během vibrace určitý tvar. Pokud se přejde na obecnější rovinu, pak jakákoliv silová změna dvou bodů struktury mění její tvar (Richardson 1997). Takovéto silové změny mohou probíhat s určitou frekvencí, a změna tvaru struktury získává vibrující charakter, který je možné popsat vibračními módy.

Operační módy má každá struktura, protože každou strukturu lze silově deformovat do jiného tvaru. Míra deformace závisí na míře použité síly, a lze tedy tvrdit, že operační módy jsou silového charakteru. Na druhou stranu vibrační mód je vlastnost, která závisí na vlastnostech materiálu, a ne na použité síle. Je jedno, jakou silou se udeří do zvonu kladivem. Vždy se projeví stejné vibrační módy na stejné frekvenci, jen s jinou amplitudou, což platí pro lineární systémy.

Dalo by se tedy říci, že vibrační módy jsou speciální případy operačních módů. Operační módy lze matematicky odvodit z nelineárního, nestacionárního pohybu. Vibrační módy lze odvodit pouze z lineárního, stacionárního pohybu. Jinak řečeno, experimentálně se měří operační módy čili silové vychýlení struktury. Z naměřených operačních módů jsou poté vybrány ty, které splňují podmínky vibračních módů, pokud byl měřen stacionární lineární pohyb.

Operační módy silně závisí na počtu stupňů volnosti. Hlasivky mají teoreticky nekonečný počet stupňů volnosti, a tedy se u nich projeví nekonečně mnoho operačních módů. Ale jen několika z nich je možné přiřadit vibrační mód.

3. Experimenty zaměřené na externí excitaci:

Experimenty, které se zabývaly externí excitací hlasivek, by se daly rozdělit na dvě skupiny. *In vivo* a *ex vivo* experimenty. *In vivo* metody jsou experimenty, kdy byly zkoumány hlasivky živých subjektů, většinou lidské. *Ex vivo* jsou experimenty, kde byly zkoumány preparáty hrtanů, které preparací a způsobem uchování ztratily některé vlastnosti živých tkání, jako je například nervosvalové napětí. V této kapitole bude popsáno několik příkladů experimentů a jejich metodika, která byla použita. Jako literatura byly použity odborné články, které se těmito experimenty zabývaly.

3. 1. Ex vivo metody

3.1.1. Tanabe a kol.: Damping Ratio of the Vocal Cord

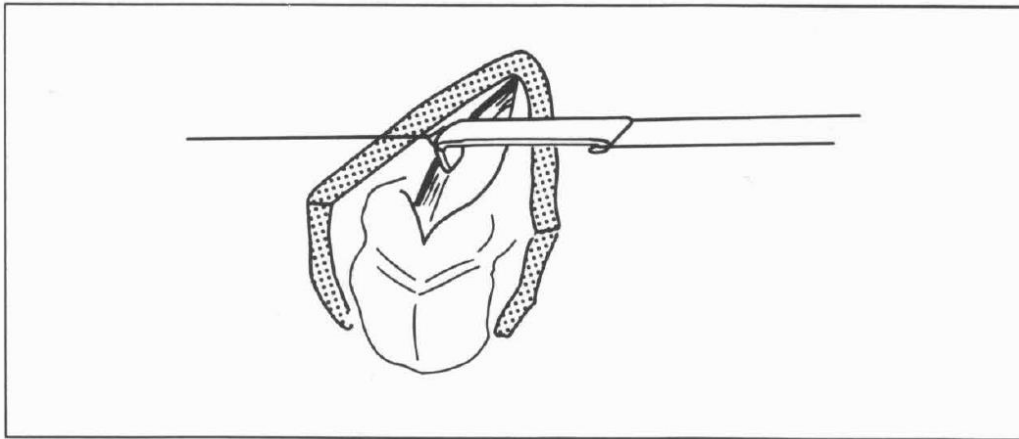
Tanabe a kol. (1979) měřili poměrné tlumení na preparátech lidských hrtanů, které byly získány po pitvě nebo po operaci. Poměrné tlumení je bezrozměrná veličina, která charakterizuje pokles tlumení po excitaci systému. Souvisí s tlumením následujícím vztahem (Kopečný, 2008)

$$\lambda = e^{bT_t}, \quad (20)$$

kde λ je poměrné tlumení, b je součinitel tlumení a T_t je perioda dvou po sobě jdoucích amplitud.

Je to jeden z faktorů, který charakterizuje vibrační vlastnosti hlasivek. Dosahuje hodnot od 0 do 1. Pokud je poměrné tlumení rovno 0, kmitání je netlumené, pokud je rovno 1, systém se vrátí zpět do rovnovážné polohy bez kmitání. Při vysokých hodnotách poměrného tlumení hlasivky kmitají obtížně, při nízkých hodnotách kmitají nepravidelně.

Supraglotická část hrtanu byla odstraněna pro lepší viditelnost hlasivek. Blanitá část hlasivek byla vychýlena do strany pomocí kovového plátu, který držel na místě pomocí provázku a gumičky. Jakmile byl provázek přeříznut, kovový plát odletěl, a hlasivky začaly kmitat. Kmitání hlasivek bylo zaznamenáno pomocí vysokorychlostní kamery s frekvencí snímání 6000 snímků za vteřinu. Hodnota tlumení oscilací hlasivek byla zajištěna analýzou jednotlivých snímků záznamu. Aby se hrtan nepohyboval během měření, byla prstencová chrupavka pevně upevněná pěti ostrými šrouby, a chrupavka štítná byla zafixována sádrou. Nastavení experimentu je ukázáno na obrázku 6.



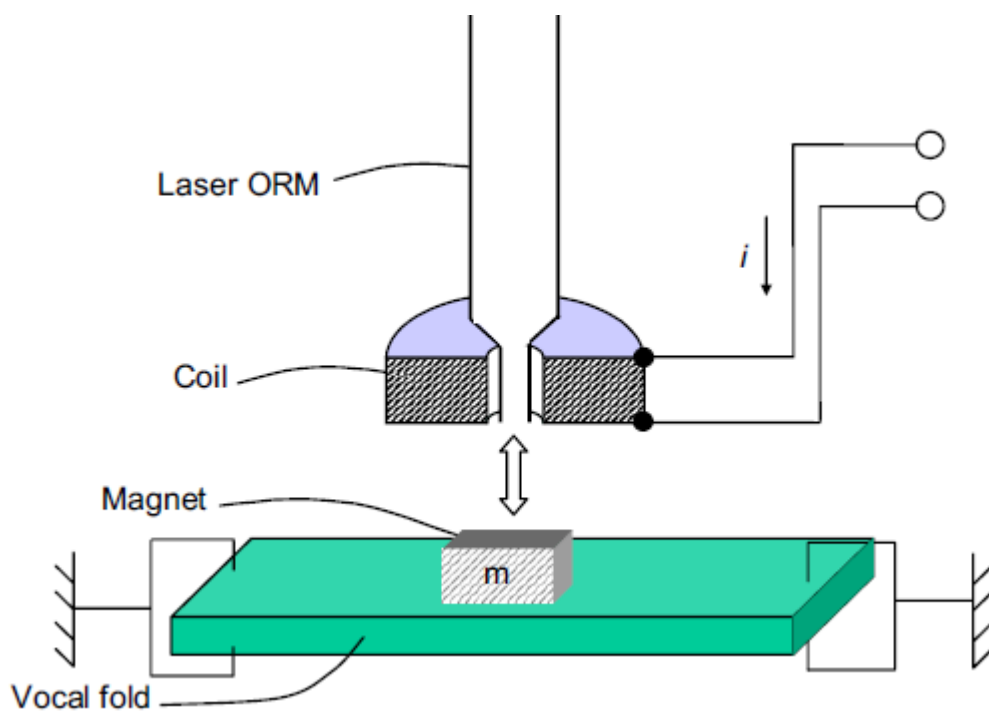
Obrázek 6: Nastavení Tanabeho experimentu (Tanabe, 1979).

Během experimentu byl zkoumán vliv hmoty na tlumení, což bylo realizováno vstříknutím fyziologického roztoku do hlasivek. Dále byly vypočítány hodnoty tuhosti a odporu hlasivek při známé hodnotě základní frekvence. Pro případ hrtanu vypreparovaného po pitvě byla naměřena hodnota poměrného tlumení 0,237. Po vstříknutí 120 ml fyziologického roztoku se hodnota zvýšila na 0,344. V případě hrtanu získaného po operaci byly naměřeny hodnoty 0,320 a 0,344 pro dva hrtany. Vyšší hodnota u chirurgicky získaných hrtanů, oproti hrtanům získaným z pitvy, může být vysvětlena krevním otokem, který vznikl během operace.

3. 1. 2. Garrel a kol.: Optoreflectometry Determination of the Resonance Properties of a Vocal Fold

V této práci Garrel a kol. (2007) zkoumali hlasivky vypreparované z hrtanu, aby zabránili interferenci hrtanových struktur při externí excitaci. Excitace i detekce kmitajících hlasivek probíhala bezkontaktně pomocí elektromagnetického pole a optoreflectometrie.

Na vypreparovanou hlasivku, která byla upevněna na testovací stůl, byl lepidlem přilepen malý magnet. Nad přilepený magnet byla umístěna cívka, která byla připojena ke generátoru signálů. Generátorem byl vysílán frekvenčně rozmítaný, trojúhelníkový signál v rozsahu od 0 Hz do 200 Hz během 10 sekund. Cívkou byla obepínána optická vlákna laserového optoreflectometru, který byl použit k detekci amplitudy kmitajících hlasivek.



Obrázek 7: Experimentální nastavení pro excitaci elektromagnetickým polem (Garrel, 2007).

Po zapnutí generátoru rozmítaného signálu byl magnet periodicky přitahován a odpuzován elektromagnetickou silou cívky, čímž se rozkmitaly hlasivky. Optoreflektomer detekoval změnu amplitudy kmitajících hlasivek. Toto bylo provedeno dvakrát, poprvé pro jeden magnet a podruhé pro dva magnety stejné hmotnosti.

Výsledky byly zaznamenány ve formě grafu, kde byla zanesena relativní amplituda hlasivek v závislosti na buzené frekvenci. Byly nalezeny dvě rezonanční frekvence s odlišnou relativní amplitudou. Matematicky poté byla vypočítána rezonanční frekvence hlasivky bez magnetu, a z této hodnoty byl poté určen Q faktor $Q = 8,03$. Pro porovnání byla provedena matematická simulace celého experimentu, kde $Q = 12,01$.

Tato metodika má však několik omezení. Protože se jedná o metodu *ex vivo*, tak nelze zkoumat vliv nervové kontroly a svalového napětí. Dále byly touto metodou zkoumány prasečí hlasivky, jejichž vlastnosti se můžou od těch lidských lišit.

3. 2. In vivo metody

3. 2. 1. Švec a kol.: Resonance properties of the vocal folds: In vivo laryngoscopic investigation of the externally excited laryngeal vibrations.

V tomto článku (Švec J.G. a kol., 2000) byl hlavním zaměřením výzkum rezonančních vlastností hlasivek pomocí laryngoskopie živého hrtanu na jednom mužském subjektu. Hlasivky byly excitovány pomocí upraveného shakeru, s válcovou hlavou z plexiskla. Tento shaker byl připevněn k hrtanu z vnější strany krku živého subjektu na chrupavku štítnou, avšak ne příliš pevně z bezpečnostních důvodů. Subjekt provedl Kanekův manévr, tedy uvedl hlasivky do fonační polohy, ale nefonoval.

Shaker byl skrze zesilovač připojen ke generátoru vibrací. Tělo shakeru bylo upevněno na kovovou tyč, takže se během vibrací ohýbala. Ohnutí tyče bylo měřeno tenzometrem, což umožnilo znát přesnou přítláčnou sílu, s jakou působí shaker na krk. Bylo zjištěno, že optimální přítláčná síla, která nepůsobí subjektivně nepříjemně se pohybovala kolem 3-5 Newtonů.

K pozorování hlasivek byly použity dvě metody, strobolarýngoskopie a vysokorychlostní videokymografie. Strobolarýngoskopie sloužila k zobrazení vibračních módů hlasivek a hrtanových struktur během excitace konstantní frekvencí. Videokymografie sloužila ke zjištění rezonanční frekvence hlasivek, které byly excitované frekvenčně rozmítaným signálem od 100 Hz do 400 Hz a od 50 Hz do 200 Hz. Každý signál trval 5 vteřin. Měřicí oblast videokymogramu byla zaměřena na prostředek membránové části hlasivek.

