



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VLIV TVARU ČELA LIDSKÉ HLASIVKY NA JEJÍ MODÁLNÍ CHARAKTERISTIKY

INFLUENCE OF GLOTTAL SHAPE OF HUMAN VOCAL FOLD ON ITS MODAL CHARACTERISTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Zelinka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hájek

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Martin Zelinka
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Petr Hájek
Akademický rok:	2020/2021

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

Charakteristika problematiky úkolu:

Při tvorbě hlasu kmitají lidské hlasivky na frekvenci blízko některé z vlastních frekvencí. Poloha vlastních frekvencí záleží na tvaru hlasivky, který se v průběhu jednoho kmitu mění. Cílem práce bude tvorba parametrického modelu lidské hlasivky, který bude umožňovat změnu geometrie hlasivkového čela. Různé geometrické konfigurace budou sloužit jako vstup do modální analýzy provedené v programu ANSYS, z níž budou obdrženy vlastní frekvence.

Cíle bakalářské práce:

- Shrňte základní teorie popisující tvorbu hlasu.
- Proveďte krátkou rešerši současných výpočtových modelů hlasivek.
- Vytvořte parametrický model geometrie lidské hlasivky.
- Zjistěte vlastní frekvence hlasivky pro různé geometrické konfigurace.

Základní literární prameny:

TITZE, Ingo R. The Myoelastic Aerodynamic Theory of Phonation. Denver and Iowa City: National Centre for Voice and Speech, 2006. ISBN 978-0-87414-156-6.

TITZE, Ingo R. Principles of Voice Production. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1994. ISBN 0-13-717893-x.

SCHERER, Ronald C., Daoud SHINWARI, Kenneth J. DE WITT, Chao ZHANG, Bogdan R. KUCINSCHI a Abdollah A. AFJEH. Intraglottal pressure profiles for a symmetric and oblique glottis with a divergence angle of 10 degrees. The Journal of the Acoustical Society of America [online]. 2001, 109(4), 1616–1630 [vid. 2015-03-03]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.1333420

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21



V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph. D.
ředitel ústavu

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

Abstrakt:

Hlavní cíl bakalářské práce je vytvoření parametrického modelu s proměnlivým úhlem čela lidské hlasivky a následné zjištění prvních vlastních frekvencí kmitání hlasivek pro všechny úhly od rozmezí -40° až $+40^\circ$. Výsledek je podpořen rešerší anatomie lidského vokálního ústrojí, tvorby a úpravy hlasu a aktuálních modelů lidských hlasivek.

Model použitý pro tuto práci je vytvořený v modelovacím softwaru 3D CAD Inventor. Modální analýza je řešena ve výpočetním programu ANSYS Workbench, pomocí metody konečných prvků.

Klíčová slova:

model M5, hlasivky, metoda konečných prvků, parametrický model, vlastní frekvence

Abstract:

The main goal of the bachelor thesis is to create a parametric model with a variable angle of the human vocal fold and to determine the first two frequencies of vocal fold oscillations for all angles from -40° to $+40^\circ$. The result is supported by a review of the anatomy of the human vocal system, the creation and modification of the voice, and current models of the human vocal fold.

The model used for this work is created in the 3D CAD Inventor model software. Modal analysis is solved in the computer program ANSYS Workbench, solved using finite element methods.

Keywords:

model M5, vocal cords, finite element methods, parametric model, natural frequency

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Citace tištěné práce:

ZELINKA, Martin. Vliv tvaru čela lidské hlasivky na její modální charakteristiky. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132260>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Hájek.

Citace elektronického zdroje:

ZELINKA, Martin. Vliv tvaru čela lidské hlasivky na její modální charakteristiky [online]. Brno, 2021. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132260>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Hájek.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Hájka a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

Martin Zelinka

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde poděkoval panu Ing. Petru Hájkovi jako vedoucímu mé práce za velmi cenné rady, čas, trpělivost, motivaci, konstruktivní kritiku a obrovskou vůli být nápomocen při vypracování této bakalářské práce. Dále bych zde rád poděkoval své rodině za jejich podporu, jak psychickou, tak finanční. A v neposlední řadě bych rád poděkoval všem svým kamarádům, kteří při mně stáli a pomohli kdykoliv bylo potřeba. Speciální poděkování patří Martinovi Šrámkovi, za jeho pomoc.

OBSAH

OBSAH	13
ÚVOD	15
1. ANATOMIE LIDSKÉHO HLASOVÉHO ÚSTROJÍ	17
1.1 ANATOMIE RESPIRAČNÍ ČÁSTI LIDSKÉHO HLASOVÉHO ÚSTROJÍ	19
1.1.1 <i>Průdušnice (Trachea)</i>	19
1.1.2 <i>Hlavní průdušky (Bronchy)</i>	19
1.1.3 <i>Plice a plicní sklípky</i>	20
1.2 ANATOMIE FONAČNÍ ČÁSTI LIDSKÉHO HLASOVÉHO ÚSTROJÍ	20
1.2.1 <i>Anatomie hrtanu</i>	20
1.2.2 <i>Hlasivky</i>	24
1.3 ANATOMIE REZONANČNÍ A ARTIKULAČNÍ ČÁSTI LIDSKÉHO HLASOVÉHO ÚSTROJÍ	25
2. TVORBA HLASU A JEHO ÚPRAVA	27
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY	27
2.2 VZNIK HLASU	27
2.2.1 <i>Pohyby hlasivek při fonaci</i>	28
2.3 RŮZNÉ DRUHY FONACE A HLASU	28
2.3.1 <i>Neznělé fonace</i>	29
2.3.2 <i>Znělé fonace</i>	29
2.4 AKUSTICKÉ VLNY ČESKÝCH SAMOHLÁSEK	30
3. VÝPOČTOVÉ MODELY HLASIVEK	31
3.1 HMOTOVÉ MODELY	31
3.1.1 <i>Ewaldova píšťala</i>	31
3.1.2 <i>Jednohmotový model</i>	32
3.1.3 <i>Dvouhmotový model</i>	32
3.1.4 <i>Tříhmotový model</i>	33
3.1.5 <i>Model slizniční vlny</i>	33
3.2 MODELY S VYSOKÝM POČTEM STUPŇŮ VOLNOSTI	34
3.2.1 <i>Modely proudění</i>	34
3.3 GEOMETRICKÉ MODELY	35
3.3.1 <i>Modely s reálnou geometrií hlasivek</i>	35
3.3.2 <i>Modely s idealizovanou geometrií hlasivek</i>	35
4. MODEL 5 A VLASTNÍ FREKVENCE KMITÁNÍ HLASIVEK	37
4.1 GEOMETRIE MODELU M5	37
4.1.1 <i>Parametrické rovnice a rozměry</i>	38
4.1.2 <i>Vytvoření parametrického modelu</i>	42
4.2 MODEL MATERIÁLU	43
4.2.1 <i>Síť konečnoprvkového modelu v softwaru ANSYS</i>	43
4.3 MODÁLNÍ ANALÝZA	44
4.3.1 <i>Okrajové podmínky</i>	45
4.4 VÝSLEDKY: VLASTNÍ FREKVENCE & VLASTNÍ TVARY	46
4.4.1 <i>Vlastní tvar pro první vlastní frekvenci</i>	50
4.4.2 <i>Vlastní tvar pro druhou vlastní frekvenci</i>	51
4.4.3 <i>Vlastní tvar pro třetí vlastní frekvenci</i>	52
4.4.4 <i>Diskuse o výsledcích</i>	53
4.4.5 <i>Vybraný vlastní model hlasivky pro úhel +40°</i>	54
5. ZÁVĚR	57
SEZNAM LITERATURY A ZDROJŮ	59
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	63

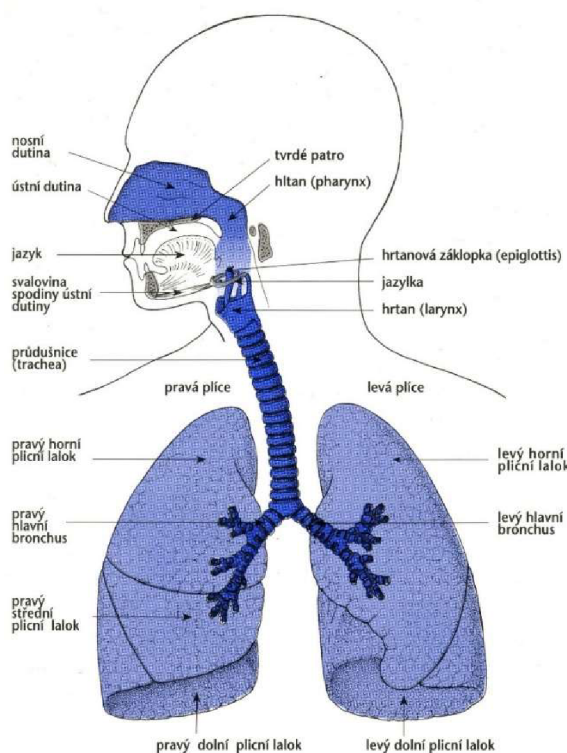
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	65
SEZNAM TABULEK	66
PŘÍLOHA 1 – VLASTNÍ TVARY HLASIVEK NĚKTERÝCH ÚHLŮ	67
PŘÍLOHA 2 – HODNOTY PARAMETRŮ HLASIVKY	73
PŘÍLOHA 3 – VLASTNÍ FREKVENCE.....	77

Úvod

Lidský hlas je brán jako jeden z nejdůležitějších komunikačních prostředků a je denně používán většinou lidí na celém světě. Hlas však není něco, co se dá naučit, je postupně vyvíjen a upravován v rámci růstu a evoluce člověka. Už pračlověk se dorozumíval mimo jiné posunkami, mimikou a řečí těla a různými jednoduchými skřeky. Hlas se tedy postupně vyvíjel až do podoby, jak jej známe dnes. Dnes se jedná o smysluplnou řeč rozdělenou do různých jazyků a nářečí. Hlas je tak důležitý, že se pro spoustu lidí stal samotným způsobem obživy, ať už se jedná o moderátory, učitele nebo například zpěváky. Vzhledem k důležitosti hlasu je o něj třeba pečovat, někdy bohužel nepomůže ale ani ta nejlepší péče a může dojít k závažnému onemocnění jednotlivých důležitých orgánů utvářející hlas. Jedním z těchto orgánů jsou hlasivky. Vzhledem k různým nemocem může dojít ke kompletní nebo částečné amputaci hlasivek a tím i ztratě hlasu. Řešením tohoto problému by do budoucna mohla být výroba umělých hlasivek při zachování řeči o stejné barvě a výšce. K tomuto řešení je však potřeba důkladné prozkoumání anatomie a pochopení funkce hlasivek. K chápání jejich funkce může přispět i tato bakalářská práce, která je zaměřena na vlastní frekvence kmitání lidských hlasivek o různém úhlu čela získané metodou konečných prvků (MKP) z parametrického modelu. V této práci budou ovšem uvažovány pouze hlasivky dospělého jedince, proto zde není zohledněn faktor mutace hlasu u dospívajících jedinců. Pro pochopení této problematiky bude v této bakalářské práci rozebrána anatomie lidského hlasového ústrojí rozděleného do několika částí s popisem jejich funkce a vlivu na vznik hlasu. Dále je v této práci věnována pozornost tvorbě hlasu s nahlédnutím do jeho úpravy. Zakončení této části práce pak bude krátká rešerše věnovaná různým typům modelů hlasivek s popisem. Praktická část pak bude obsahovat popis a tvorbu parametrického modelu M5 pro zvolený maximální rozsah úhlů čela hlasivky s následným vyhodnocením údajů týkajících se vlastní frekvence a jejich závislosti na úhlu čela hlasivky.