K analýze byly zvoleny zaostřené videonahrávky s dobře provedeným Kanekého manévrem, kde byl viditelný rozkmit hlasivek po celou dobu nahrávání. Video bylo poté rozděleno na 250 bitmapových obrázků. Poté bylo nahuštěno každých 20 bitmapových obrázků do jednoho, čímž byl vytvořen časový průběh 400 ms zobrazující měřicí oblast videokymogramu. Z nich, pomocí softwaru, byla zjištěna maximální výchylka během excitace, a to ve formě x,y souřadnic, kde x bylo vychýlení a y byl čas v milisekundách. Stroboskopické záznamy byly zpracovány ručně v grafickém softwaru tak, aby zobrazovaly extrémy během excitace, a tedy vibrační módy.

Výsledky z videokymografie byly vyneseny do grafu a vyhlazeny Kernelovým algoritmem. U grafu se poté hodnotilo umístění největší výchylky na frekvenční ose, symetričnost a tvar píku. Pro základní frekvenci fonace 110 Hz byly naměřeny rezonanční frekvence pro levou hlasivku 114 Hz, 171 Hz a 241. Naměřené rezonanční frekvence pro pravou hlasivku byly 100 Hz, 164

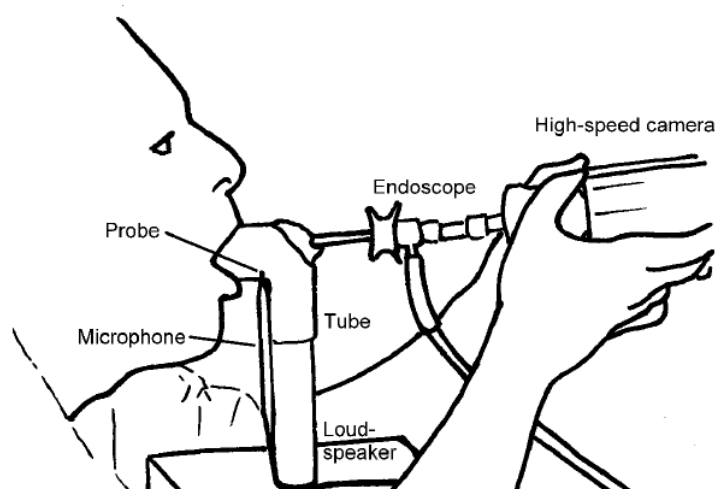
Hz a 238 Hz. Výsledné rezonanční frekvence pro levou hlasivku se nachází ve vzájemném poměru 2:3:4.

U strobolaryngoskopických výsledků byl hodnocen tvar hlasivek během vibrace a také přiřazení tvaru vibračnímu módu. Módy byly rozlišeny v jednom rozměru, a byly označeny jako x-1, x-2 a x-3, kde x značí rovinu pozorování, a čísla 1,2 a 3 značí počet půlvln, které vznikaly během excitace.

Ukázalo se, že tato metodika poskytuje velmi detailní pohled na kmitající hlasivky, neboť k nalezeným rezonančním frekvencím pomocí videokymografie, můžeme přiřadit vibrační mód ze strobolaryngoskopie. Nevýhodou však bylo manuální měření dat, které výrazně prodloužilo dobu výzkumu. Metoda se však zdá velmi vhodná pro budoucí použití.

3. 2. 2. Hertegård a kol.: Vocal fold resonances at low and high pitch tuning.

Tento článek byl inspirován předchozím experimentem Švece a kol. (kapitola 3. 2. 1.). V tomto článku (Hertegård S. a kol, 2003) zkoumali rezonanci hlasivek při hlubokém a nízkém ladění, tedy při takovém napětí hlasivek, kdy člověk zpívá hlubokým a vysokým tónem. K tomu byly vybrány 4 mužské subjekty, zdraví nekuřáci. Tři z nich byli profesionálními zpěváky (soprán, mezzosoprán a baryton) a čtvrtý byl amatérský zpěvák (baryton). Úkolem subjektů bylo provést Kanekův manévr. Toto provedli pro pohodlnou fonaci, kterou si subjekty volily sami, a pro fonaci o oktávu výš.



Obrázek 8: Nastavení experimentu (Hertegård, 2003).

Subjekty obejmuly ústy plastovou trubku, ve které byl namontován laryngoskop, ke kterému byla připojena vysokorychlostní videokamera. Excitaci hlasivek zajistil hlasitý reproduktor, který produkoval sinusový, frekvenčně rozmítaný signál od 500 Hz do 100 Hz pro ženy a od 250 Hz do 50 Hz pro muže, a to během 3 sekund, aby se nepřesáhla čtyřsekundová záznamová kapacita kamery. Reproduktor byl uzavřen tak, aby se jeho signál šířil do plastové trubice v ústech. Mikrofonem byla kontrolována hladina akustického tlaku.

K analýze dat byl použit software High Speed Toolbox, který dokáže detekovat okraje hlasivek, a tím získat průběh kmitání hlasivek. Je ovšem potřeba manuální kontroly. Z výsledků plyne, že se rezonanční frekvence nachází blízko základní frekvenci nebo níž v případě barytonu. Tato metodika se zdá být vhodná pro studium rezonančních vlastností hlasivek. Analýza dat je však časově náročná. Dále je vyžadováno, aby byly subjekty schopny vykonat Kanekův manévr.

Experimentální část

Tato část bude zaměřena zejména na metodiku použitou při zkoumání rezonančních vlastností hlasivek u preparátu hrtanu. Bude popsáno experimentální uspořádání, použitá metodika, sběr a analýza dat.

Cílem tohoto experimentu, a celé bakalářské práce, je zjistit, zdali je metoda externí excitace vhodná ke zkoumání rezonančních vlastností hlasivek a vytvořit metodiku pro měření těchto vlastností, která bude sloužit v budoucnu pro zkoumání vlastností hlasivek. Byly zkoumány hlasivky vypreparovaného jeleního hrtanu. Hlasivky byly nejprve rozfonovány vzduchem, aby byla nalezena jejich frekvence kmitání. Poté byly externě excitovány pomocí mechanického shakeru, pomocí kterého byl rozmítaným signálem na hlasivky přenesen široký rozsah frekvencí. Pozorování takto rozkmitaných hlasivek bylo provedeno pomocí vysokorychlostní kamery. Video je v podstatě série obrázků, které se přehrávají s určitou rychlostí. Tyto obrázky bylo možné rozdělit na řádky, z nichž byl vybrán jeden, který byl pozorován. Všechny tyto řádky ze všech obrázků videa byly položeny za sebe, a tím byl získán digitální kymogram (DKG). Ten byl následně analyzován pomocí softwaru ImageJ, kde byly hledány velikosti výchylek v čase. Všechny výchylky byly poté zaneseny do grafu, který zobrazoval změnu výchylky v čase, respektive frekvenci. Z grafu byla poté získána rezonanční frekvence a šířka rezonance.

4. Experimentální uspořádání:

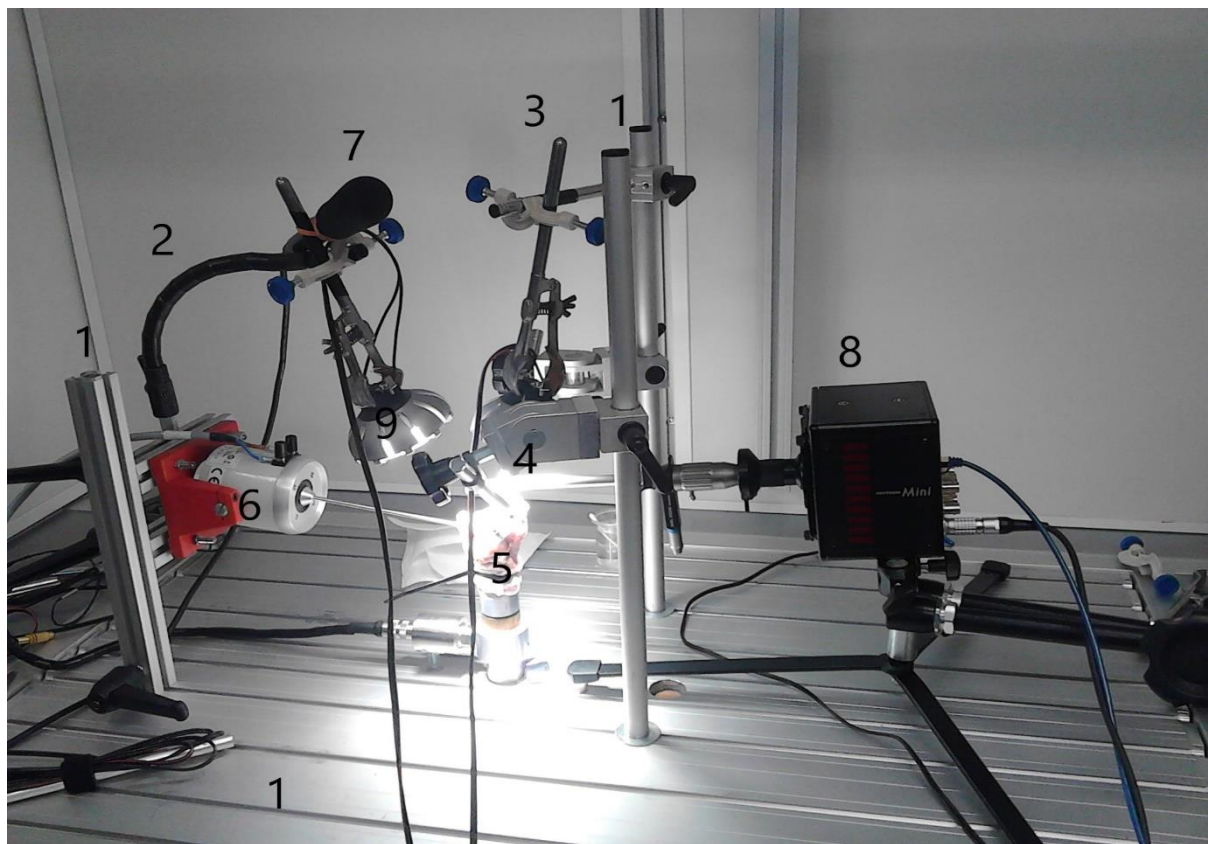
Tato kapitola popíše hlavně rozmístění pomůcek pro pozorování externí excitace pomocí vysokorychlostní kamery. Budoucí výzkumníci tak budou moci použít stejné uspořádání, nebo si jej přizpůsobit podle svých potřeb, podle měřených veličin či použitých hlasivek.

4.1 Pomůcky a jejich rozmístění:

Použité pomůcky lze rozdělit do tří částí, kostra zařízení, jejíž funkcí bylo uchytávat ostatní komponenty experimentu na místě, excitační část a detekční část. V tabulce 1 jsou pro přehlednost uvedeny všechny použité pomůcky.

Jako kostra zařízení byla použita stavebnice Kanya (<http://www.kanya.cz>). Jedná se o hliníkový konstrukční systém, který má vysokou variabilitu použití. Z ní byl sestaven stůl, na kterém

probíhal experiment (Obrázek 9). Dále byli k dispozici držáky a úchyty. Jejich použití bude popsáno níže.

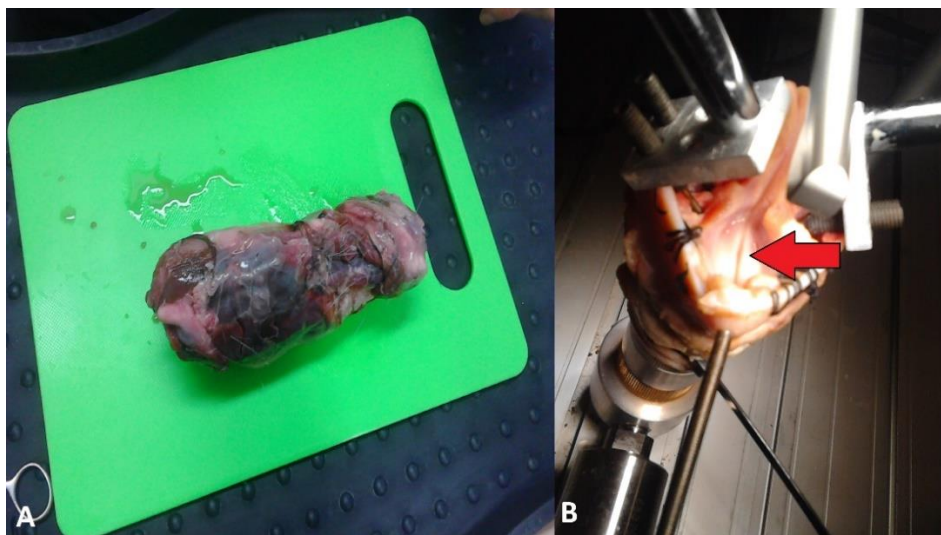


Obrázek 9: Fotografie experimentální sestavy. 1 – stavebnice Kanya, 2 – ohebný držák na mikrofon a LED lampu, 3 – držák na LED lampu, 4 – dva bodce na kloubových držácích, 5 – hrtan s hlasivkami, 6 – mechanický shaker, 7 – mikrofon, 8 – vysokorychlostní kamera s laryngoskopem, 9 – LED lampa.

Tabulka 1: Seznam použitých pomůcek. Čísla slouží pro označení částí v obrázku 8.

Kostra experimentu	Stavebnice Kanya (stůl, 3 hranoly, 2 opěrné tyče) (1)
	Ohebný držák na mikrofon a LED lampu (2)
	Držák druhé LED lampy (3)
	Dva bodce na kloubových držácích (4)
Excitační část	Hlasivky (5)
	Mechanický shaker (6)
	Zesilovač
	Notebook
	Model subglotického traktu
Detekční část	Mikrofon (7)
	Vysokorychlostní kamera s laryngoskopem (8)
	LED lampy připojené k autobaterii (9)
	PC1
	PC2

Pro excitaci byl použit preparát jeleního hrtanu (obrázek 10A). Hrtan byl obdržen díky spolupráci s lesníky z Vojenských lesů a statků z jelenů, kteří byli odloveni během lovné sezóny. Hrtan s přilehlými tkáněmi byl vypreparován, nárazově zmražen pomocí tekutého dusíku a poté uchován v mrazáku při teplotě $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Před experimentem byl rozmražen umístěním do kádinky s mírně vlažnou vodou. Po jeho rozmražení byly od něj pomocí skalpelu na plastové podložce odřezány přebytečné tkáně, jako jsou svaly a jícen, (Herbst a kol., 2017). Byl odříznut také kus průdušnice tak, aby zůstala část asi 2–3 cm pod hlasivkami, což sloužilo pro zasazení do modelu subglotického traktu (viz níže). Dále byla odřezána hrtanová příklopka, a vrchní část chrupavky štítné, tedy ta, která obsahuje tzv. „rohý chrupavky štítné“. Dále bylo potřeba odřezat ventrikulární řasy, aby byly odhaleny hlasivky. Aby nedošlo k poškození hlasivek při odřezávání, byly zbylé části ventrikulární řasy přišity k chrupavce (obrázek 10B)



Obrázek 10: A) Jelení hrtan s přilehlými tkáněmi po rozmražení.

B) Vypreparovaný hrtan s obnaženými hlasivkami, zasunutý v ústí modelu subglotického traktu a bodci upevněn ve fonační poloze. Přibližně uprostřed obrázku lze vidět kontakt hrtanového výběžku se závitovou tyčí. Šipkou je ukázáno místo, kde se hlasivky dotýkají.

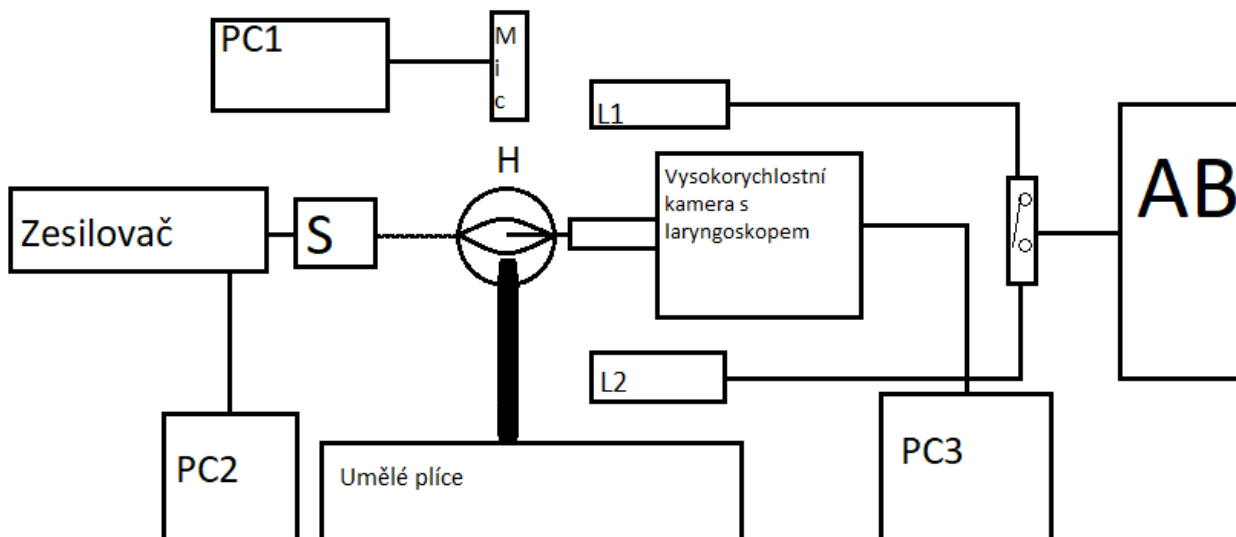
Stůl měl uprostřed otvor, ze kterého vedl model subglotického traktu (Hampala a kol., 2013). Tento model simuloval prostředí průdušnice. Dále byl k němu připojen rezervoár vzduchu – barel, který byl vyplněn akusticky pohltivým materiálem, a který simuloval prostředí plic. Do barelu byl přiváděn zvlhčený vzduch o teplotě kolem 37 °C trubicí z tlakového hrnce, který byl zčásti naplněn vodou a byl umístěn na zahřívací plotýnce (ROHNSON R241 (1500W)). Do tlakového hrnce byl vzduch vháněn pomocí čerpadla (RESUN LP 100). Teplotu, vlhkost a tlak kontrolovala samostatná soustava čidel, která vypínala a zapínala jednotlivé přístroje umělých plic.

Excitace hlasivek byla provedena pomocí mechanického shakeru (Ling dynamics systém, LDS V203), který byl připevněn třemi hranoly stavebnice Kanya do výšky hrtanu (obrázek 9). Jednalo se o válcový elektro-dynamický generátor vibrací, který byl vybaven kuželovitou špičkou se závitem velikosti 4. Do něj byla umístěná závitová tyč délky cca 10 cm, jejíž konec se dotýkal hrtanového výběžku (obrázek 10B), ke kterému byly připojeny hlasivkové vazy. Shaker byl připojen k zesilovači (LDS PA25E), který byl dodáván s užitým shakerem. Zesilovač byl propojený s notebookem, kde byl nainstalován software Sopran [(Granqvist S. Sopran (Software v. 1.0.20 for Windows) <http://www.tolvan.com/index.php?page=/sopran/sopran.php>: Tolvan Data, Sweden, 2008)]. Tento software sloužil k vytvoření tzv. frekvenčního sweepu, neboli frekvenčně rozmítaného signálu.

K detekci kmitajících hlasivek byla použita vysokorychlostní kamera Photron (typ Fastcam Mini AX100 54 s pamětí 16 GB), která stála na trojnožce za hlasivkami a na jejíž objektiv [Endoskopický "C-mount" adaptér (GE Measurement & Control, Type CCF45, 45mm)] byl připevněn laryngoskop (Lupen-laryngoskop, 8707 DA Karl STORZ, 10mm, 90°), který umožňoval pozorovat hlasivky pod 90° úhlem. Kamera měla nastavené rozlišení 864x384 pixelů a rychlost snímkování 7200 snímků/s. Pomocí kabelů byla kamera propojena s počítačem na druhé straně místnosti. Dále mikrofonom (MicW M 416) byl zaznamenán zvuk při experimentu, který byl nahrán přes externí USB zvukovou kartu (FOCUSRITE Scarlett 2i2) a analogově-digitální převodník Blackmagic. Mikrofon byl upevněn pomocí ohebného držáku ve vzdálenosti cca 20 cm nad hlasivkami. Zvukový záznam byl poté analyzován pomocí programu Praat (Boersma, Paul & Weenink, David (2018). Praat: doing phonetics by computer [Computer program]. Version 6.0.37, retrieved 4 February 2018 from <http://www.praat.org/>).

Nasvícení bylo nezbytné pro pořízení dobrého záznamu kmitajících hlasivek. K tomu nám posloužily dvě LED lampy (Verbatim, model 52204 AR111G53 15W 4000 K NW 880LM), které byly umístěny nad hlasivkami. Jedna byla upevněna na ohebném držáku vedle mikrofону, druhá byla upevněna držákem na jedné ze dvou tyčí. Obě lampy byly spojeny jedním spínačem, který byl připojen k autobaterii (Magnetic 12V 60 Ah 480A) pod stolem.

Na stole u experimentální sestavy byla položena kádinka se solným roztokem, kterým byly hlasivky udržovány vlhké, protože LED lampy vyzařují teplo, které hlasivky vysušují. Hlasivky byly zvlhčovány vatovou tyčinkou. Na obrázku 11 lze vidět schematický plán uspořádání celého experimentu.



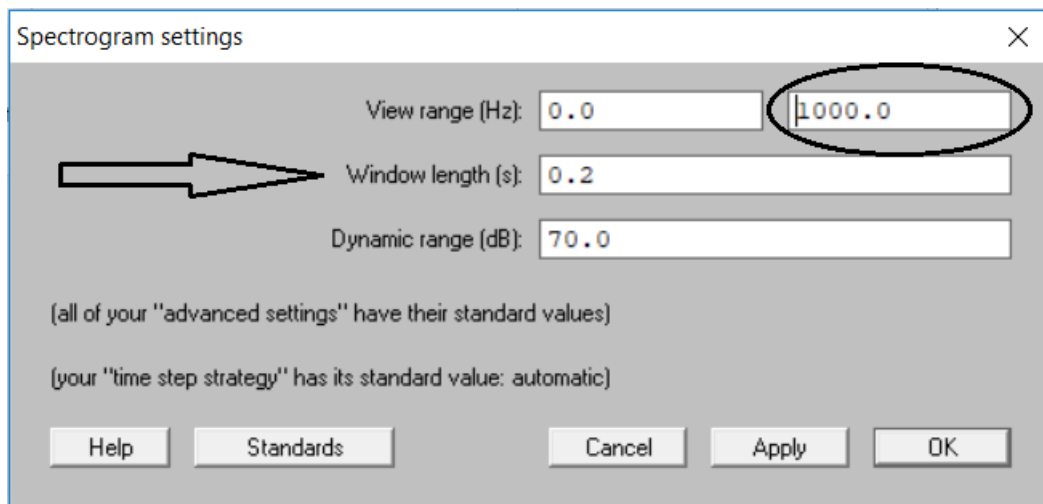
Obrázek 11: Schéma experimentální soustavy. H – hrtan, S – Shaker, L1, L2 – LED lampy, PC1, PC2, PC3 – počítače, AB – autobaterie, Mic – Mikrofon

5. Metodika

5.1 Odečítání základní frekvence hlasivek

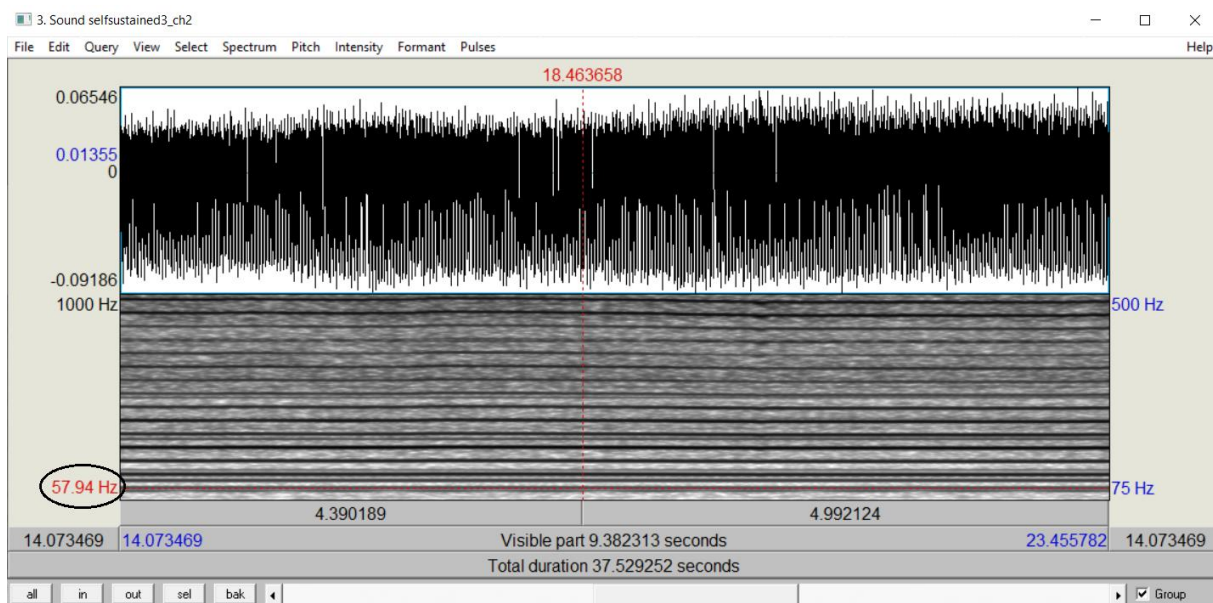
Připravené hlasivky, upevněné na experimentální sestavě byly původně v respirační poloze, tedy v takové, kdy byly obě hlasivky od sebe vzdálené. Pokud by takovými hlasivkami procházel vzduch, nevznikal by žádný zvuk, a proto bylo nutné dát hlasivky do fonační polohy. To bylo provedeno držáky se dvěma ostrými hroty, které byly umístěny do výběžků arytenoidních chrupavek tak, aby se hlasivky k sobě na dotek přiblížily (Obrázek 10B). Takto upraveným hrtanem byl přiveden proud vzduchu z umělých plic k ověření pravidelnosti fonace. Fonace byla nahrána mikrofonem a z nahrávky pak byla odečtena základní frekvence, a to pomocí softwaru Praat (viz níže) a to k účelu porovnání s rezonanční frekvencí, získanou externí excitací, a zároveň sloužila k ověření toho, jestli se během experimentu uchycení hrtanu nijak neposunulo, a tedy nedošlo k porušení fonační polohy.