1. Anatomie lidského hlasového ústrojí

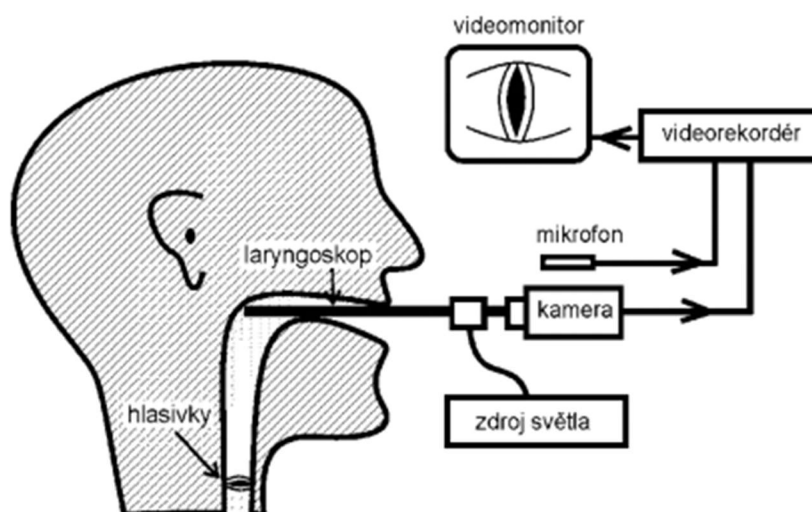
Hlasové ústrojí, ve kterém vzniká hlas, je anatomicky identické se soustavou dýchací. Rozdíl mezi nimi je z hlediska funkce. Zatímco z pohledu dýchací soustavy se jedná o základní životní funkci, dýchání a ochlazování lidského těla, z pohledu hlasového ústrojí se jedná o vznik hlasu jako základního dorozumivacího prostředku [1]. Lidské hlasové ústrojí je děleno na 4 základní části a tj. respirační, fonační, artikulační a rezonanční (Obr. 1) [2]. Anatomie artikulační a rezonanční části není pro vznik hlasu podstatná, podstatné je hlavně postavení jednotlivých prvků těchto částí, proto se jim budeme věnovat v dalších kapitolách. V případě této práce je také vhodné rozdělit tuto soustavu na trakt subglotický (označení pro část pod hlasivkami), trakt supraglotický (označení pro část nad hlasivkami)[3]. Nejdůležitější částí hlasového ústrojí je vokální trakt, což je prostor v supraglotickém traktu, konkrétně mezi hlasivkami a ústním otvorem. Vokální trakt má největší vliv na rezonanci hlasu [3].



Obr. 1 Anatomie lidského respiračního ústrojí [41]

Z historického hlediska anatomie a fyziologie hlasového ústrojí nebyla snadno zjistitelná, zvláště pak u hlasivek [4]. Přestože se o glottické fonaci vědělo již na konci 2. st. n. l. [2]. Výrazný pokrok byl zaznamenán až v 19. st., provedením první laryngoskopie, která je připisovaná B. G. Babingtonovi pomocí jeho vynálezu

nazývaného jako „glottiscope“ [2]. Jednalo se sadu zrcátek s retrakční spatulou¹ [4]. Velkou zásluhu pak měl i zpěvák a hlasový pedagog M. García, který použitím hrtanového zrcátka zobrazil své vlastní hlasivky a popsal jejich funkci [4]. Při pokusech s využitím jeho teorie v lékařské praxi však nastalo několik neúspěchů z důvodu závislosti na slunečním světle a velikosti zrcátek [4]. O řešení tohoto problému se zasloužil český lékař J. N. Čermák, jenž upravil zrcátka a zavedl další čelní zrcátko před okem [4]. I přesto, že již bylo možné hlasivky pozorovat, stále nebyla detailně zodpovězená otázka anatomie hlasivek [4]. Fyziologie hlasivek nebyla kompletně prozkoumána z důvodu vysoké frekvence kmitání, která dosahovala u mužské populace zhruba 70 až 500 Hz [4] a u ženské části přibližně 150 až 1000 Hz [4], takto vysoká frekvence není pozorovatelná pouhým okem [4].



Obr. 2 Pozorování hlasivek pomocí videolaryngoskopie [4]

S příchodem moderní doby se objevila řada vynálezů ulehčujících pozorování funkce hlasivek. Došlo k nahrazení hrtanového zrcátka endoskopem, tzv. laryngoskopem, jehož optický konec umožnil sledovat hlasivky [4]. Vznikly nové metody pozorování hlasivek jako např. videolaryngoskopie, metoda spočívá v zavedení videokamery a mikrofonu pomocí optického kabelu připevněného k laryngoskopu [4]. (Obr. 2)

Stále zde byl však problém frekvence kmitání hlasivek. Řešením problému bylo využití stroboskopického světla [5]. Tato metoda se stala základem pro nynější diagnostiku různých poruch hlasu [4]. Ovšem ani touto metodou nešly zobrazit drobné detaily hlasivek při jejich oscilaci [4]. Tyto detaily byly zobrazené až díky laryngoskopii s vysokorychlostními kamerami [4]. Nevýhodou této metody se stala její cena a časová náročnost, jelikož pořizování několika sekund záznamů znamená obrovské množství dat v rádech gigabytů a zkoumání jedné sekundy záznamu zabere i několik minut [4].

¹ Lžice pro nadzvednutí hrtanové záklopy a zavedení laryngoskopu [Konzultováno s Bc. Irena Zelinová, dne 12.02.2021]

1.1 Anatomie respirační části lidského hlasového ústrojí

Za respirační část hlasového ústrojí je považován celý subglotický trakt, do něhož jsou zařazeny průdušnice, průdušky, plíce a plicní sklípky. Za nepřímo zasazené do respirační části hlasového ústrojí lze považovat dýchací svaly jako jsou bránice a mezižební svaly [1]. Hlavním účelem respirační části je zajištění základní životní funkce „dýchání“ a ochlazování těla (Obr. 3). Pro účely této práce je respirační část brána jako soustava zajišťující tlak potřebný k rozkmitání hlasivek.

1.1.1 Průdušnice (*Trachea*)

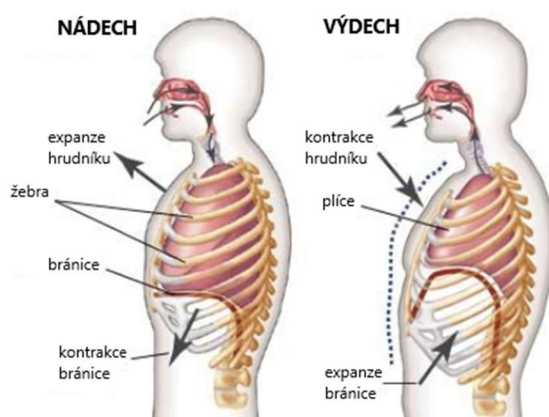
Průdušnice je trubice, vedoucí z hrtanu až do průdušek plic, o délce zhruba 100 až 160 mm a průměru 25,4 mm [6]. Trubice je obklopena jednoduchými chrupavkovitými kroužky tvořenými převážně z kolagenu, účel kroužků je opora vnější struktury průdušnice [6]. Kromě prvního kroužku se jedná o 15–20 kroužků tvaru C, kde otevřená část kroužků je spojena průduškovým svalem, který může kroužky uvolňovat nebo stahovat (např. při kašli), a tím výrazně ovlivňovat tvar hlasivkové štěrbině a průtokové množství vzduchu [6]. Směr proudění vzduchu je určený dle toho, zda se jedná o vdech či výdech.

1.1.2 Hlavní průdušky (*Bronchy*)

Jedná se o rozvětvlující se pokračování průdušnice vedoucí do obou plic, také známé jako „*bronchy*“ (levá a pravá) [1]. Rozdíl mezi nimi je ve směru naklonění od osy průdušnice a zároveň v jejich délce a tloušťce [1], kde pravá je širší a kratší [7]. Hlavní průdušky v lidském těle fungují jako sjednocovací potrubí průtoku plynů z plic.

1.1.3 Plíce a plicní sklípky

Postupně přes průdušnice, hlavní průdušky a jejich rozvětvení je v respirační části dosaženo plic a plicních sklípků. Plíce jsou následně rozděleny na laloky, tři pro pravou a dva pro levou plíci [8]. Laloky jsou dělené do segmentů plic a segmenty dále do plicních sklípků, ve kterých dochází k výměně směsi plynů v krvi [8]. Aby mohlo dojít k výměně směsi plynů, je potřeba ji nejdříve přivést do plic a následně ji odvést, což je zajištěno dýchacími svaly (bránice a mezižební svaly) [9].



Obr. 3 Mechanika dýchání [42]

1.2 Anatomie fonační částí lidského hlasového ústrojí

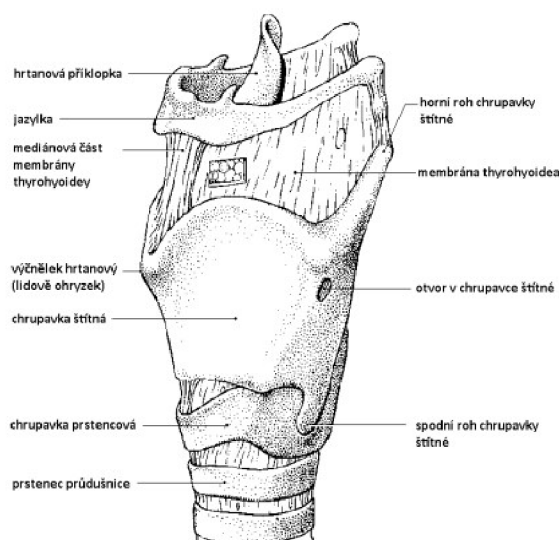
Fonační část hlasového ústrojí navazuje na respirační část a je tvořena z hrtanu a hlasivek. Jedná se o nejdůležitější část hlasového ústrojí. Vzniká zde tzv. zvuk generovaný hlasivkami který je posléze upravován v artikulační a rezonanční části až do vzniku řeči [10].

1.2.1 Anatomie hrtanu

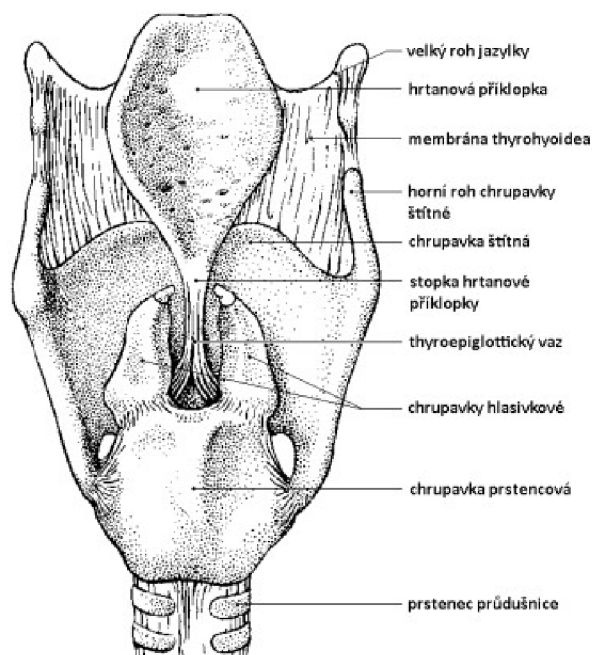
V hrtanu se nachází předěl, mezi subglotickou a supraglotickou částí hlasového ústrojí, tvořený chrupavkami vzájemně propojenými svalovými, vazovými a kloubovými vazbami [10].

Kostra hrtanu

Kosterní skladba hrtanu je zobrazená na **Obr. 4** a **Obr. 5**. Do hrtanu je ze spodu zasažená průdušnice, na niž navazuje prstencová chrupavka, jež má na zadní straně vytvárování sloužící pro usazení do chrupavky hlasivkové [10]. Ke chrupavce prstencové je díky spodním rohům připojena chrupavka štítná, jejíž přední výčnělek je lidově nazýván ohryzek nebo také Adamovo jablko, které může být nahmatáno především u mužské části populace [10]. Díky spodním rohům chrupavky štítné může dojít k jejímu natáčení vpřed nebo vzad, což má za následek napínání hlasivek a následně regulaci samotné frekvence kmitání [10]. Dále se v hrtanu nachází jazyk [10]. Jazyk je jediná kost v hrtanu, která je uchycena pomocí thyroepiglottických vazů k zadní straně chrupavky štítné [11]. I když nebývá uvažována jako přímá součást hrtanu, je k ní uchyceno velké množství hrtanových svalů a slouží tak jako opora pro pohyblivé uložení a zavěšení ostatních částí hrtanu [10, 11]. Velmi důležitou roli plní hrtanová příklopka. Její účel je separovat dýchací cesty od trávicího traktu, speciálně při posuvu potravy.



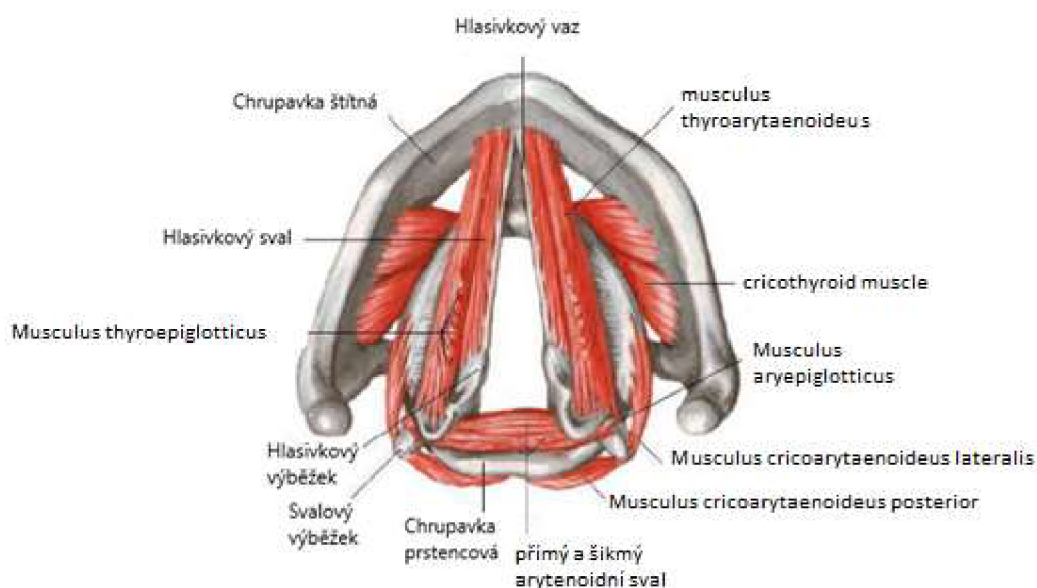
Obr. 4 Kostra hrtanu [9]



Obr. 5 Ventrální pohled na hrtan [9]

Svalstvo hrtanu

Pohyby chrupavek a kostí v hrtanu jsou zajištěny hrtanovým svalstvem (Obr. 6). Svalstvo je děleno na vnitřní a vnější [10]. Zatímco vnější část tvoří vazby k okolí, vnitřní část svalstva propojuje hrtanové chrupavky, tzn., že má přímý vliv na fonační funkci [10, 11]. Vnitřní část je dělena na adduktory, svaly zodpovědné za přitisknutí hlasivek, a na abduktory, svaly plnící opačnou funkci [10, 11].



Obr. 6 Vnitřní svalstvo a chrupavky (kaudální pohled) [10, 11]

Musculus cricothyroideus (vnější sval) spojuje ploténky chrupavky štítné a oblouk chrupavky hlasivkové [12]. Jedná se o párový sval zajišťující otáčení chrupavky štítné kolem chrupavky prstencové, což přímo ovlivňuje napětí a prodloužení hlasivek a tím pádem i frekvenci kmitání [10].

Musculus thyroarytenoideus (hlasivkový sval) napínající se mezi chrupavkou štítnou a chrupavkou hlasivkovou. I toto je párový sval dále dělený na externus (funkce zkracování svalu) a internus (pro přesné dopnutí při fonaci). Sval má přímý význam pro ovlivňování výšky tónu hlasu [10].

Musculus cricoarytenoideus posterior (zadní sval) upínající se mezi vnitřní plochou chrupavky štítné a chrupavkou hlasivkovou [13]. Jedná se o velmi důležitý sval rozevírající hlasivkovou štěrbinu při dýchání (abdukci) [10].

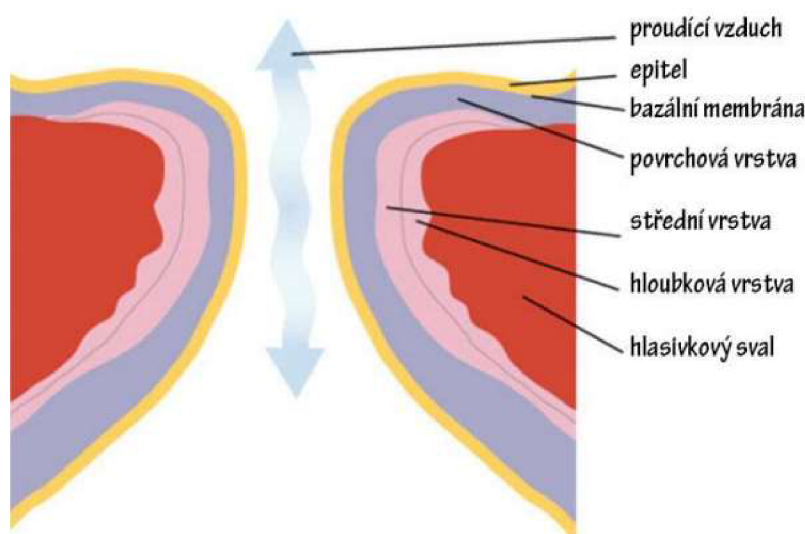
Musculus cricoarytenoideus lateralis (boční sval) propojující horní okraj oblouku prstencové chrupavky a výběžek hlasivkové chrupavky [13]. Sval zajišťující přitlačení hlasivek k sobě (addukci) [10].

Musculus arytenoideus, sval nacházející se na hřbetní ploše hlasivkových chrupavek a mezi nimi [13]. Slouží k úplnému uzavření mezery v oblasti hlasivek (*glottis*) [10].

Musculus aryepiglotticus, tento sval je pokračování předchozího svalu spojený s hrtanovou příklopkou [13, 10]. Otevírá/uzavírá hrtanovou příklopkou a tím odděluje trávicí trakt od dýchacího [13, 10].

1.2.2 Hlasivky

V lidském těle se hlasivky nacházejí v dutině hrtanu [12]. Jedná se o dutinu ve tvaru přesýpacích hodin rozdělenou do tří částí [12]. První část je hrtanová předsíň tvaru trychtýře zužující se směrem dolů, druhá část je kaudální část o tvaru rozšiřujícího se trychtýře [12]. Třetí, nejdůležitější část se nachází mezi oběma výše zmíněnými a jedná se o oblast hlasivek s mezerou (mezi hlasivkami) nazývanou hlasivková štěrbina (*glottis*) [12]. Hlasivky si lze představit jako valovité útvary, známé i pod pojmem hlasové valy [11]. Jejich tvar by se dal popsat jako hranol se zaoblenou hranou o velkém poloměru v poměru k tělu hlasivky. Velmi důležitým faktem je rozdělení hlasivek. Rozdělení hlasivek je do několika vrstev, z nichž první je vrstva epitel. Jedná se o šupinový epitel o tloušťce 0,05–0,1 mm [14]. Epitel obklopuje další vrstvu nesoucí název lamina propria, v podstatě je to podslizniční vazivo složené ze 3 vrstev oddělující epitel a střední oblastí [14]. Reinkeho prostor lze popsat jako povrchovou vrstvu složenou z měkké tkáně s vlastnostmi tekutiny, dohromady pak společně s epitel a lamina propria tvoří povrchovou část hlasivky o tloušťce 0,3 mm [14]. Po Reinkeho prostoru již následuje střední oblast tvořená většinou elastinovými vlákny [14]. Vlákna jsou zde již uspořádána a podélně orientována, v této vrstvě se také nachází nepatrné množství kolagenních vláken [14]. Následující hloubková vrstva je tvořena převážně z kolagenních vláken, která způsobují, že se jedná o poměrně tuhou vrstvu o tloušťce 1 mm [14]. Nejhlouběji se v hlasivce nachází thyroarytenoidní sval, tvořící převážnou část hlasivky, jeho tloušťka je zhruba kolem 7–8 mm [10]. Celkově tedy v této práci bude hlasivka rozdělována do 4 vrstev: epitel, lamina propria, hlasivkový vaz a sval (Obr. 7). Vrstva lamina propria je pro účely této práce složena z povrchové a střední vrstvy, hloubková vrstva je popsána jako vaz [15].



Obr. 7 Řez hlasivkami [11]

1.3 Anatomie rezonanční a artikulační části lidského hlasového ústrojí

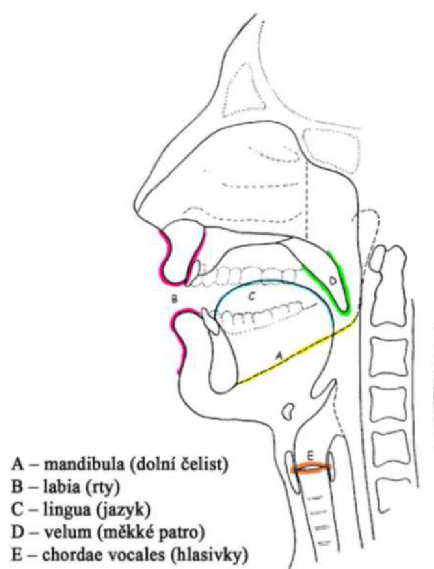
Rezonanční část lidského hlasového ústrojí se skládá z rezonančních dutin modifikujících vlastnosti hlasu svou rezoncí. Nachází se zde 3 hlavní dutiny (hltanová, ústní a nosní) [16]. Velikost a tvar těchto dutin je závislý na jednotlivých prvcích artikulační části.

Dutinu nosní, jelikož se při vyslovování hlásek využívá velmi zřídka, je potřeba izolovat od dutiny ústní. Toto je zajištěno měkkým patrem, které se zvedá a přiklopem k nosohltanu uzavírá průchod vzduchu do nosní dutiny [16]. Odlišností této dutiny je, že jako jediná nemůže měnit svůj tvar a velikost [17].

Dále je zde dutina ústní, v níž se nachází největší množství artikulačních prvků, její objem je proměnlivý a ohraničený rty a vstupem do dutiny hltanové [16].

Poslední ze tří dutin je dutina hltanová, trubice tvaru nálevky o délce zhruba 12 cm [16] navazující na dutinu ústní a končící v hrtanu. Má proměnlivý tvar a parametry závislé na pohybu jazyku, měkkého patra, svalů a pozici hrtanu [16].

Mezi artikulační prvky patří rty, zuby, čelisti, jazyk a jiné svaly, velká část těchto prvků se nachází v ústní dutině (Obr. 8) [17].



Obr. 8 Ústní dutina s artikulačními prvky [43]

2. Tvorba hlasu a jeho úprava

2.1 Základní pojmy

Dříve, než bude popsána tvorba a úprava hlasu je potřeba vysvětlit určité pojmy a jejich drobné rozdíly pro lepší pochopení.

První z nich je hlas. Definice hlasu popisuje hlas jako zvuk vyprodukovaný hlasivkami. Hlas lze také rozdělit do dvou skupin, a to na znělý nebo neznělý hlas. Rozdíl mezi nimi je ve využití hlasivek. Lze říct že pokud hlasivky vibrují jedná se o znělý hlas bez ohledu na to, zda je jakkoliv upraven artikulačními prvky [15, 18]. Neznělý hlas je v podstatě opak, rovněž je vytvořen v hlasovém ústrojí ale hlasivky se nezapojují do jeho tvorby [15, 18].

Druhý z pojmů je vokalizace neboli ozvučení. Ten se vztahuje ke zvuku vyprodukovanému vibracemi hlasivek, ale nejlépe ho lze spojit se zvuky nepovažovanými za řeč a nebo zvuky předcházející řeči [15].