V počítači, ke kterému byl připojen mikrofon, byl zapnut software Praat a nahrán zvuk fonujících hlasivek. Záznam byl pouze několik sekund dlouhý. Základní frekvence byla odečtena z úzkopásmového spektrogramu (obrázek 13) s parametry uvedenými v obrázku 12.



Obrázek 12: Parametry spektrogramu.

Základní frekvence byla odečtena manuálně, kliknutím doprostřed prvního tmavého pruhu spektrogramu. Pomocí funkce „Pitch analysis“ byla poté tato hodnota ověřena a zpřesněna.



Obrázek 13: Odečítání základní frekvence kmitání hlasivek. V kolečku je označena hodnota základní frekvence kmitání hlasivek excitovaných vzdušným proudem z umělých plic.

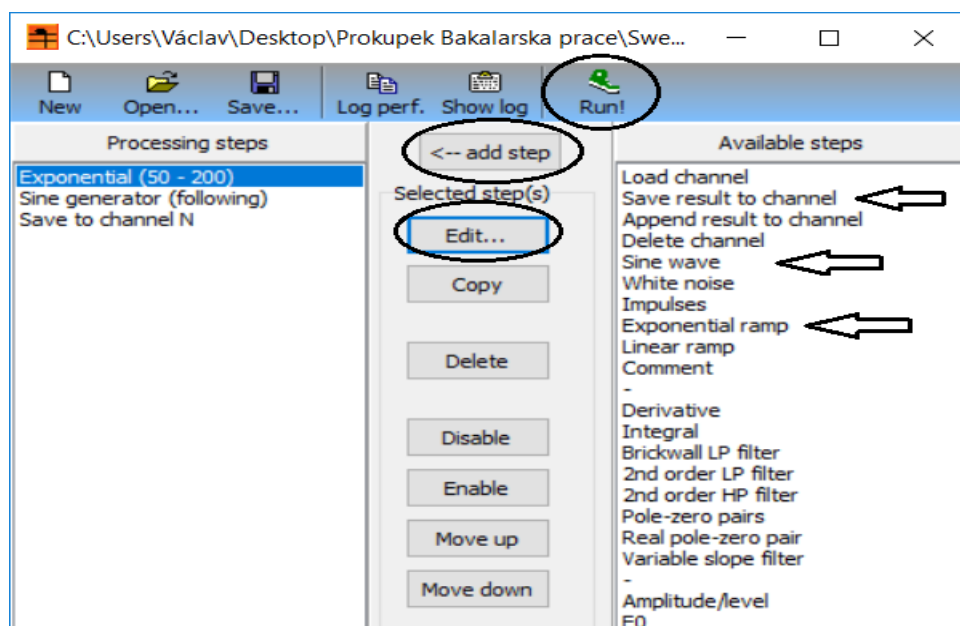
5.2 Externí excitace

Experiment s externí excitací probíhal následovně. Byl zapnut počítač, ke kterému byla připojena vysokorychlostní kamera a také notebook s programem Sopran. V programu Sopran byl vytvořen frekvenční sweep, neboli frekvenčně rozmítaný signál. Byly použity dva

frekvenční sweepty sinusového signálu, které měnily svou frekvenci v rozsahu od 50 Hz do 200 Hz a naopak, exponenciálně, a to v rámci 4,5 s. Doba trvání 4,5 s vyplývá z maximální možné délky záznamu vysokofrekvenční kamery při nastaveném rozlišení a snímací frekvenci, která byla 5 vteřin.

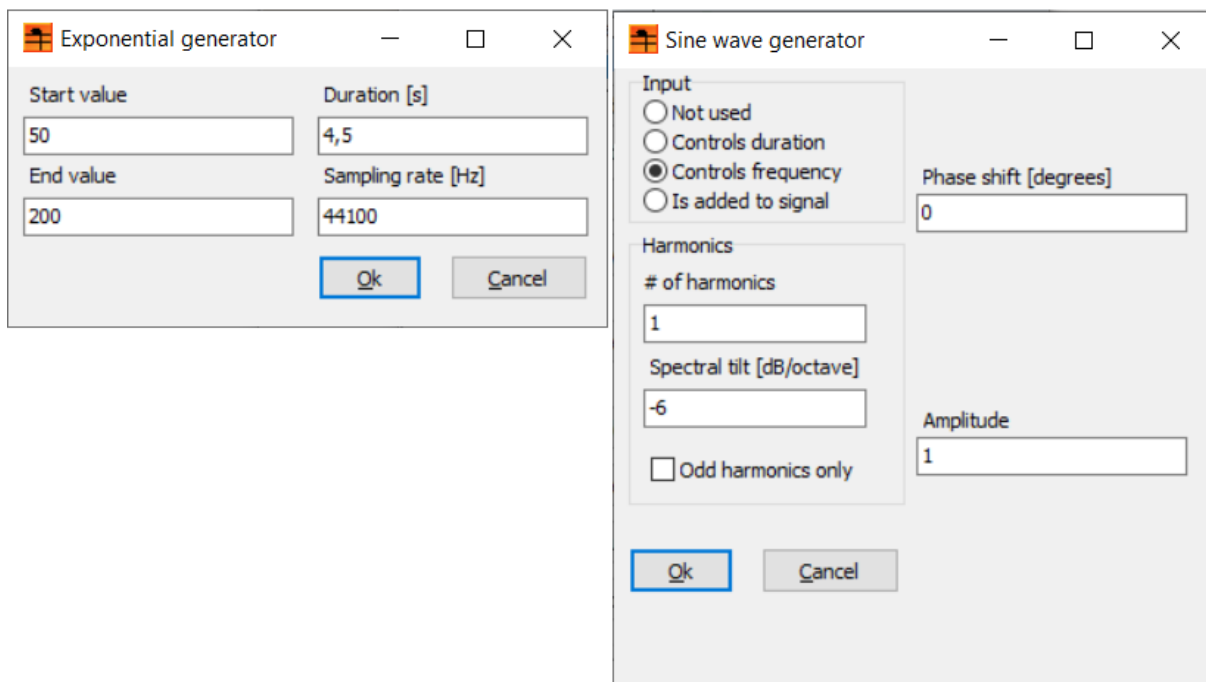
5.2.1. Vytvoření frekvenčního sweepu

Pomocí programu Sopraan byl editován proces, který se skládal z několika kroků (Obrázek 14). Prvním krokem byla „exponential ramp“. Parametry byly nastaveny od 50 Hz do 200 Hz. Trvání bylo nastaveno na 4,5 s.



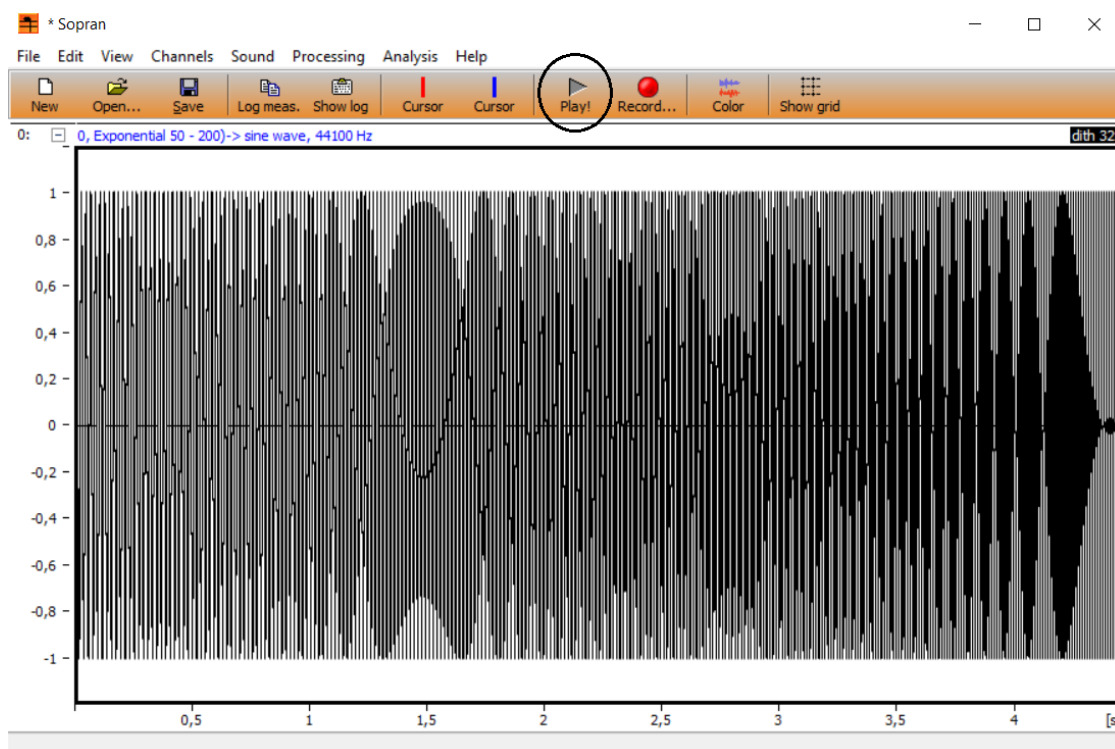
Obrázek 14: Editační okno k vytvoření exponenciálního sweepu pomocí software Sopraan. Šípkami jsou označeny procesy, které byly použity. V kolečkách jsou tlačítka, jejichž použití je popsáno v textu.

Druhým krokem je „sine generator“. Jedná se o generátor sinusového signálu. Tento signál měnil svoji frekvenci podle nastavené „exponential ramp“. Parametry „exponential ramp“ a „sine wave generator“ jsou uvedeny na obrázku 15.



Obrázek 15: Editační okna exponenciálního růstu (nalevo) a generátoru sinusového signálu (napravo). Informace ve výše i níže popsaných odstavcích jsou již zadány.

Posledním krokem byl „Save to channel N“, který uložil proces do kanálu, kde bylo možné výsledný signál přehrát (Obrázek 16). Obdobně byl vytvořen frekvenční sweep od 200 Hz do 50 Hz.



Obrázek 16: Výsledný exponenciální sweep sinusového signálu od 50 Hz do 200 Hz během 4,5 s. V kolečku je tlačítko, kterým lze sweep přehrát, pokud není nutné použít hudební program.

5. 2. 2. Aplikace sweepu na hlasivky

Jakmile byl vytvořený frekvenční sweep, bylo možné přejít k samotné metodě externí excitace. Sweep byl přehrán buďto přímo v programu Sopran, nebo pomocí uloženého wav souboru z libovolného hudebního přehrávače. Notebook přenášel sweep přes zesilovač do shakeru. Zapnutím nahrávky bez kontaktu shakeru s hrtanem bylo zkontrolováno, zdali se tak skutečně stalo.

Zkontrolovalo se také zapojení vysokorychlostní kamery, kterou obsluhoval školitel. K provedení samotného experimentu bylo zapotřebí dvou osob, mě a školitele. Já jsem obsluhoval frekvenční sweep a školitel nahrávání videozáznamu. Synchronizace byla důležitá, aby byl frekvenční sweep zaznamenán v celém svém průběhu v rámci omezeného trvání záznamu vysokorychlostní kamery. Konec závitové tyče ze shakeru byl přiložen k chrupavce hrtanu. Zároveň byl spuštěn frekvenční sweep a nahrávání videozáznamu. Obdobně byl postup zopakován pro druhý sweep.