Poslední pojem je fonace. Fonace je technický termín použitý k popisu fyzického a fyziologického procesu vibrace hlasivek [15, 19]. Na začátku procesu jsou hlasivky přitisknuty k sobě, což má za následek zvýšení subglotického tlaku [20]. Tlak narůstá až k dosažení hodnoty, při které dojde k rozevření *glottis* [20]. Proudění vzduchové směsi způsobí pokles subglotického tlaku a následně addukaci hlasivkových svalů. Jakmile jsou hlasivky opět přitisknuty k sobě, subglotický tlak narůstá a proces se o vysoké frekvenci opakuje [20].

2.2 Vznik hlasu

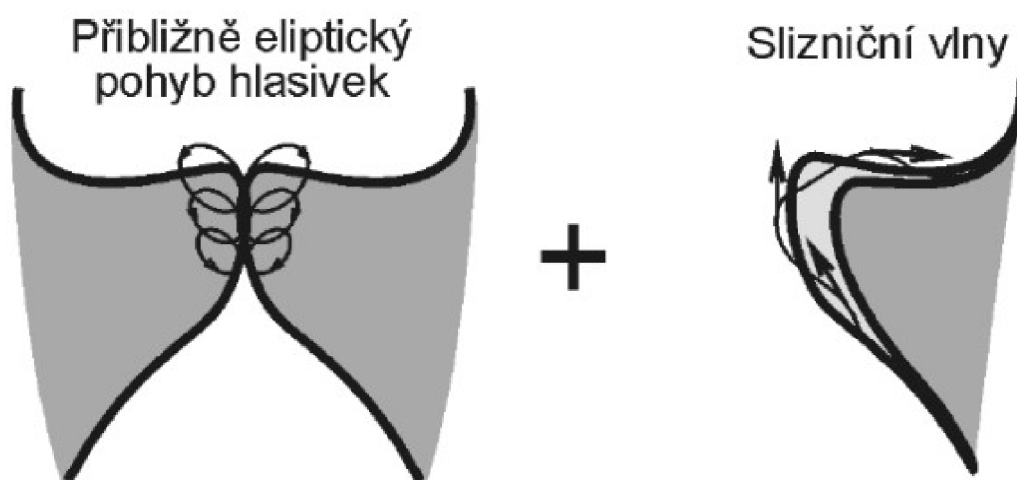
O vzniku hlasu byla vytvořena myoelasto-aerodynamická teorie (MEADT), jejímž autorem je Van den Bergen [21]. Tato teorie vysvětluje vibrační charakteristiky hlasivek závislé hlavně na pružnosti tkání [24]. Dále také popisuje hlas jako produkt proudění vzduchu a elastických vlastností tkání hlasivek [24]. Pro vznik hlasu je vzduch považován jako zdroj energie a kmitání hlasivek, což má za následek chvějí vzduchového sloupce v *glottis*, toto se pak následně projeví jako šíření zvuku upraveného rezonančními dutinami a artikulačními prvky [22, 23]. MEADT je doposud uznávanou a používanou teorií odbornou veřejností [24, 25]. S návazností na tuto teorii lze říct, že hlas vzniká v hlasovém ústrojí následujícím způsobem:

Počátek vzniku hlasu se nachází v plicích, do kterých je při vdechu pomocí dýchacích svalů přivedena vzduchová směs. Při výdechu je směs naopak vytlačována z plic přes průdušky do průdušnice a dále do hrtanu, kde jsou umístěny hlasivky. Zde se vzduch začne hromadit a postupným stlačováním plic svaly vzniká pod hlasivkami tlak, který působí na hlasivky ze spodu až do určitého bodu, ve kterém je tlak natolik silný že rozevře hlasivky. V ten moment *glottis* proudí sloupec vzduchu, který uvolní

tlak z pod hlasivek což má za následek opětovné uzavření *glottis* svaly. Tento proces se o vysoké frekvenci opakuje což má za následek rozehvěnění sloupce vzduchu a následný vznik hlasu. Hlas pak dále rezonuje v dutinách a je upravován artikulačními prvky až po výstup z úst mezi rty kde má svou finální podobu, slouží-li pak ke komunikaci jedná se o řeč.

2.2.1 Pohyby hlasivek při fonaci

Při fonaci je pohyb hlasivek složen ze dvou složek pohybů (Obr. 9) [22]. První složka pohybu hlasivek je pohyb přibližně eliptický [22]. Druhý pohyb je spojený s interakcí hlasivek a vzduchu, při tomto pohybu dochází k pohybu slizničních vln směrem vzhůru. Změna tvaru hlasivek díky druhému pohybu má význam pro lepší přenos energie mezi proudícím vzduchem a hlasivkami, který je důležitý k zachování kmitavého pohybu hlasivek [22].



Obr. 9 Pohyby hlasivek [22]

2.3 Různé druhy fonace a hlasu

Hlas vzniká díky fonaci hlasivek, vzhledem k různým druhům a různé kvalitě hlasu existují i různé druhy fonace hlasivek. Základní a nejběžnější je rozdělení na hlas znělý a neznělý což je následně rozděleno do konkrétních typů fonace [26].

2.3.1 Neznělé fonace

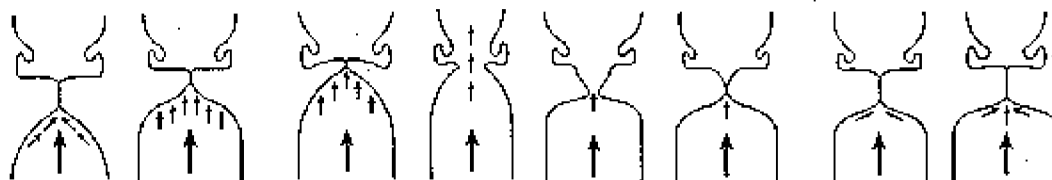
Nil(neznělá) fonace, vzniká buď úplným zablokováním průtoku vzduchu addukcí hlasivek, nebo „čistým“ průchodem vzduchu skrz maximálně abdukované hlasivky [28, 29]. Proudění vzduchu bývá laminární a nevzniká žádná vibrace hlasivek [26, 27].

Dýchání je typ fonace, při kterém je hlasivková štěrbina maximálně rozevřena [29]. Rozdíl oproti předchozímu typu je v proudění. Při dýchání je průtoková rychlost daleko vyšší a vzniká tak turbulentní proudění [26, 28]. Tento typ fonace je využit např. na úplném začátku vyslovování anglického (H) [27, 28].

Šepot, velmi nevýrazná fonace, která může být upravena na řeč. Vzniká turbulencí generovaným třením mezi vzduchem a nevibrujícími hlasivkami a stěnami hrtanu [27, 28].

2.3.2 Znělé fonace

Modální hlas je nejběžnější typ fonace využívaný při normální řeči (Obr. 10) [27, 28].



Obr. 10 Pohyb hlasivek při modálním hlasu [29]

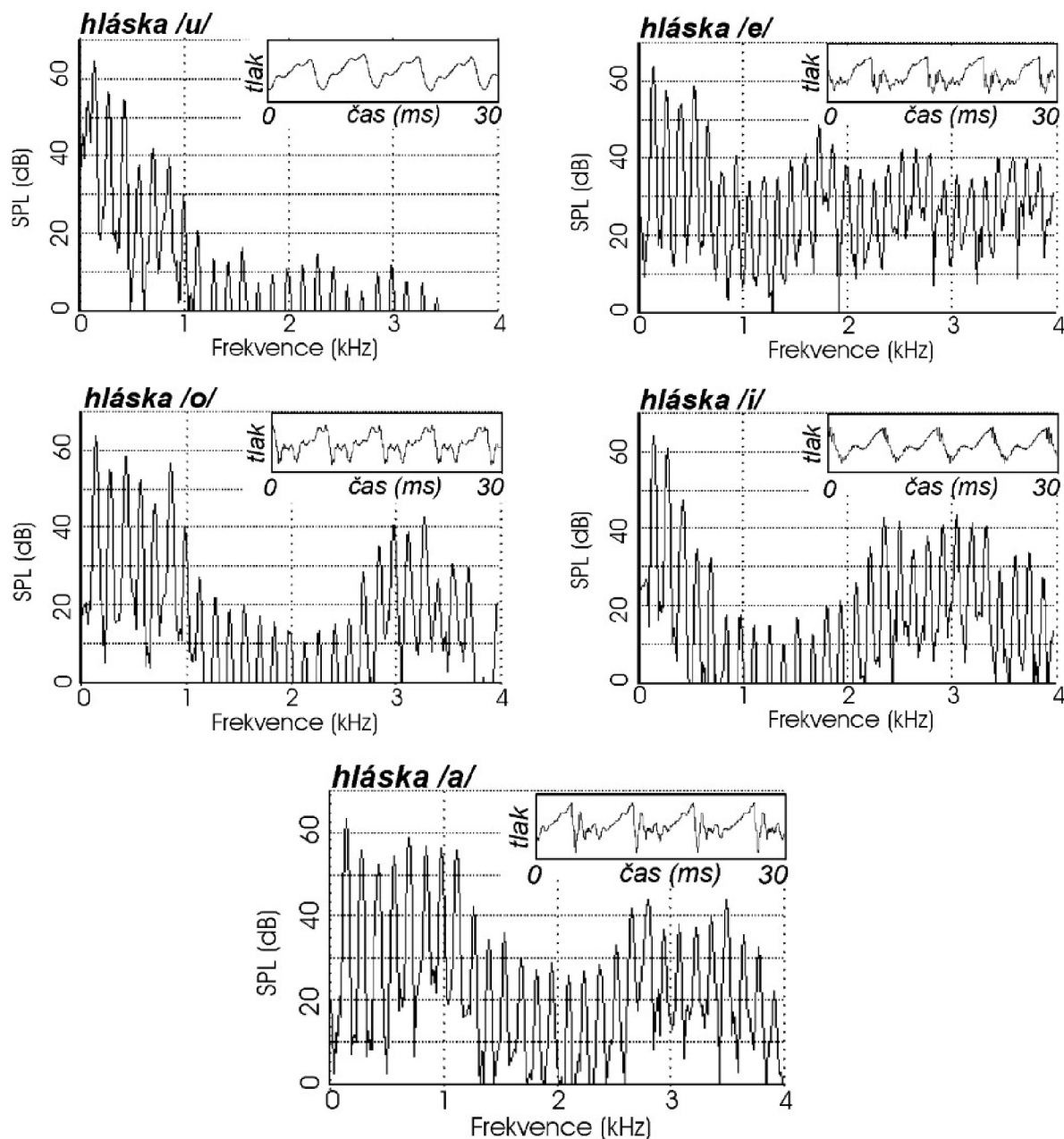
Skřípavý/trhavý hlas (creak phonation) je fonace produkovaná hlasivkami o velmi nízké frekvenci 25–50 Hz [27, 28]. Hlasivky jsou silně addukované a vytvářejí úzkou štěrbinu se slabým napětím [26]. Akusticky to vytváří nepravidelné hlasové pulsy připomínající rychlé klepání [26].

Tvrký hlas (harsh voice) vzniká díky velmi silnému napětí v hlasivkách, což ústí v nadměrné přiblížení hlasivkových valů [27, 28]. Drsná fonace je nepravidelná, její základní frekvence bývá 100 Hz u mužského pohlaví [27, 28].

Falsetto je fonace o znatelně vyšší frekvenci než při modálním hlasu [27, 28]. Hlasivky jsou podélně roztažené, což je činí relativně tenkými [27, 28]. Vibrující část je menší a generovaný tón vyšší [27, 28].

2.4 Akustické vlny českých samohlásek

Spojením fonace hlasivek, specifickou rezonancí dutin a finální úpravou artikulačními prvky vznikají akustické vlny jednotlivých hlásek [3]. Zde jsou uvedeny příklady českých samohlásek (Obr. 11).



Obr. 11 Akustické vlny českých samohlásek [3]

3. Výpočtové modely hlasivek

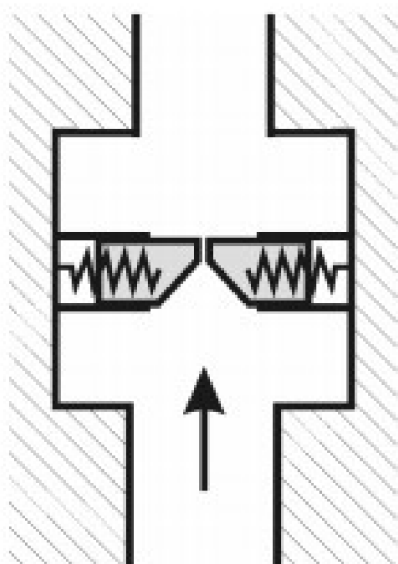
Ve výzkumu hlasivek a tvorby hlasu tvoří značnou část návrh výpočtových modelů, díky kterým by bylo možné modelovat chování hlasivek u pacientů s poruchami hlasu [22, 30]. Bohužel dosud nebyl vytvořen model, který by dostatečně detailně popisoval stav hlasivek s viskoelastickými vlastnostmi jednotlivých vrstev a tkání, dokázal určit velké namáhání, predikci napjatosti a poškození [22, 30].

3.1 Hmotové modely

Jedná se o nejjednodušší modely sloužící k popisu matematicko-fyzikálních vlastností hlasivek, vyznačují se nízkým počtem stupňů volnosti, malým počtem prvků představujících hmotu, tlumících a pružných členů [22].

3.1.1 Ewaldova píšťala

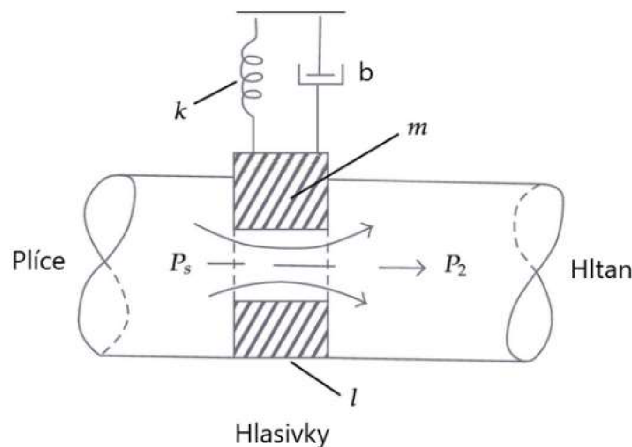
Jeden z historicky prvních modelů založený na experimentálním modelování (Obr. 12) [3, 22]. Model je tvořen dvěma opačně uloženými jazýčky, které jsou k sobě vzájemně přitlačovány dvěma pružinami v trubici [3, 22]. Pružné jazýčky s narůstajícím spodním tlakem opouští stlačenou polohu a rozevírají se, načež poklesne tlak a špičky jazýčků se opět srazí silou pružiny k sobě [22]. Periodické opakování následně vytvoří akustický signál.



Obr. 12 Ewaldova píšťala [3]

3.1.2 Jednohmotový model

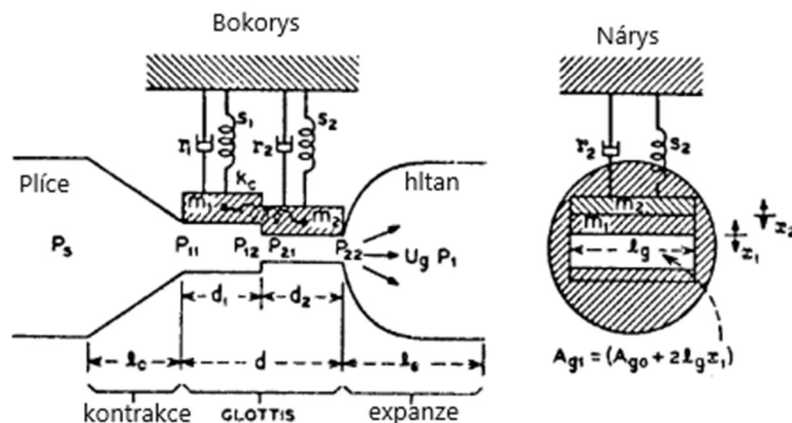
Velmi jednoduchý model hlasivek (Obr. 13) s jedním stupněm volnosti vytvořený J. L. Flanaganovou [31]. Hlavní výhodou modelu je jeho jednoduchost. Model popisuje pouze jednu hlasivku a druhou nahradí zrcadleným modelem, pohyb nastává pouze v jednom směru kde je hlasivka zastoupena jedinou hmotou uloženou pružně s tlumením [22, 31]. Nevýhodou je, že přesně nevystihuje pohyb hlasivek, jelikož u tohoto modelu není patrný pohyb slizniční vlny [22, 31].



Obr. 13 Jednohmotový model [44]

3.1.3 Dvouhmotový model

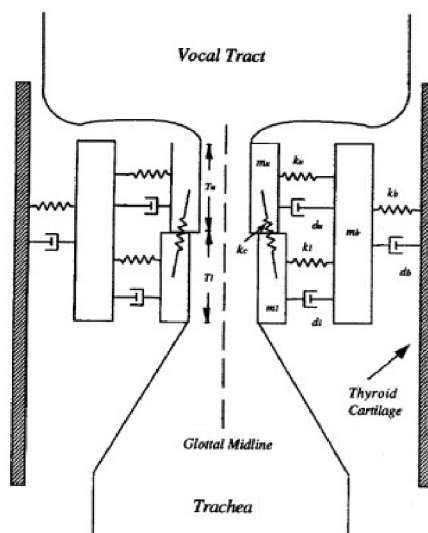
Jeden z nejpoužívanějších hlasivkových modelů tvořený sedmi viskózně-elastickými parametry, jehož interakce se sloupcem vzduchu je popsána několika geometrickými a aerodynamickými parametry [3, 31]. Velkou předností toho modelu je, že při podmínkách odpovídajících normálním fonačním parametrům reprezentuje slizniční pohyb (Obr. 14). Model byl použit i pro zavedení teorie nelineární dynamiky [3, 31].



Obr. 14 Dvouhmotový model [3]

3.1.4 Tříhmotový model

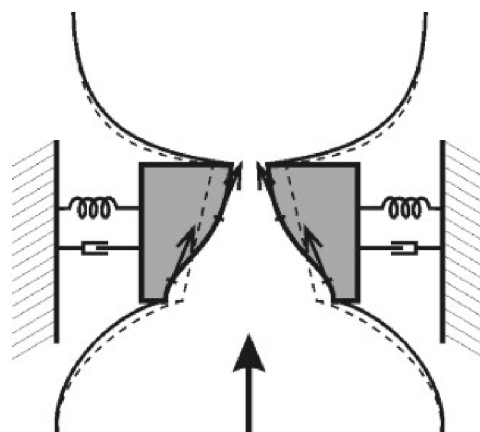
Jedná se o zvětšenou verzi dvouhmotového modelu, která byla rozšířena o 3. hmotnostní člen [32]. Model je tedy složen ze dvou hmotnostních členů představujících vrchní vrstvu hlasivek a třetího představujícího hlasivkový sval (Obr. 15), vše je pak propojené pružnými a tlumícími prvky [32].



Obr. 15 Tříhmotový model [3]

3.1.5 Model slizniční vlny

Další matematickofyzikální model byl vytvořen na základě pozorování slizničních vln při kmitání hlasivek [32]. Model je tvořen jedním hmotnostním členem, jehož horní část je oproti spodní za účelem napodobení posunu slizniční vlny fázově zpomalena (Obr. 16), celkově pak počítá pouze se 4 viskózně-elastickými parametry [3].



Obr. 16 Model slizniční vlny [3]

3.2 Modely s vysokým počtem stupňů volnosti

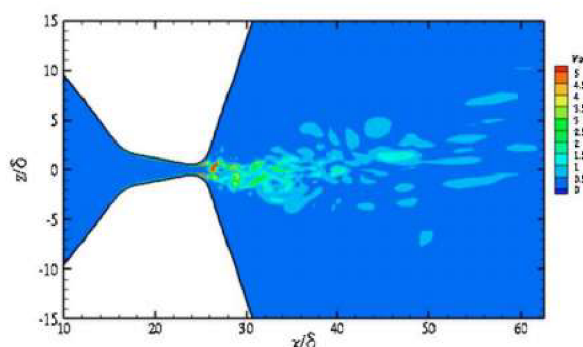
Modely řešené výpočtově za použití MKP, v porovnání s výše uvedenými, se jedná o modely se značně výstižnějším popisem chování hlasivek s možností integrace poruch a patologie hlasivek [22]. Také jimi lze modelovat nejen interakci proudění kolem hlasivek ale i interakci tekutiny se strukturou [22].

3.2.1 Modely proudění

Modely řešící proudění vzduchu přes nepohyblivé hlasivky s určitými parametry pro šířku hlasivkové štěrbinu, popř. řeší hlasivky s předem nastaveným pohybem [22].

Proudění přes tuhý model hlasivek

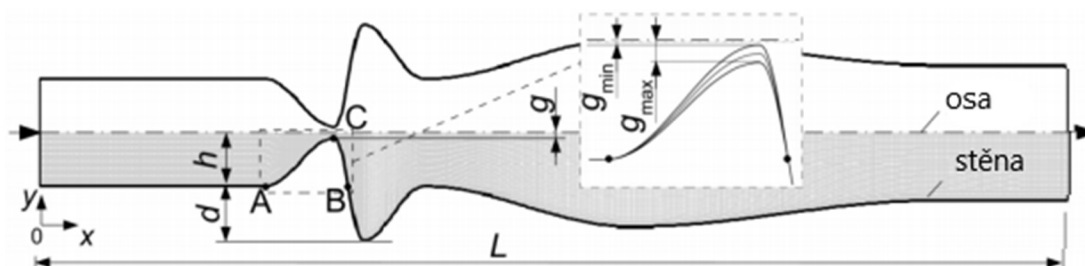
Jedná se o numerickou simulaci, ve které se řeší turbulentní přechod proudu vzduchu skrz nasimulovanou hlasivkovou štěrbinu [22]. Model je celkově zjednodušený na rovinný kanál s hlasivkami uvažovanými ve dvou variantách (Obr. 17), buď v konvergentní poloze (sbíhají se) nebo v divergentní poloze (rozbíhají se) [22].



Obr. 17 Proudění tuhým modelem s hlasivkami v konvergentní poloze [22]

Model nestacionárního proudění vzduchu přes hlasivky

Numerické simulace rovinného nestacionárního nestlačitelného a viskózního pole vzduchu proudícím v symetrickém kanále o nízkých vstupních rychlostech (Obr. 18) [22].



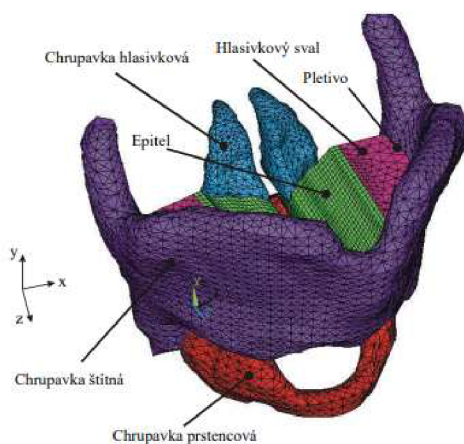
Obr. 18 Ukázka geometrie kanálu [22]

3.3 Geometrické modely

V současné době tvoří významnou část výzkumu vzniku hlasu a funkce hlasivek geometrické modely. Jedná se o komplexní modely lidských hlasivek získané hlavně díky lékařské práci v oblasti patologie a radiologie lidských hlasivek. Modely rozdělujeme do dvou skupin, na modely s reálnou geometrií a na modely s idealizovanou geometrií.