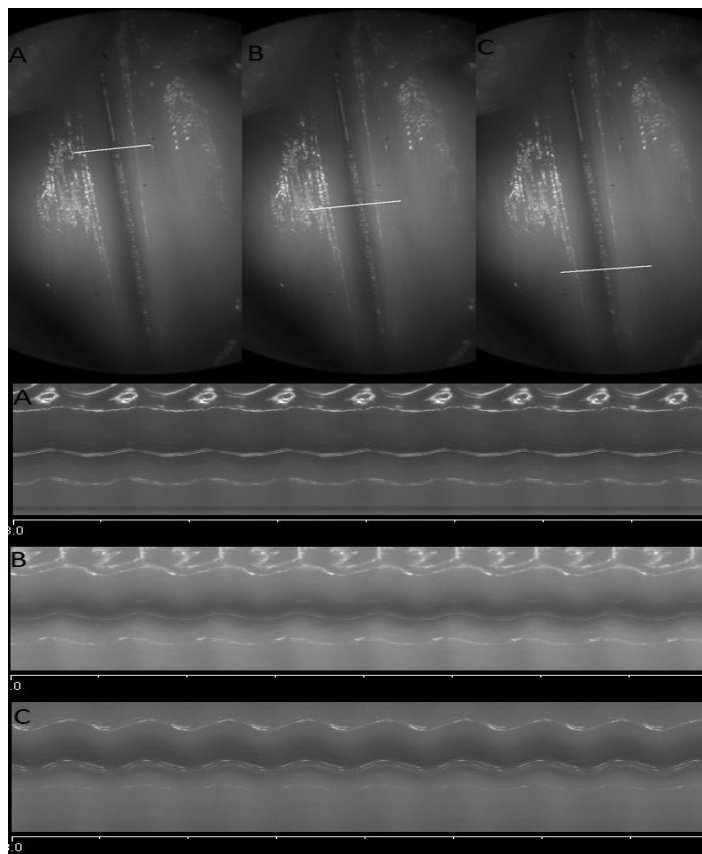
Mezi každou částí experimentu byly hlasivky fonovány proudem vzduchu z modelu subglotického traktu, a byla pořízena zvuková nahrávka, která byla analyzována v programu Praat (viz výše). Toto bylo prováděno z toho důvodu fixace hrtanu v aparatuře a ve fonační poloze. Narušení fonační polohy by mělo za následek jiné kmitání hlasivek, a nemusely by se tak projevy jejich kmity.

6. Analýza dat

Aby bylo možné zkoumat vibrační vlastnosti hlasivek, byl vytvořen z videozáznamu digitální kymogram, ze kterého bylo možné odečíst amplitudu kmitání hlasivek a z nich vypočítat amplitudu rychlosti. Ze souboru amplitud rychlosti hlasivek, které byly zaneseny do grafu v závislosti na frekvenci, byla určena rezonance, kterou byla popsána rezonančními vlastnostmi, jako je šířka rezonance, tlumení, relaxační doba a faktor kvality. Amplituda byla změřena pomocí programu ImageJ, odtud byly hodnoty zaneseny do programu Microsoft Excel a zde byl vytvořen graf změny amplitud v závislosti na frekvenci.

6.1. Digitální kymogram (DKG)

K tvorbě DKG z videozáznamu nám posloužil skript CogBioCreateKymogram napsaný v programu MATLAB Dr. Christianem Herbstem (dostupný na www.christian.herbst.org). Do programu se nahrál pořízený videozáznam. Nakreslila se čára, podle které se vytvořil DKG (obrázek 17). Spustil se skript a vytvořilo se 10 DKG, z nichž každý zobrazoval záznam dlouhý 0,5 vteřiny. Toto bylo provedeno pro každou tři částí hlasivek, pro oba frekvenční sweepy. Dohromady bylo získáno 60 DKG snímků.



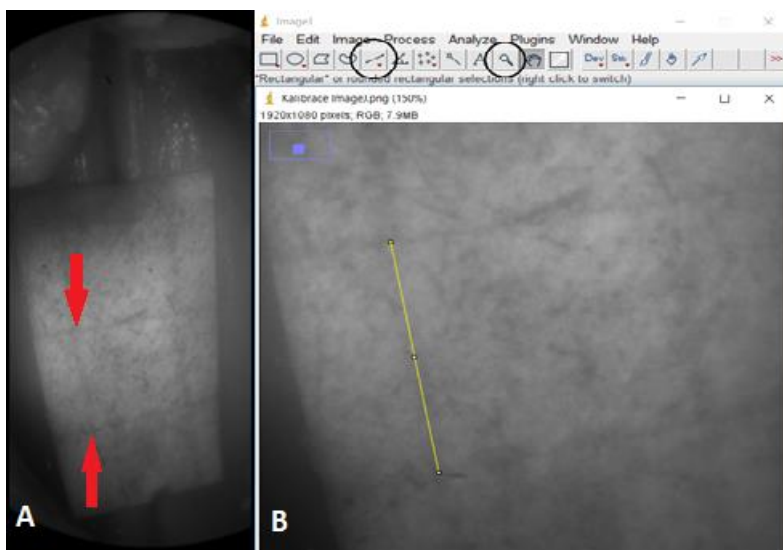
Obrázek 17: Vybraná místa zájmu pro vytvoření DKG. Napravo (A) a nalevo (C) je označena část v $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$ délky glottis, kde by se měly nacházet kmitny při druhém vibračním módu. Uprostřed (B) je označeno místo, kde by se měl nacházet uzel při druhém vibračním módu nebo kmitna při prvním vibračním módu.

7.2. Analýza kymogramů v ImageJ

Nyní je cílem získat z kymogramů informaci o měnící se výchylce hlasivek během aplikace frekvenčního sweepu. Výchylka je veličina, která se mění v čase, proto je snahou získat informaci o velikosti výchylky, a také o její poloze v čase, abychom ji mohli přiřadit k určité frekvenci frekvenčního sweepu.

K tomuto byl použit program ImageJ (Schneider C. A., Rasband W. S., Eliceiri K. W., 2012). Tento program umožňuje analytické zpracování obrazového materiálu. V podstatě jde o převádění pixelové informace na informaci jinou (vzdálenost, čas, obsah apod.). ImageJ byl použit pro zjištění velikosti výchylky a její poloze v čase. Práce s ImageJ byla snadná, ale časově náročná. Pro účely této bakalářské práce by se dala popsat v několika stručných krocích. Nejprve je potřeba určit, kolik pixelů odpovídá reálné vzdálenosti neboli je nutné nastavit měřítko. Poté by byl zvolen nástroj, kterým budeme měřit. Naměřené hodnoty poté uložíme v příslušném formátu, se kterým chceme pracovat.

Pro to, abychom dokázali určit, kolik pixelů odpovídá nějaké vzdálenosti, je potřeba vyrobit něco na způsob standartu. Na hlasivky byl položen čtverečkový papír, kde strana jednoho čtverečku odpovídá 0,5 cm (viz obrázek 18A).



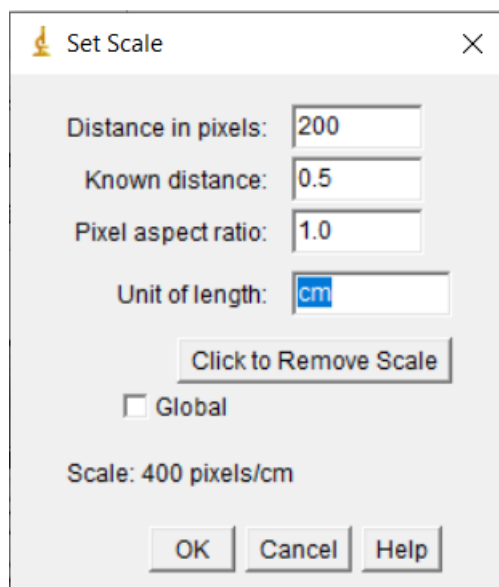
Obrázek 18: A) Použití čtverečkového papíru pro nastavení měřítka ImageJ.
B) Proces nastavení měřítka. V kolečkách jsou ukázány nástroje "straight" a "magnifying glass". Žlutá úsečka, která obtahuje jednu stranu čtverečku je vytvořena programem ImageJ.

Spustíme program ImageJ a nastavíme měřítko. Na liště nástrojů zvolíme nástroj „magnifying glass“ (ikona lupy) a kliknutím levého tlačítka myši si přiblížíme obrázek na takovou velikost, ze které bude pohodlné odečíst délku jedné strany čtverečku (obrázek 18B).

Na liště nástrojů zvolíme nástroj „Straight“ což je nástroj, který tvoří úsečky. Klikneme a podržíme tlačítko myši na jednom z rohů a potáhneme vznikající úsečku do druhého rohu tak, abychom obtáhli jednu stranu čtverečku. V nabídce „Analyze“ klikneme na možnost „Measure“ nebo stiskneme kombinaci kláves Ctrl + M, čímž program změří, kolik pixelů má úsečka, a to ve sloupci „Length“ v novém okně s názvem „Results“. Celý tento postup opakujeme desetkrát, přičemž měříme i v jiných místech čtverce. Z naměřených hodnot vypočítáme průměr. V našem případě byl výsledek měřítka 400 pixelů/cm.

V nabídce „Analyze“ nyní klikneme na možnost „Set scale“, čímž se nám otevře okno pro zadání parametrů měřítka (obrázek 19). Do okna „Distance in pixels“ napíšeme naměřenou průměrnou hodnotu pixelů. Do okna „Known distance“ napíšeme skutečnou hodnotu vzdálenosti v

centimetrech, tedy 0,5. Program nezná desetinnou čárku, proto napíšeme desetinou tečku. Do okna „Unit of length“ napíšeme jednotku, tedy cm. Položka „Global“ by nám zajistila, že každý další otevřený a změřený záznam, se bude řídit tímto měřítkem. Dole se nám objeví výsledné měřítko.



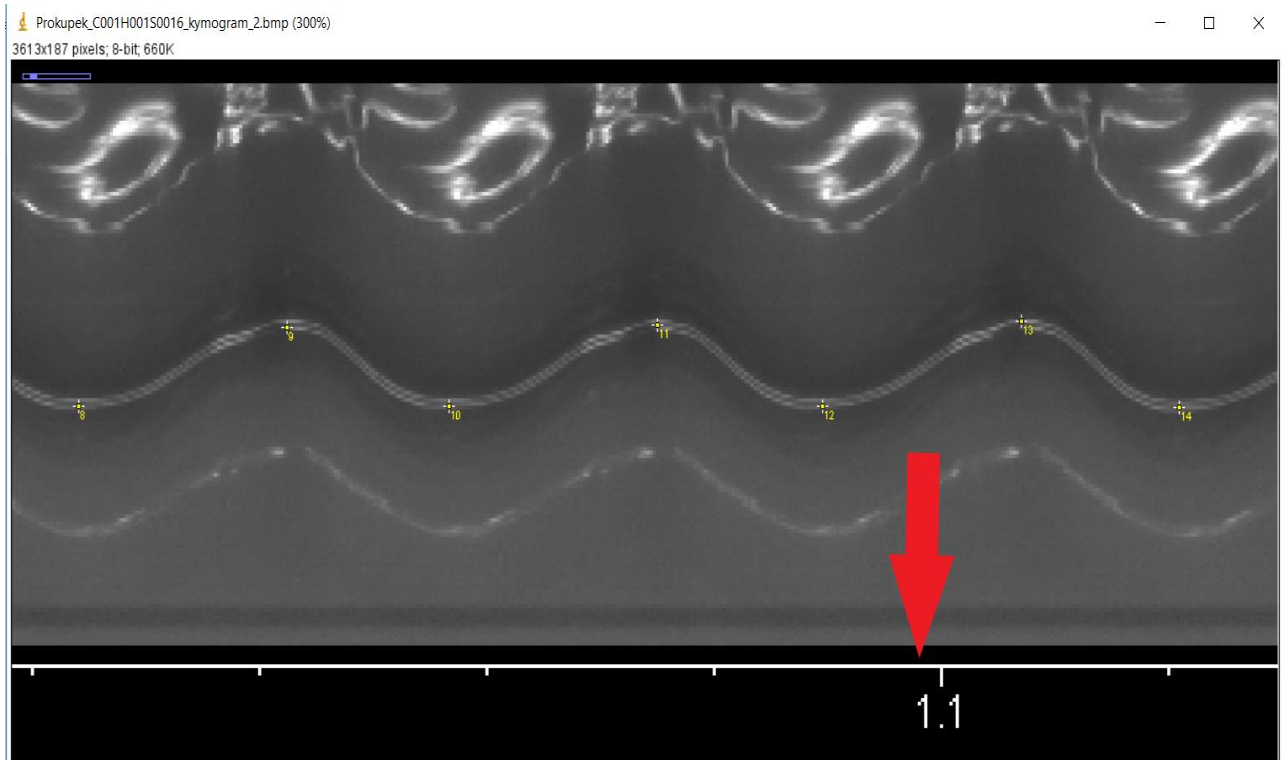
Obrázek 19: Okno s parametry měřítka.

Časové souřadnice byly nastaveny na měřítko 7200 pixelů/s, protože takovou jsme měli snímkovací frekvenci kamery.

Pro odečtení amplitudy kmitání hlasivek v programu ImageJ zvolíme nástroj „Multi-point“. Tento nástroj vytváří body, které mají x-ové a y-ové souřadnice. Jednoduchým klikáním na maxima a minima kmitání hlasivek vytváříme tyto body (Obrázek 20). Body jsou označeny čísly v takovém pořadí, v jakém jsou vytvořeny. Pokud vytvoříme bod jinde, než zamýšlíme, podržením tlačítka Alt a kliknutím na chybně vytvořený bod jej smažeme. Jakmile máme vytvořené všechny body, nastavíme měřítko, podle kterého bude program měřit. Nejprve změříme y-ové souřadnice. Nastavíme měřítko podle výše zmíněného výsledku (400 pixelů/cm) a souřadnice bodů obdržíme buďto kliknutím na nabídku Analyze → Measure nebo kombinací kláves Ctrl + M. Zobrazí se nám okno s výsledky, které uložíme ve formátu .xls. Tabulku také pojmenujeme „ResultsXa“, kde X značí číslo kymogramu (0 – 9) a „a“ značí to, že se jedná o měření amplitudy.

Obdobně provedené měření časových souřadnic. Změníme nyní měřítko na hodnotu 7200 pixelů/s (software neumožňuje zadat jiné měřítko pro x-ové a y-ové souřadnice, proto je třeba měření provést zvlášť). Změříme body a uložíme tabulku stejně, jako v předchozím případě,

pouze s tím rozdílem, že tabulku pojmenujeme „ResultsXb“, kde „b“ značí to, že se jedná o měření časových souřadnic. Toto měření provedeme pro všechny kymogramy ze všech oblastí zájmu u obou sweepů.



Obrázek 20: Příklad odměřování maxim a minim z DKG. Červenou šipkou je označena časová osa.

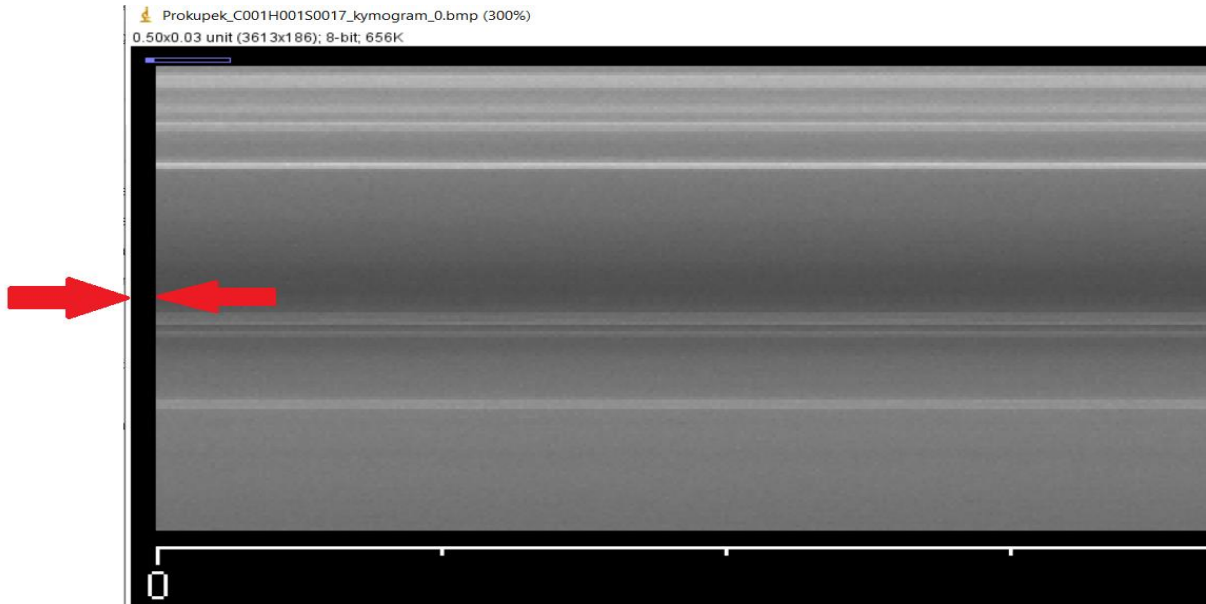
7.3 Analýza dat v Excelu:

Naměřená data máme v souborech ve formátu souřadnic čili první sloupec je x-ová souřadnice a druhý sloupec je y-ová souřadnice. Takových souborů máme 20, 10 pro měření amplitudy a 10 pro měření času (viz kapitola 3.2). Data je potřeba upravit a zkopírovat je do jednoho souboru.

Ze souborů s názvem „ResultsXa“ využijeme pouze y-ové souřadnice, neboť odpovídají výšce měřených bodů od spodní hrany obrázku. Všechna data z y-ového sloupce, postupně od 0. do 9. kymogramu, nakopírujeme do nového souboru. Tam provedeme rozdíly dvou sousedních hodnot, čímž obdržíme amplitudy.

Ze souborů s názvem „ResultsXb“ využijeme pouze x-ové souřadnice, neboť odpovídají časovým souřadnicím bodů. Nejprve musíme hodnoty upravit. Každé hodnotě připočteme

$(X \cdot 0,5 - 0,001)$, kde X je číslo kymogramu. Násobíme číslem 0,5, protože každý kymogram je 0,5 s dlouhý, a odečítáme 0,001, protože každý kymogram má černý okraj, který je 0,001 s dlouhý (Obrázek 21). Takto upravené hodnoty opět nakopírujeme vedle našich hodnot amplitud do nového souboru. Tím dosáhneme toho, že amplitudy budou mít hodnotu v čase.



Obrázek 21: *Temný pruh, který odečítáme od časových souřadnic.*

Nyní potřebujeme přiřadit časovým hodnotám hodnoty frekvence. Víme, jak se nám vyvíjí exponenciální sweep sinusového signálu v čase, a to podle vztahu

$$y = 50 * e^{0,3076*(t-t_0)}, \quad (21)$$

kde t_0 je první časová hodnota. Vztah (20) platí pro frekvenční sweep od 50 Hz do 200 Hz. Pro druhý sweep od 200 Hz do 50 Hz platí obdobný vztah

$$y = 200 * e^{-0,3076*(t-t_0)}. \quad (22)$$

Dále, pro určení šířky rezonance potřebujeme znát amplitudu rychlosti kmitání hlasivek. Tu získáme násobením amplitudy kmitání úhlovou frekvencí kmitání ω , jak bylo uvedeno ve vztahu (18) v teorii. Poté vykreslíme graf závislosti amplitudy rychlosti na frekvenci. Nalezneme maximum, které dosadíme do vztahu (16) a zjistíme hraniční hodnotu rezonanční frekvence. Rozdílem hraničních hodnot zjistíme šířku rezonance. Z šířky rezonance poté vypočítáme podle vztahů (14) a (19) rezonanční veličiny.

8. Výsledky:

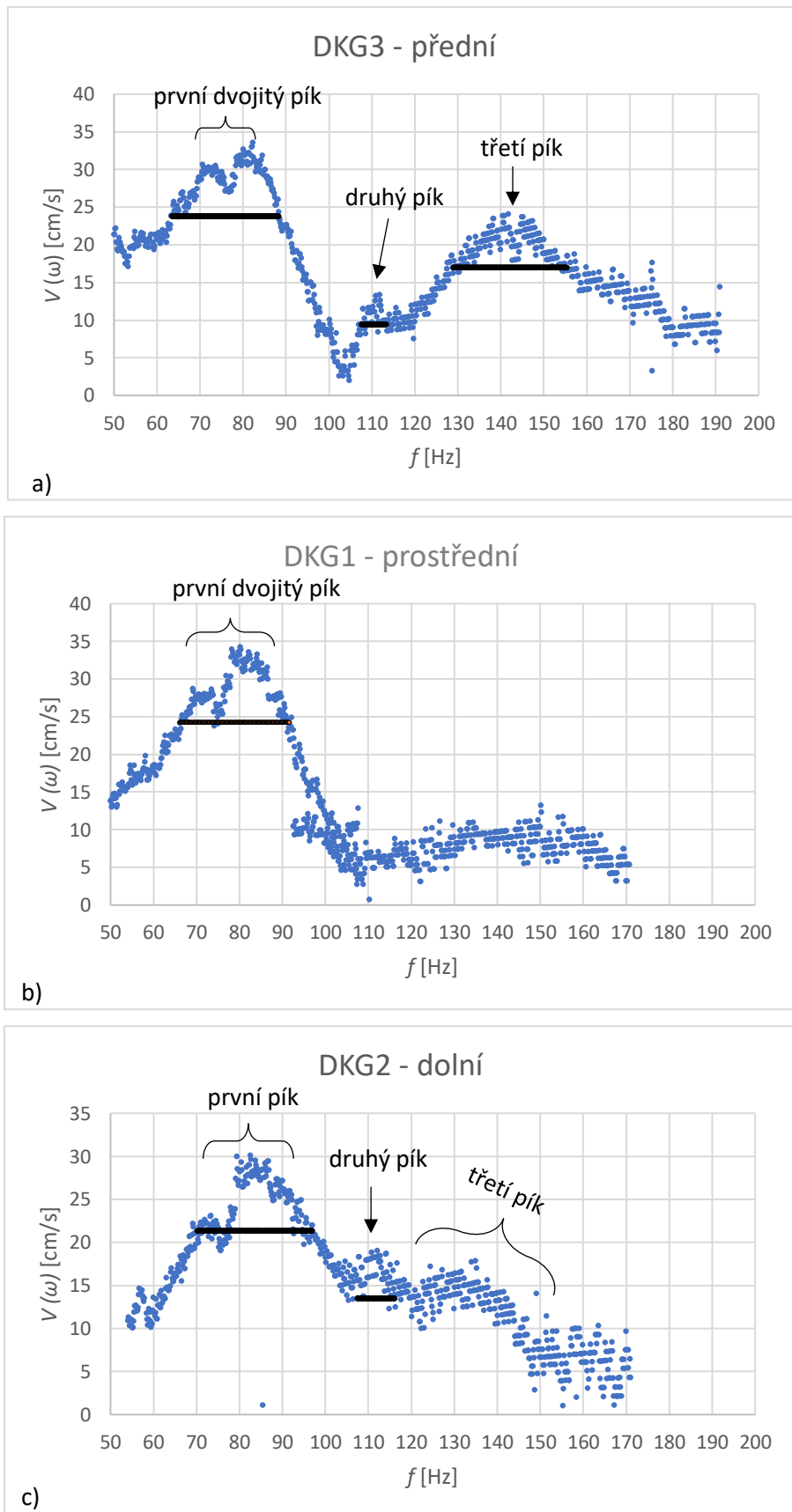
Uvedené výsledky byly získány a analyzovány výše popsanými metodami.

V prvním měření sweepem 50 Hz – 200 Hz se vyskytl dvojitý vrchol, který bude blíže prodiskutován níže. První šířka rezonance je jen orientační, právě kvůli dvojitému vrcholu (obrázek 22).