3.3.1 Modely s reálnou geometrií hlasivek

Modely s reálnou geometrií jsou skupinou modelů, u kterých byla geometrie získána ve spolupráci s lékaři, například pomocí snímků z magnetické rezonance. Model vyobrazený níže byl navržený prof. Tomášem Vampolou, doktorem Jaromírem Horáčkem a doktorem Ivo Klepáčkem [30]. Je to konečnoprvkový model lidské hlasivky včetně mechanismu umožňujícího napínání svalů (Obr. 19), vytvořený za účelem simulování chování hlasivek v případě různých poruch a možnosti popisu viskoelastických vlastností tkání [30]. Tento model díky MKP je schopný teoreticky předpovídat způsob poškození hlasivek z následku kmitů, zároveň brát v potaz fonační postavení hlasivek a umožňovat změnu geometrické i materiálové konfigurace samotného modelu [30].



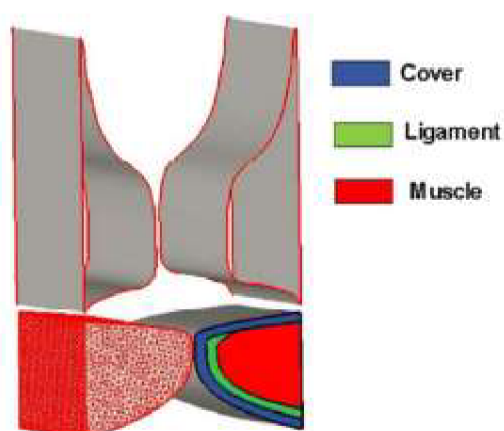
Obr. 19 Výpočetní MKP model lidské hlasivky [30]

3.3.2 Modely s idealizovanou geometrií hlasivek

Modely s idealizovanou geometrií jsou taktéž získány na bázi geometrie skutečných hlasivek, ale došlo u nich k zjednodušení, aby bylo možné je vymodelovat [30]. Typickou vlastností idealizovaných modelů je pak parametrizace, díky které lze měnit jejich tvar a parametry [30].

Vrstevnaté parametrické modely

Modely patří k nejrozšířenějším z parametrických modelů v problematice hlasivek. Podstata modelů je v jejich samostatné struktuře, která se skládá většinou ze 3 vrstev, kdy se jedná o epitel, hlasivkový vaz a sval. Geometrie modelů je dostatečně propracovaná, aby zahrnula tvar a pohyb hlasivek, ale zároveň aby byly jejich parametry jednoduché pro tvorbu a parametrizaci. Mnoho nepoužívanějších modelů toho typu má základ v Schererově modelu M5 [43] tvořícím jejich vnější strukturu, dále použitý v této práci [12, 32]. Naopak poměrně odlišným modelem je například Zhengův model (Obr. 20), který je rozšířený o nepravé řasy k ovlivnění proudu vzduchu [12, 32].



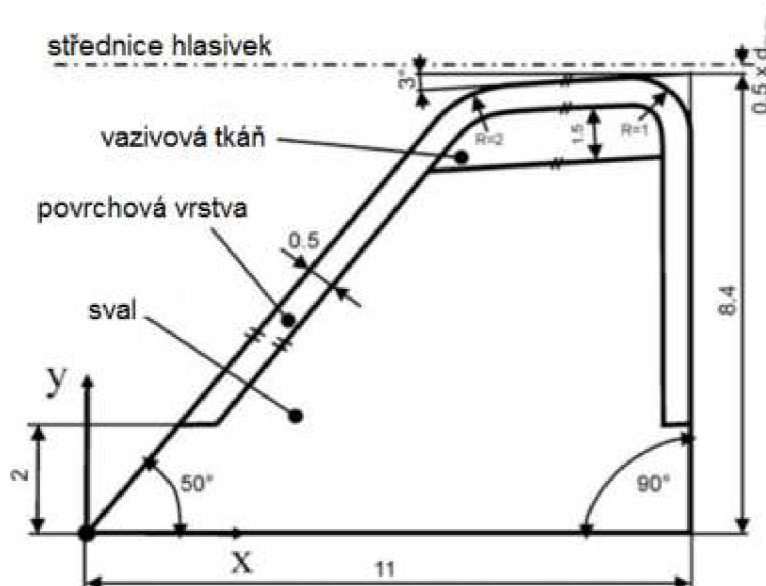
Obr. 20 Zhengův třívrstvý model [33]

4. Model 5 a vlastní frekvence kmitání hlasivek

Tato kapitola bude zaměřená na vytvoření parametrického modelu závislého na úhlu čela hlasivky, dále na modely materiálu a následně zjištění vlastní frekvence pro kmitání hlasivek.

4.1 Geometrie modelu M5

Původní model M5 je popsán jako zjednodušený, parametrický model [34]. Tvar původního modelu M5 je definován nelineárními rovnicemi definujícími parametry pouze pro povrch hlasivky [34]. Rovnice jsou pak závislé na 3 parametrech z nichž hlavní je úhel sklopení/naklopení čela hlasivky. Vzhledem k vývoji výpočetních programů byly k původní povrchové vrstvě přidány další. Model byl tak rozdělen do několika vrstev o různých vlastnostech jako je např. třívrstvý Schererův model (Obr. 21) [35]. V této práci bude použita úprava modelu M5, kterou provedl ve své disertační práci Ing. Michal Matug [14]. Model M5 rozšířil o další vrstvy, odlišené svým uložením, parametry, a hlavně Youngovým modulem pružnosti. V neposlední řadě je model rozšířen o třetí rozměr.



Obr. 21 Třívrstvý Schererův model [35]

4.1.1 Parametrické rovnice a rozměry

Rovnice použité pro tvorbu parametrického modelu M5

$$R_{\psi} = \frac{R_0}{1 - \sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad (1)$$

$$R_L = \frac{T}{2} \quad (2)$$

$$B = \frac{\sqrt{2} \cdot R_{\psi}}{\sqrt{1 - \sin\left(\frac{\psi}{2}\right)}} \quad (3)$$

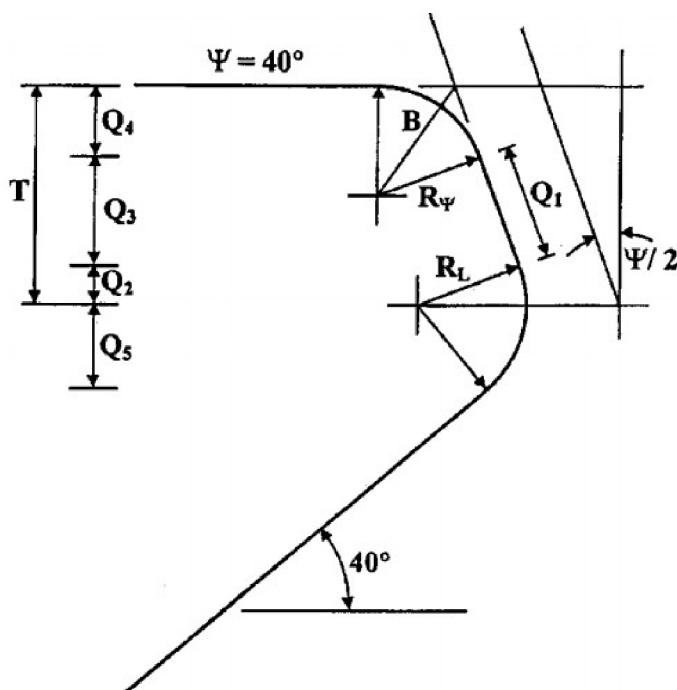
$$Q_1 = (T - R_{\psi}) \cdot \sec\left(\frac{\psi}{2}\right) + (R_{\psi} - R_L) \cdot \tan\left(\frac{\psi}{2}\right) \quad (4)$$

$$Q_2 = R_L \cdot \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \quad (5)$$

$$Q_3 = Q_1 \cdot \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) \quad (6)$$

$$Q_4 = R_0 \quad (7)$$

$$Q_5 = R_L \cdot \sin(50^\circ) \quad (8)$$

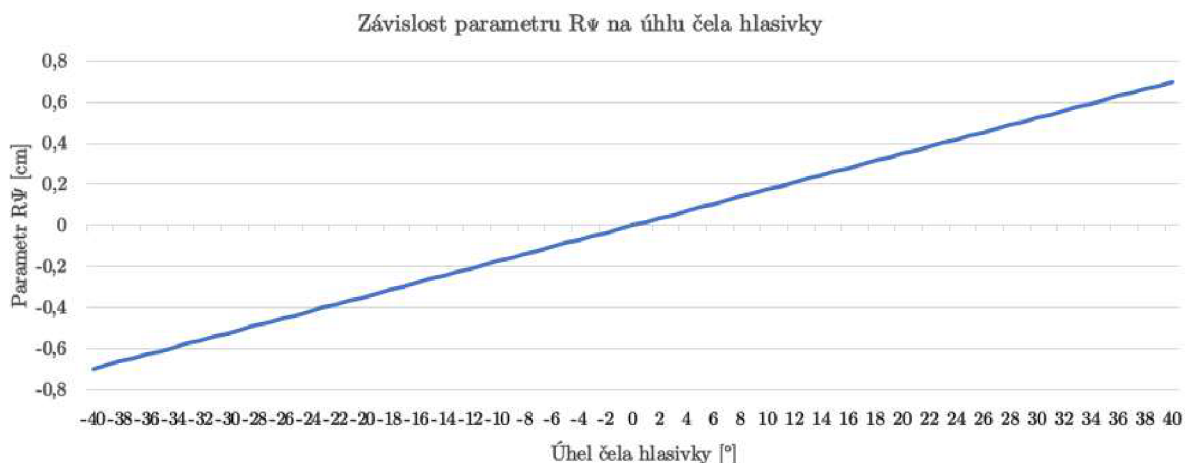


Obr. 22 Lineárně tvořený model [34]

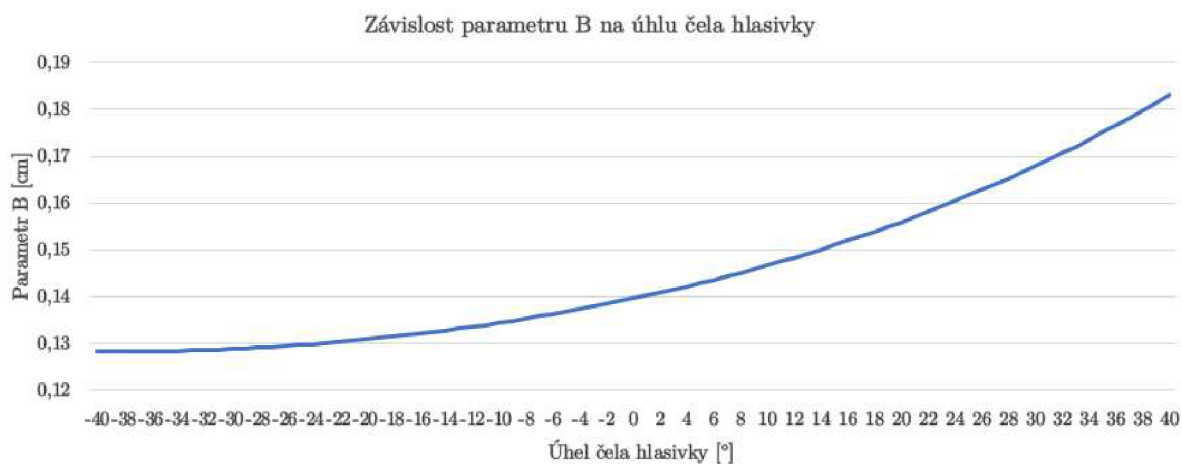
Pro účely této práce byly vytvořeny rozměry o rozmezí úhlu čela hlasivky modelu M5 (Obr. 22) od -40° do 40° (včetně nuly a krajních bodů). V následující tabulce (Tab. 1) jsou uvedeny příklady rozměrů s diferencí po 5 stupních. Tato diference slouží pouze pro uvedenou tabulku, pro grafy uvedené později v této práci je diference aritmetické posloupnosti rovna 1 stupni, číselně jsou pak hodnoty vyobrazené v příloze (Příloha 2 – Hodnoty parametrů hlasivky).