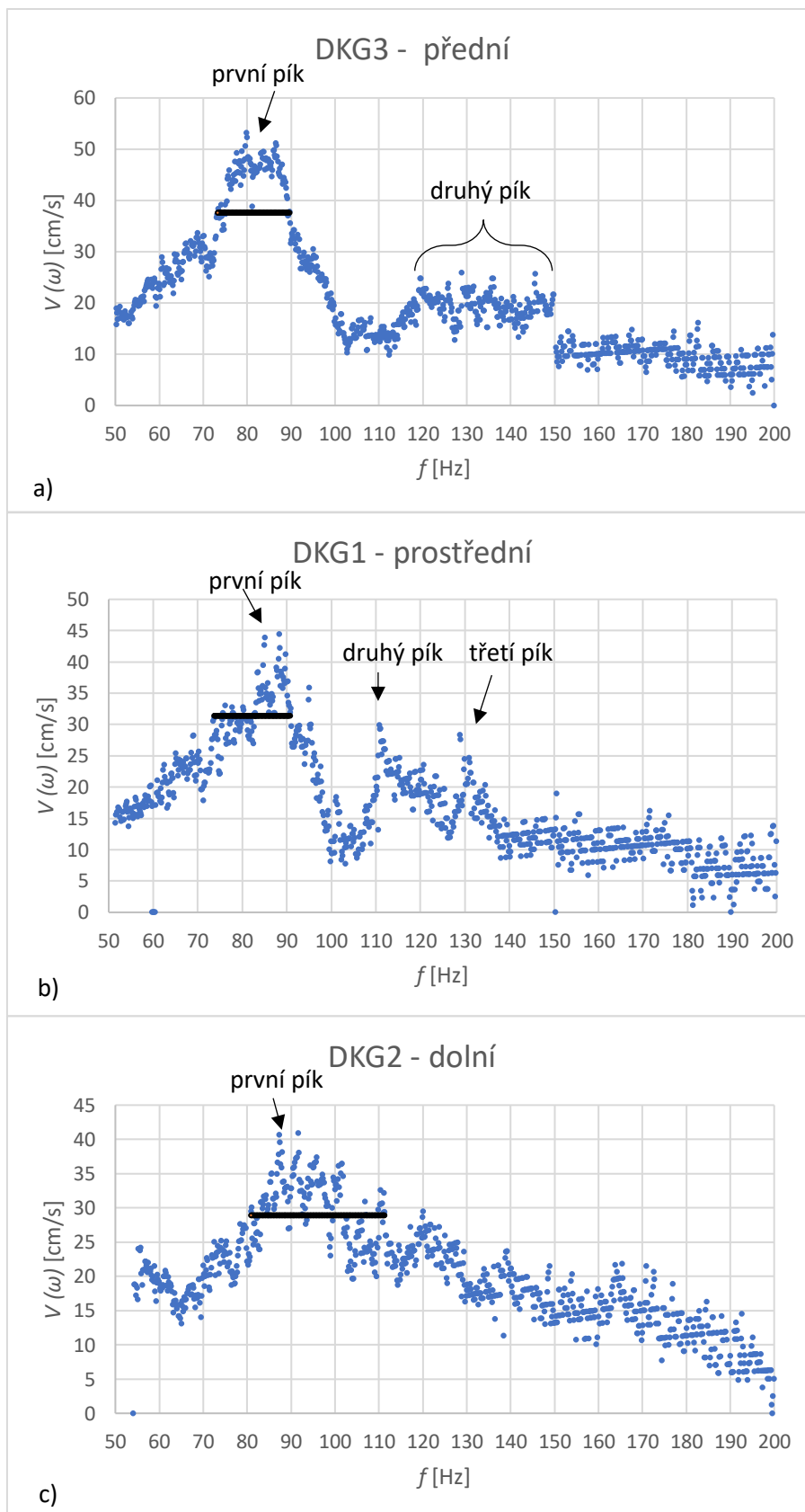
Při měření sweepem 200 Hz – 50 Hz jsou výsledky značně zkresleny šumem (obrázek 23). Byla proto užitá metoda mediánového filtru pro částečné odstranění tohoto šumu a to tak, že počínaje od třetí naměřené hodnoty jsme každou zaměnili mediánem 1. až 5. hodnoty. Mediánový filtr byl užit pro druhý a třetí DKG.

V tabulce 2 jsou uvedeny naměřené hodnoty rezonančních frekvencí. Dále jsou zde uvedeny šířky rezonance. Kvůli šumu v datech nebylo možné přesně určit pík rezonance, a tedy nebylo možné určit ani šířku rezonance u všech grafů, nebo se prostě daný pík v grafu nevyskytoval.

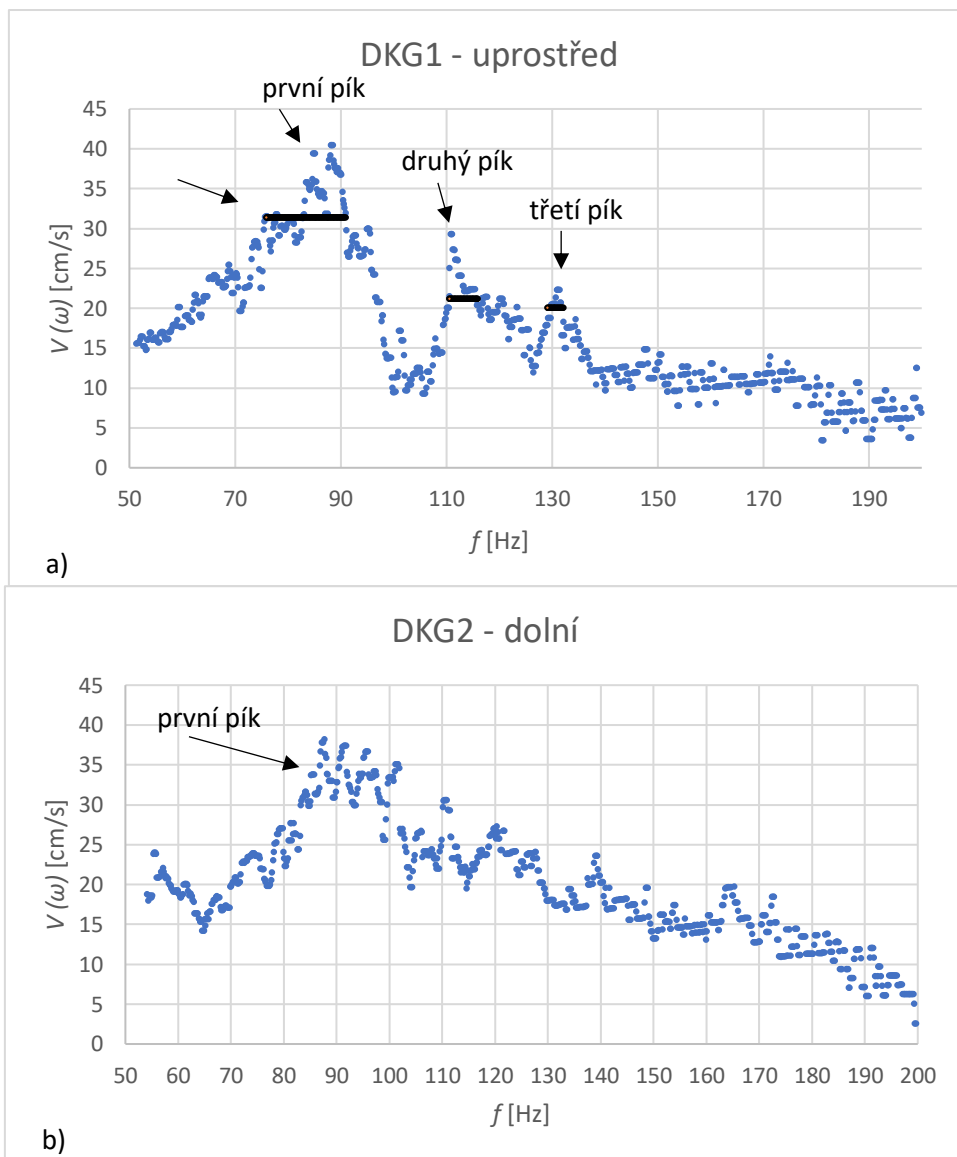
V tabulce 3 jsou uvedeny získané hodnoty rezonančních frekvencí z prvního dvojitého píku měřené sweepem od 50 Hz do 200 Hz a z prvního píku měřené sweepem od 200 Hz do 50 Hz. Dále jsou uvedeny vypočítané hodnoty rezonančních veličin vypočítaných podle vztahů (14) a (19). Faktor kvality Q v měření sweepem od 50 Hz do 200 Hz byl vypočítán z průměrné hodnoty dvou maxim v prvním dvojitém píku a průměrné hodnoty jejich šířky rezonance.



Obrázek 22: Grafy závislosti amplitudy rychlosti na buzené frekvenci, při buzení sinusovým, exponenciálním signálem od 50 Hz do 200 Hz pro a) přední část hlasivek, b) prostřední oblast hlasivek, c) zadní část hlasivek (viz též obrázek 9). Černá čára vyznačuje šířku rezonance.



Obrázek 23: Grafy závislosti amplitudy rychlosti na buzené frekvenci, při buzení sinusovým, exponenciálním signálem od 200 Hz do 50 Hz pro a) přední část hlasivek, b) prostřední část hlasivek, c) zadní část hlasivek (viz obrázek 9). Černá čára vyznačuje šířku rezonance.



Obrázek 24: Grafy z obrázku 22 po aplikaci mediánového filtru.

Tabulka 2: Souhrnná tabulka naměřených píků s jejich rezonančními frekvencemi a šířkou rezonance tam, kde to data umožňovala. Sloupec DKG označuje část hlasivek, kterou jsme měřili.

50 Hz – 200 Hz								
	První dvojitý pík				Druhý pík		Třetí pík	
	První maximum		Druhé maximum					
DKG	f_{rez} [Hz]	Δf [Hz]	f_{rez} [Hz]	Δf [Hz]	f_{rez} [Hz]	Δf [Hz]	f_{rez} [Hz]	Δf [Hz]
Přední	71	28	80	25	112	5	142	25
Prostřední	69	31	80	26	-	-	-	-
Spodní	74	40	80	25	112	9	-	-
200 Hz – 50 Hz								
	První pík		Druhý pík		Třetí pík			
DKG	f_{rez} [Hz]	Δf [Hz]	f_{rez} [Hz]	Δf [Hz]	f_{rez} [Hz]	Δf [Hz]		
Přední	80	16	-	-	-	-		
Prostřední	88	17	110	6	129	3		
Spodní	92	21	-	-	-	-		

Tabulka 3: Souhrnná tabulka naměřených a vypočítaných rezonančních veličin. Faktor kvality Q pro sweep od 50 Hz do 200 Hz byl vypočítán z průměru dvou maxim prvního dvojitého píku.

50–200 Hz					
DKG	f_{rez} [Hz]	Δf_{rez} [Hz]	b [s ⁻¹]	τ [s]	Q
Přední	80	26,5	236	0,004	2,8
Prostřední	80	28,5	235	0,004	2,9
Spodní	80	32,5	101	0,097	3,15
200–50 Hz					
DKG	f_{rez} [Hz]	Δf_{rez} [Hz]	b [s ⁻¹]	τ [s]	Q
Přední	80	16	51,3	0,02	4,89
Prostřední	88	17	53,6	0,02	3,72
Spodní	92	21	66,2	0,015	4,35

9. Diskuze:

9.1. Frekvenční sweep 50 Hz – 200 Hz

První rezonanční pík má dvě maxima, a proto byl označen jako dvojitý pík. Rezonanční frekvence prvního maxima se pohybuje mezi 70 Hz a 75 Hz. Rezonanční frekvence druhého píku je 80 Hz na všech částech hlasivek. Kvůli tomuto dvojitému píku nebylo možné přesně určit šířku rezonance. Hodnoty, uvedené v tabulce 2 se vážou ke danému maximu. Oba píky jsou však obsaženy v rezonanční šířce přibližně 25 Hz. Tento dvojitý pík se objevil z několika možných příčin.

První možnou příčinou je projev jiných vibračních módů, než mediálního či antero-posteriorního módu. Je také možné, že jedná o projev dalších vibračních módů, pocházejících z vertikální roviny hlasivek. Druhou možností je diverzita rezonančních vlastností levé a pravé hlasivky, kvůli jejich nesymetrii. Měření probíhalo podle doteku dvou hlasivek, nebyly tedy měřeny amplitudy jednotlivých hlasivek zvlášť. Pro měření obou hlasivek zvlášť by bylo nutné je mít viditelně rozdělené.

Do budoucna by k tomu mohlo posloužit přidavné sevření třetím bodcem zabodnutým do arytenoidní chrupavky, který by hlasivky, uvedené do fonační polohy dvěma bodci z boku, mírně rozevřel uprostřed, aby byla vidět hlasivková štěrbina. Rozdělit hlasivky přímo, například provázkem či předmětem umístěným do hlasivkové štěrbiny by mohl zkreslit výsledky více.

Druhý rezonanční pík byl naměřen s frekvencí 112 Hz, šířkou rezonance mezi 5 Hz a 10 Hz a naznačuje přítomnost antero-posteriorního módu. Horní a dolní část hlasivek (Obrázek 22 a) a c)), kde se pík vyskytoval naznačuje kmitny tohoto módu a absence píku naznačuje jeho uzel.

Třetí pík rezonance se objevil v přední a zadní části hlasivek (obrázek 22 a) a c)). Pro přední část byla naměřena rezonanční frekvence 142 Hz s šířkou rezonance 25 Hz. Třetí pík v zadní části hlasivek je značně zašuměný, a ne tak výrazný, proto nebyl měřen, ale je třeba jej také vzít v úvahu. Tento třetí pík v přední a zadní části hlasivek naznačuje kmitny antero-posteriorního módu, prostřední část hlasivek díky absenci zvýšené amplitudy naznačuje uzel tohoto módu.

Celkově, pokud budeme první dvojitý pík považovat za jeden, je možné usoudit, že se projevil mediální mód, což naznačuje to, že je tento pík výrazný v prostřední oblasti (obrázek 14b)). Ostatní píky (resp. dvojitě píky) v přední a zadní oblasti mohou být důsledkem zdvojení vlivem pravo-levé nesymetrie hlasivek a kombinací s vibračními módy, které mají přidanou vertikální složku (viz obrázek 5). Druhý a třetí pík v přední a zadní části hlasivek naznačují přítomnost anteriorně-posteriorního vibračního módu.

9.2. Frekvenční sweep 200 Hz – 50 Hz.

Rezonanční frekvence byla 80 Hz v přední části hlasivek, 88 Hz v prostřední části hlasivek a 88 Hz ve spodní části hlasivek (obrázek 23). Hodnoty jsou od sebe mírně odlišné, neboť pík rezonance nebyl zcela ostrý a bylo zapotřebí použít mediánového filtru, abychom získali nějaké hodnoty (obrázek 24). Tyto píky naznačují přítomnost mediálního módu.