Tab. 1 Parametry vybraných úhlů

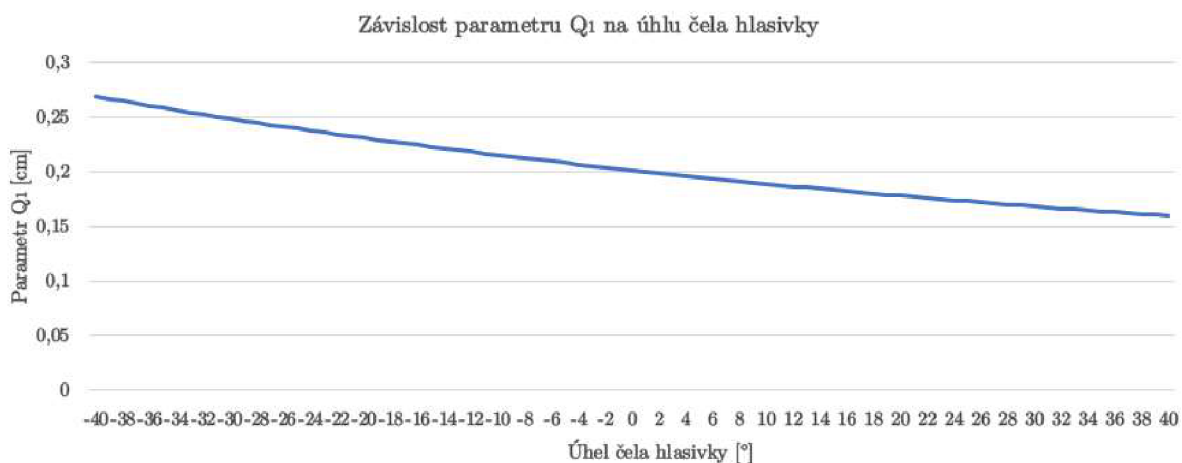
Ψ [°]	R_0 [cm]	$R\Psi$ [cm]	RL [cm]	B [cm]	Q_1 [cm]	Q_2 [cm]	Q_3 [cm]	Q_4 [cm]	Q_5 [cm]	T [cm]
-40	0,0987	0,0735	0,15	0,1282	0,2688	-0,0513	0,2526	0,0987	0,1149	0,3
-35		0,0759		0,1283	0,2584	-0,0451	0,2464			
-30		0,0784		0,1288	0,2486	-0,0388	0,2401			
-25		0,0811		0,1296	0,2394	-0,0325	0,2338			
-20		0,0841		0,1308	0,2309	-0,0261	0,2274			
-15		0,0873		0,1324	0,2228	-0,0196	0,2209			
-10		0,0908		0,1344	0,2152	-0,0131	0,2144			
-5		0,0946		0,1368	0,2080	-0,0065	0,2078			
0		0,0987		0,1396	0,2013	0	0,2013			
5		0,1032		0,1429	0,1949	0,0065	0,1948			
10		0,1081		0,1467	0,1890	0,0131	0,1882			
15		0,1135		0,1510	0,1833	0,0196	0,1817			
20		0,1194		0,1559	0,1780	0,0261	0,1753			
25		0,1260		0,1615	0,1729	0,0324	0,1688			
30		0,1332		0,1679	0,1682	0,0388	0,1625			
35		0,1411		0,1750	0,1638	0,0451	0,1562			
40		0,1500		0,1831	0,1596	0,0513	0,1500			



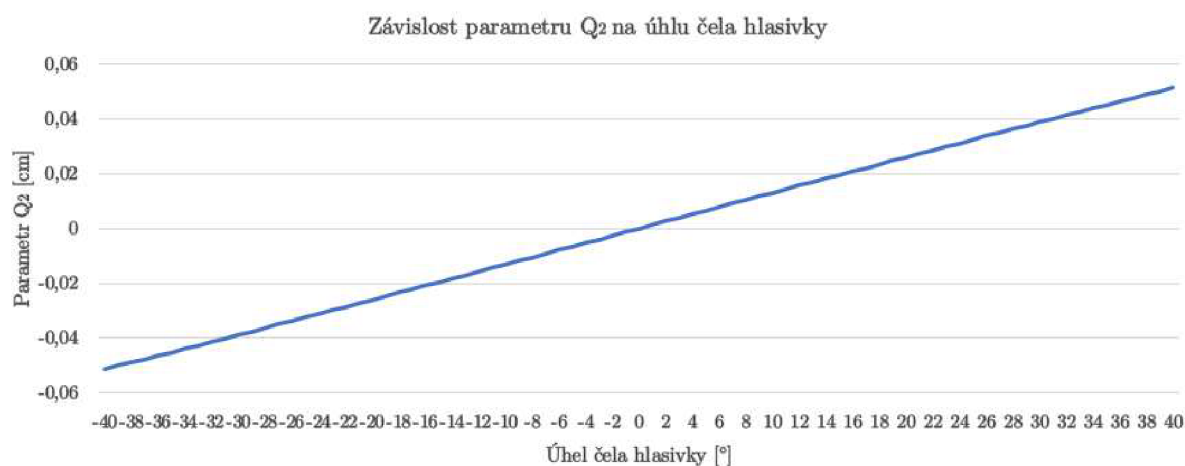
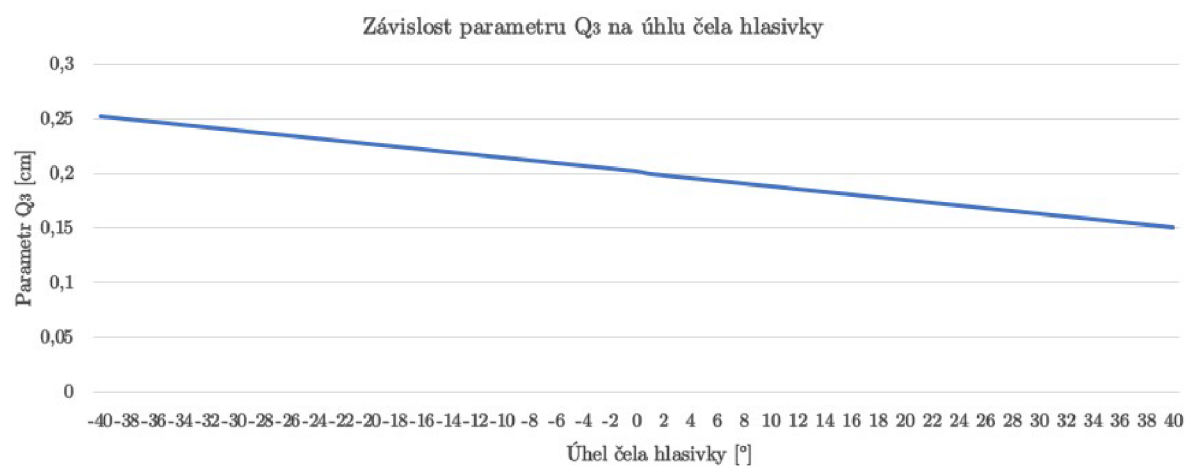
Obr. 25 Graf parametru R_ψ



Obr. 24 Graf parametru B



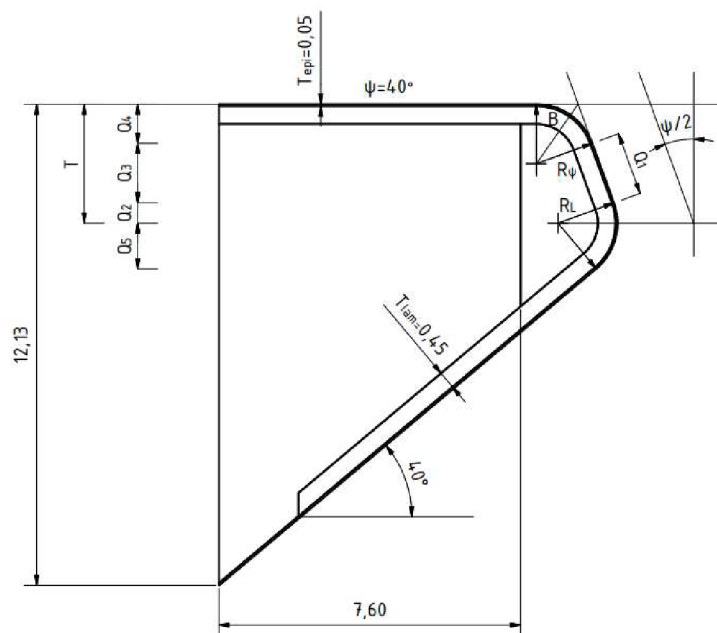
Obr. 23 Graf parametru Q_1

Obr. 26 Graf parametru Q_2 Obr. 27 Graf parametru Q_3

Zatímco parametry R_L , Q_4 a Q_5 mají po celém rozmezí úhlu čela hlasivky konstantní hodnotu, zbytek použitých parametrů svoji hodnotu mění podle dané funkce. Změna je číselně vyjádřena v tabulce (Tab. 1). Graficky v následujících grafech, z nichž každý je věnován určitému parametru. V případech parametrů R_ψ (Obr. 25) a Q_2 (Obr. 26) lze pozorovat lineární nárůst a u parametru B (Obr. 24) je nárůst exponenciální. Naopak u parametru Q_1 (Obr. 23) dochází k nelineárnímu poklesu a u parametru Q_3 (Obr. 27) k rovnoměrnému poklesu.

4.1.2 Vytvoření parametrického modelu

Původní myšlenka byla vytvořit parametrický model s vrstvami rovnoměrně odsazenými o danou tloušťku vrstvy, u toho řešení nastal problém z důvodu malého parametru pro rádius R_ψ . Tento model ale nebylo možné zkompletovat pro rozmezí úhlu čela hlasivky od -40° až do $+40^\circ$ jelikož by rádius, v oblasti kolem úhlu sklopení čela hlasivky tj. $+22^\circ$, začal nabývat záporných hodnot. Z tohoto důvodu byl zvolen již zmíněný Matugův model [14].



Obr. 28 Model M5 s úhlem čela hlasivky $+40^\circ$

Nevýhodou vytváření tohoto modelu v programu Inventor Professional je jeho rozměr značený jako Q_2 . Pro rozmezí -1° až -40° má tento rozměr zápornou hodnotu a tím pádem nelze vytvořit. Tento problém byl řešen přidáním záporného znaménka před Q_2 , pro toto rozmezí došlo k úpravě $Q_2 \rightarrow -Q_2$ a dále také k úpravě výpočtu Q_3 z důvodu podmínky $T = Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0,3$. Q_3 se tedy musí upravit na $Q_3 = Q_3' + 2 * Q_2$. Výhodou tohoto modelu je jeho jednoduchá konstrukce a parametry modelu závislé na úhlu. Oproti modelu Ing. Matuga [14] byly provedeny drobné změny ulehčující parametrizaci modelu, a to vytvořením hlasivkového vazů, jehož zadní strana, směrem dále od čela hlasivky, je definována rovnoběžným odsazením od zadní částí hlasivky o 7,6 mm (Obr. 28). Další odlišností je pak šířka samotné hlasivky, jež byla definována jako 1 cm [36].

4.2 Model materiálu

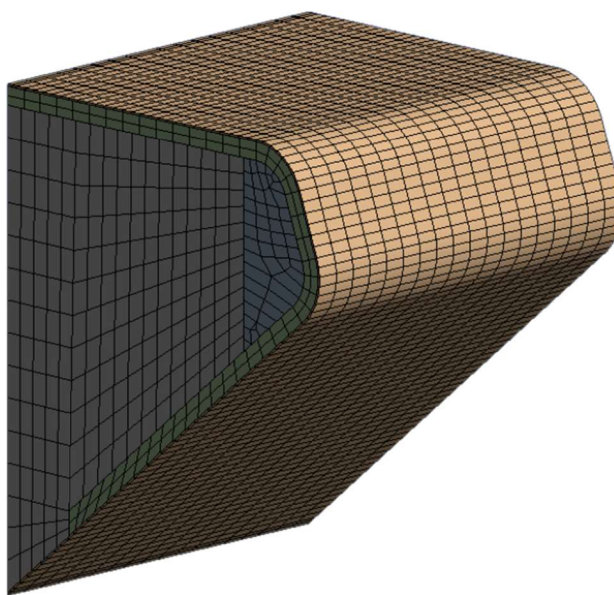
Model M5 je složen z jednotlivých vrstev, jež každá má své vlastní materiálové vlastnosti. Model materiálu je zároveň po celém rozsahu uvažován jako homogenní, izotropní a lineárně pružný [24]. Pro určení vlastní frekvence kmitání hlasivek je potřeba znát Youngův modul pružnosti a Poissonův poměr pro daný materiál, hustotu materiálu (Tab. 2) [10, 34, 35]. Hodnoty těchto parametrů pro jednotlivé vrstvy byly stanoveny citlivostní analýzou v citovaných pracích [10, 37, 38].