Druhý pík v prostřední oblasti se projevil na frekvenci 110 Hz a naznačuje také přítomnost mediálního módu, vzhledem k absenci tohoto píku v přední oblasti. Zadní oblast je výrazně zašuměná i po vyhlazení mediánovým filtrem. Nelze proto určit, zdali je tento pík přítomný i v zadní oblasti.

Druhý pík projevený v přední oblasti je značně zašuměný a nevýrazný a nachází se v intervalu od 120 Hz do 150 Hz. Třetí pík v prostřední oblasti se projevil na frekvenci 129 Hz. V zadní oblasti opět nelze tyto píky rozlišit. Nelze tedy říct, zdali se jedná o projev mediálního módu, nebo anteriorně-posteriorního módu.

Značně zašuměná data znemožňují jejich jednoznačnou interpretaci. Projev prvního píku naznačuje přítomnost mediálního módu, tak jako tomu bylo u sweepu od 50 Hz do 200 Hz. Třetí pík v přední oblasti by naznačoval přítomnost anterio-posteriorního módu, kdyby se projevil rezonanční pík jednoznačně i v zadní oblasti, kde to kvůli zašuměným datům nelze určit. Nejednoznačnost by mohla způsobena tím, že při počáteční frekvenci buzení 200 Hz, se rezonance nestačily utlumit během rychlého postupu k nižším frekvencím.

9.3 Porovnání obou sweepů.

Porovnáním obou sweepů by se dalo říci, že rezonanční frekvence prvních píků v obou sweepech mají podobnou hodnotu (Tabulka 2, obrázek 22, 23 a 24). Výsledky z obou sweepů jsou si vcelku podobné. Tento první pík naznačuje projev mediálního módu. Nicméně projev rezonančního píku ve všech oblastech naznačuje mediální mód v kombinaci s vertikálním vibračním módem, který je blíže neurčený. Může se jednat o 11, 12 a vyšší.

Druhý pík v přední a zadní části hlasivek na obrázku 22 a) a c) naznačuje přítomnost anteriorně-posteriorního módu na frekvenci přibližně 112 Hz u sweepu od 50 Hz do 200 Hz. Nicméně u opačného sweepu se vyskytl pík na frekvenci 110 Hz (Obrázek 23 b) resp. obrázek 24 c)), což naznačuje, že se jedná spíše o artefakt měření.

Třetí pík u prvního sweepu (50 Hz – 200 Hz) se projevil na frekvenci 142 Hz pro přední oblast. V zadní oblasti se sice zvýšení amplitudy projevilo, ale pík není zcela rozpoznatelný, tudíž nelze určit rezonanční frekvenci tohoto píku. Obdobná situace je i u opačného sweepu (200 Hz – 50 Hz). Problém však je, že oba píky u opačného sweepu nejsou zřetelné, a tedy nelze určit jejich rezonanční frekvenci. Nelze tedy potvrdit přítomnost anteriorně-posteriorního módu.

Aby se stihly jasněji projevit rezonační píky a utlmit vibrační módy při přechodu k dalším frekvencím během celého sweepu, bylo by vhodné prodloužit sweepty alespoň na 10 vteřin. Měnit frekvenci manuálně, například každé 2 vteřiny by bylo také možné, ale měření by bylo časově náročnější, a je otázkou, co by tak dlouhé měření udělalo s hlasivkami, které mohou bez přítomnosti zvlhčeného vzduchu vysychat. Dále by nebylo na škodu vytvořit jednoduchý software, který by spouštěl zároveň vibrační shaker a vysokorychlostní kameru zároveň, aby se zabránilo zpoždění v důsledku lidské chyby. I po synchronizaci s audiozáznamem jsou na DKG viditelná hluchá místa.

K porovnání výsledků by bylo vhodné použít dostupných automatických softwarů, jako je například Glottal Image Explorer. (Birkholz, 2016). Automatické softwary však vyžadují přítomnost štěrbin mezi hlasivkami, která v experimentu této práce nebyla rozeznatelná. Hlasivky se pouze dotýkaly. Dosáhnout viditelné hlasivkové štěrbin by bylo možno pomocí jiného uchycení.

Při buzení vzduchem dosahovaly hlasivky frekvence kmitání 57,94 Hz. Značný rozdíl mezi první rezonanční frekvencí a samobuzenou frekvencí kmitání je překvapivý, neboť při měření in vivo byly zjištěny tyto rozdíly mnohem menší (Švec a kol, 2000). Možným důvodem může

být, že kmitání hlasivek ovlivňuje ještě další mód kmitání ve vertikálním směru, který má rezonanční frekvenci kolem 50-60 Hz a který není dobře detekovatelný námi použitou metodou sledování kmitů laryngoskopicky seshora. Náznaky takovéto rezonanční frekvence jsou viditelné na obrázku 22c a 23c. Roli zde může hrát značná addukce glottis, která snižuje volnost pohybu hlasivek a může tak tlumit excitaci některého z hlavních módů kmitání – v případě excitace vzdušným prouděním se hlasivky přirozeně od sebe oddalují, aby umožnily průtok vzduchu přes glottis, což v našem případě externí excitace nenastalo. V případě experimentů in vivo byly hlasivky mírně od sebe, což umožnilo jejich volnější pohyb (Švec a kol., 2000). Dalším faktorem může být fakt, že interakce hlasivek se vzdušným prouděním může způsobit posuny frekvencí vlastních módů kmitání, tak aby došlo k samooscilacím (Berry, 2001; Horáček 2002). Tyto faktory je třeba vzít v úvahu při budoucích měřeních rezonančních vlastností hlasivek.

Závěr:

Cílem této bakalářské práce bylo stanovení a otestování metodiky pro zkoumání mechanických vlastností hlasivek u preparátů hrtanu. V našem případě byl použit preparát jeleního hrtanu. Podle výše popsané metodiky bylo provedeno měření rezonančních vlastností jeleních hlasivek.

Bylo zjištěno, že jelení hlasivky přirozeně kmitají na frekvenci 55 Hz. První rezonanční frekvence se objevila u přibližně 80 Hz, a k této frekvenci je pravděpodobně přidružen mediální mód v kombinaci s vertikálními módy. Nemůže to být samostatný mediální mód, protože rezonanční píky se objevily i v horní a dolní části hlasivek. Nelze to však definitivně potvrdit. Druhá rezonance se objevila na frekvenci přibližně 140 Hz, a s ní byl přidružen anteriorně-posteriorní mód. Opačný sweep však toto nepotvrzuje, takže je tento závěr nejednoznačný.

Ačkoliv se během experimentu objevily jisté technické obtíže, diskutované výše, vytvořená metodika se zdá být slibná ve zkoumání mechanických vlastností. Pro další výzkum bude nutné stanovit přesnost této metody, její hlavní přínosy a podmínky, pro které preparáty lze tuto metodu použít.

Seznam literatury:

- Bajer, J. *Mechanika*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2006. ISBN 80-244-1293-4.
- Berry D.A., Titze I.R. (1996b) Normal modes in a continuum model of vocal fold tissues. *The Journal of the Acoustical Society of America* **100**, 3345-3354.
- Berry D.A., Herzel H., Titze I.R., Krischer K. (1994) Interpretation of biomechanical simulations of normal and chaotic vocal fold oscillations with empirical eigenfunctions *The Journal of the Acoustical Society of America* **95**(6), 3595-3604.
- Berry D.A. (2001a) Mechanisms of modal and nonmodal phonation *Journal of Phonetics* **29**, 431-450.
- Fee M.S. (2002) Measurement of the linear and nonlinear mechanical properties of the oscine syrinx: Implications for function. *Journal of Comparative Physiology A* **188**, 829-839.
- Garcia M., Herbst Ch. T. (2017) Excised larynx experimentation: history, current developments, and prospects for bioacoustic research *The Anthropological Society of Nippon*.
- Garrel R., Nicollas R., Giovanni A., Ouaknine M. (2007) Optoreflectometry determination of the resonance properties of a vocal fold. *Journal of Voice* **21**, 517-521.
- Gilbert J., Ponthus S., Petiot J.F. (1998) Artificial buzzing lips and brass instruments: experimental results. *The Journal of the Acoustical Society of America* **104**, 1627-1632.
- Gilbert J., Ponthus S. (1998) Artificial buzzing lips and brass instruments: Experimental results *Journal of the Acoustical Society of America* **104**(3), 1627-1632
- Górová S. (2017) Měření rezonančních vlastností struny, středoškolská odborná činnost, Slovanské gymnázium Olomouc.
- Halliday D., Resnick R., Walker J. (2013) DUB, Petr, ed. *Fyzika. 2., přeprac. vyd.* Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- Hampala V., Švec J., Schovánek P., Mandát D. (2013). Užitečný vzor č. 25585: Model subglotického traktu. [Utility model no. 25585: Model of subglottal tract.] Soukup, P. 2013-27834(CZ 25505 U1), 1-7. 24-6-2013. Praha, Úřad průmyslového vlastnictví. [Prague, Czech Republic, Industrial property office].
- Hampala V. (2015) Vibration and morphology of the vocal folds studied by excised larynx experiments, electroglottography, high-speed imaging, and computed tomography. Disertační práce. UP Olomouc.
- Hertegård S., Larsson H., Granqvist S. (2003) Vocal fold resonances at low and high pitch tuning. *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference* **2**, 459-461.
- Horová Z.: (2007) *Demonstrace základních vlastností šíření vln na datech umělých družic*. Diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta, Česká republika.
- Ishizaka K (1988): Significance of Kaneko's measurement of natural frequencies of the vocal folds; in Fujimura O, (ed): *Vocal physiology: voice production mechanisms and functions*. New York, Raven Press, pp 181-190.
- Kazemirad S., Bakhshaei H., Mongeau L., Kost K. (2015) Non-invasive *In vivo* measurement of the shear modulus of human vocal fold tissue *Journal of Biomechanics* **47**(5), 1173-1179.
- Kolesnikov V. (1988) *Mechanika* Přírodovědecká Univerzita palackého v Olomouci.
- Kvasnice J. *Mechanika*. Vyd. 2. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1268-0.
- Lan H. (2006) An Investigation into the Dynamic Response of Vocal Folds. Diplomová práce. Auckland Univerzity of technology, New Zealand.
- Lepil O. (1994) *Fyzika: pro gymnázia: mechanické kmitání a vlnění*. Praha: Prometheus, Učebnice pro střední školy. ISBN 80-901619-6-0.
- Lepil O. (2012): *Mechanické kmitání a vlnění*. První vydání, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 83 stran.
- Ouaknine M., Garrel R., Giovanni A. (2003) Separate Detection of Vocal Fold Vibration by Optoreflectometry: A Study of Biphonation on Excised Porcine Larynges *Folia Phoniatrica et Logopaedica* **55**, 28-38.
- Pospíšil J. (1987): *Mechanické a elektromagnetické kmity a vlny*. První vydání, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 205 stran.
- Švec J.G., Horáček J., Šrám F., Veselý J. (2000) Resonance properties of the vocal folds: *in vivo* laryngoscopic investigation of the externally excited laryngeal vibrations. *The Journal of the Acoustical Society of America* **108**, 1397-1407.
- Tanabe M., Isshiki N., Sawada M. (1979) Damping ratio of the vocal cord. *Folia Phoniatr* **31**, 27-34.
- Titze I.R., Strong W. (1975) Normal modes in vocal cord tissues. *The Journal of the Acoustical Society of America* **57**, 736-744.
- Titze I.R. (2000): *Principles of voice production*. Druhé vydání, National Center for Voice and Speech, Iowa City, USA, 409 stran.
- Tsuzuki T., Fujioka T., Fukuda H., Ohki K., Kawasaki Y., Kita K. (1988) Externally Induced Vibration on Massive Vocal Fold. *The Keio Journal of Medicine* **37**, 255-264.
- Richardson M.H. (1997): Is it a mode shape, or an operating deflection shape? *Sound & Vibration* **31**, 54-61.

Richardson M. H., Schwarz B.J. (1999) Introduction to operating deflection shapes *CSI Reliability Week*.
Riede T., York A., Furst S., Müller R., Seelecke S. (2011) Elasticity and stress relaxation of a very small vocal fold *Journal of biomechanics* **44(10)**, 1936–1940.

Internetové zdroje:

ImageJ. [online]. [cit. 21. 7. 2018]. Dostupné z: <https://imagej.net/Welcome>

KOPEČNÝ J. Fyzika pro bakaláře [online] In: 2008 [cit. 4. 8. 2020]. Dostupné z:
https://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/1_7_2_tlum.pdf

RUSŇAK, K. *Tlumene kmity* [online]. In.: 2008 [cit. 11. 2. 2018]. Dostupné z:
<http://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FYI1/tlum.kmity.pdf>