Tab. 2 Materiálové hodnoty pro jednotlivé vrstvy hlasivky

Vrstvy	Modul pružnosti	Poissonův poměr	Hustota
Epitel	$E_{epi} = 25000 \text{ Pa}$	$\mu_{epi} = 0,49$	$\rho = 1040 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Lamina propria	$E_{lam} = 2000 \text{ Pa}$	$\mu_{lam} = 0,49$	
Hlasivkový vaz	$E_{vaz} = 8000 \text{ Pa}$	$\mu_{vaz} = 0,49$	
Sval	$E_{sval} = 65000 \text{ Pa}$	$\mu_{sval} = 0,40$	

4.2.1 Síť konečnoprvkového modelu v softwaru ANSYS

Pro provedení výpočtů modální analýzy pomocí MKP byla na geometrii modelu lidských hlasivek vytvořena konečnoprvková síť (Obr. 29). Ta byla vytvořena v prostředí ANSYS Workbench [39]. Síť je vytvořena v závislosti na použitém materiálu a tvaru modelu s možností škálování hustoty sítě [36]. Pro tuto práci byla zvolena hustota sítě 4 se základním nastavením velikosti elementů, velikost je automaticky generována programem. Hustotou sítě můžeme ovládat počet a velikost prvků do kterých bude



Obr. 29 Síť hlasivky

těleso rozloženo, což se následně projeví ve výsledné hodnotě vlastní frekvence. V tabulce 4 (Tab. 3) jsou numericky vyobrazené hodnoty, které ukazují změny výsledné frekvence vybraných úhlů -34° a -14° se závislostí na změně hustoty sítě. Výpočet byl proveden pomocí univerzitní výpočetní techniky. Z této tabulky plyne, že vyšší hustota způsobí pokles hodnot a ve spojení s detaily grafů (Obr. 32, Obr. 34, Obr. 36) je možno říct, že čím větší je hustota sítě tím hladší je křivka reprezentující hodnoty vlastní frekvence úhlů v celém zvoleném rozsahu. Tabulka také vyobrazuje velikosti prvků tvořících model, se zvětšující se hustotou velikost těchto prvků klesá. Hustota sítě byla zvolena 4, jelikož se jedná o hustotu, která vytvoří dostatečně přesný výsledek pro náš účel a také se jedná o hardwarově maximálně přijatelnou hustotu. Dodatečné parametry sítě použité pro její generaci jsou přechodový poměr mezi prvky 0,272 s maximálním počtem 5 vrstev a tempem růstu mezi prvky 1,2. Tímto nastavením vznikl model složený z 49 341 uzlů a 9049 elementů zobrazený na obrázku (Obr. 29).

Tab. 3 Vliv hustot sítě

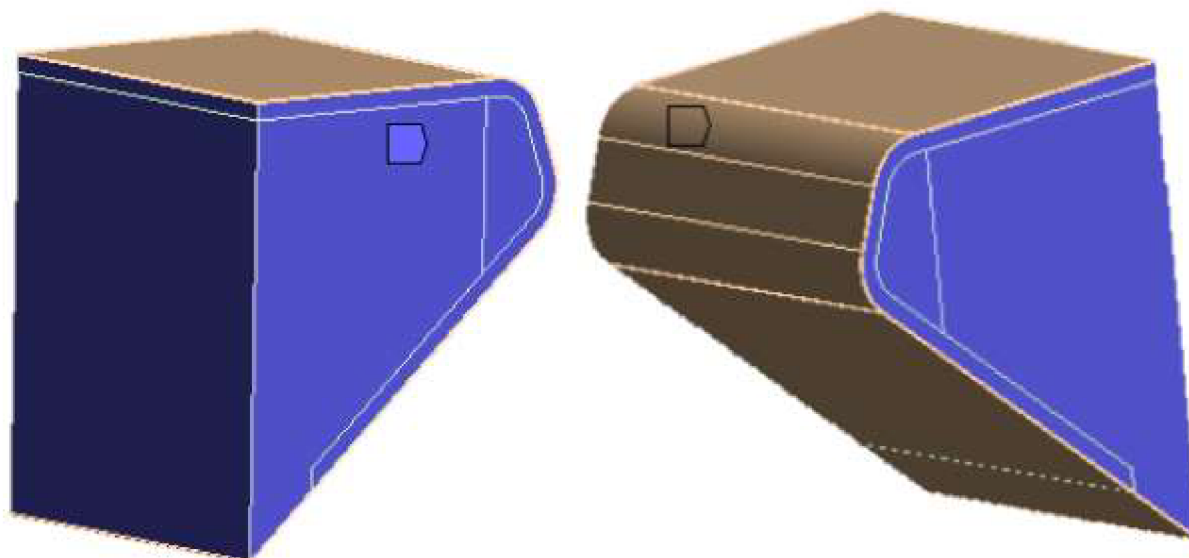
Úhel čela -34°				
Poměr hustot sítě	Velikost prvku	1. vl. frekvence (Hz)	2. vl. frekvence (Hz)	3. vl. frekvence (Hz)
0,5	$1 \cdot 10^{-3}$	148,1	193,31	228,45
1	$5,5267 \cdot 10^{-4}$	147,71	192,61	227,9
2	$2,6335 \cdot 10^{-4}$	147,5	192,26	227,44
Úhel čela -14°				
Poměr hustot sítě	Velikost prvku	1. vl. frekvence (Hz)	2. vl. frekvence (Hz)	3. vl. frekvence (Hz)
0,5	$1,12 \cdot 10^{-3}$	147,79	195,89	225,36
1	$5,6017 \cdot 10^{-4}$	147,29	194,8	224,81
2	$2,8 \cdot 10^{-4}$	147,25	194,77	224,79

4.3 Modální analýza

Jedná se o jednu ze základních metod používaných pro posouzení chování těles nebo konstrukcí. Výstupem této metody jsou vlastní tvary a soubory hodnot reprezentujících vlastní frekvence [40]. Vlastní tvary pak popisují bezrozměrnou deformaci způsobenou vlastní frekvencí [40]. Jelikož se při modální analýze uplatňuje princip superpozice, celková deformace tělesa při kmitání je tvořena spojením jednotlivých prvků [40]. Modální analýzu lze také rozdělit na dva hlavní typy, a to na netlumenou a tlumenou. Reálná tělesa nebo soustavy jsou vždy tlumené, což je u různých komplexních soustav velice komplikované [40]. Pro tuto práci budou hlasivky řešeny netlumenou modální analýzou, což je řešení volného netlumeného kmitání.

4.3.1 Okrajové podmínky

Před výpočtem netlumené modální analýzy je ještě potřeba charakterizovat hlasivku zavedením okrajových podmínek [40]. Konkrétně to v tomto případě znamená vetknutí ploch modelu. Vetknuté části modelu jsou zobrazeny níže (Obr. 30), kde jsou reprezentovány fialovou barvou a volné plochy barvou hnědou.



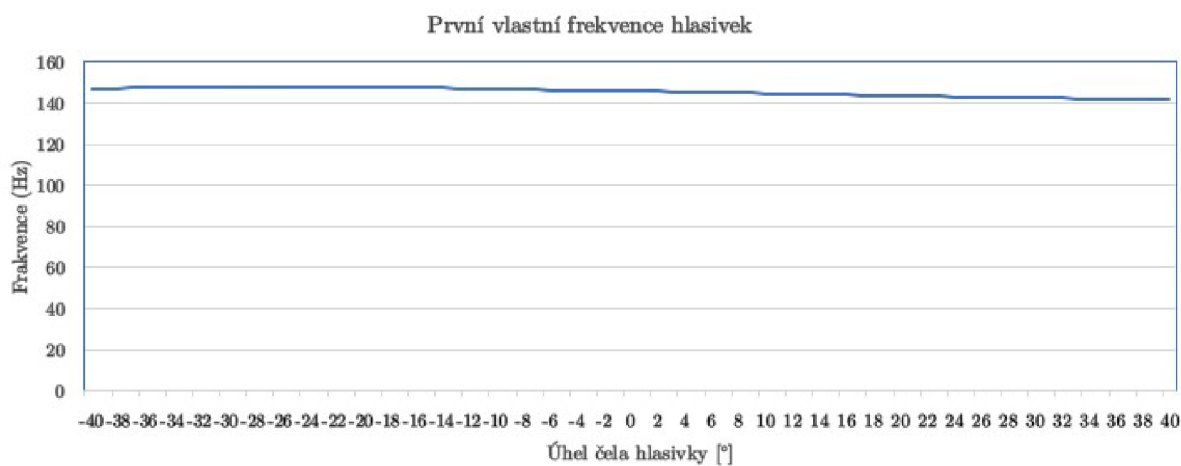
Obr. 30 Vetknutí hlasivky

4.4 Výsledky: vlastní frekvence & vlastní tvary

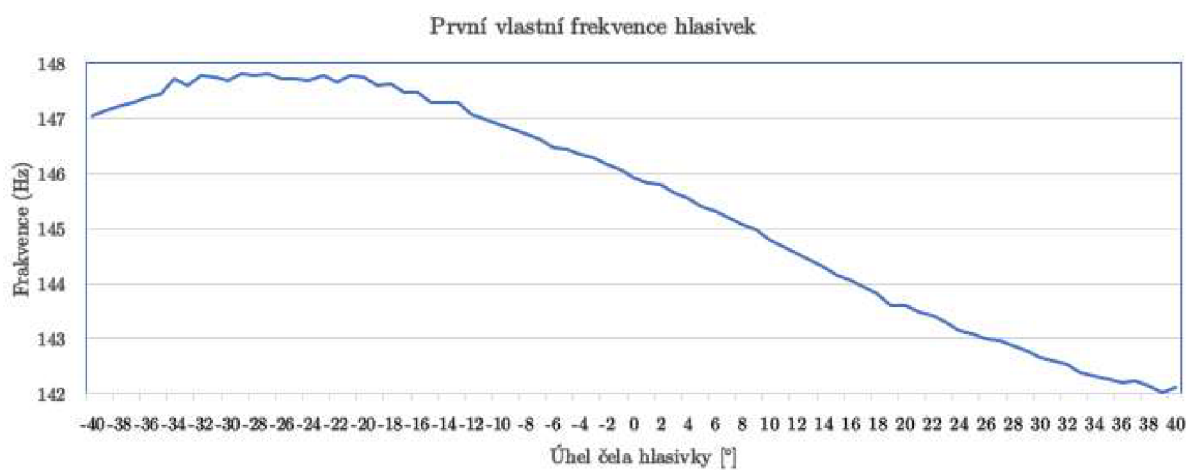
Po vytvoření parametrického modelu, importování potřebných souborů, definování materiálových hodnot vrstev, vytvoření sítě modelu a nastavení okrajových podmínek byly řešeny vlastní frekvence kmitání hlasivek. Pomocí modální analýzy byly zjištěny první tři vlastní frekvence pro každý úhel sklopení čela hlasivky. Tyto hodnoty byly pak zpracovány do tabulky (Tab. 4) a detailněji vyobrazeny v příloze 3 (Příloha 3 – Vlastní frekvence). Hodnoty jsou zapsány i do grafů (Obr. 31, Obr. 33, Obr. 35). Vlastní frekvence je hodnota, kdy daná součást nebo soustava kmitá s největší amplitudou při volném kmitání.

Tab. 4 Vlastní frekvence vybraných úhlů čela hlasivky

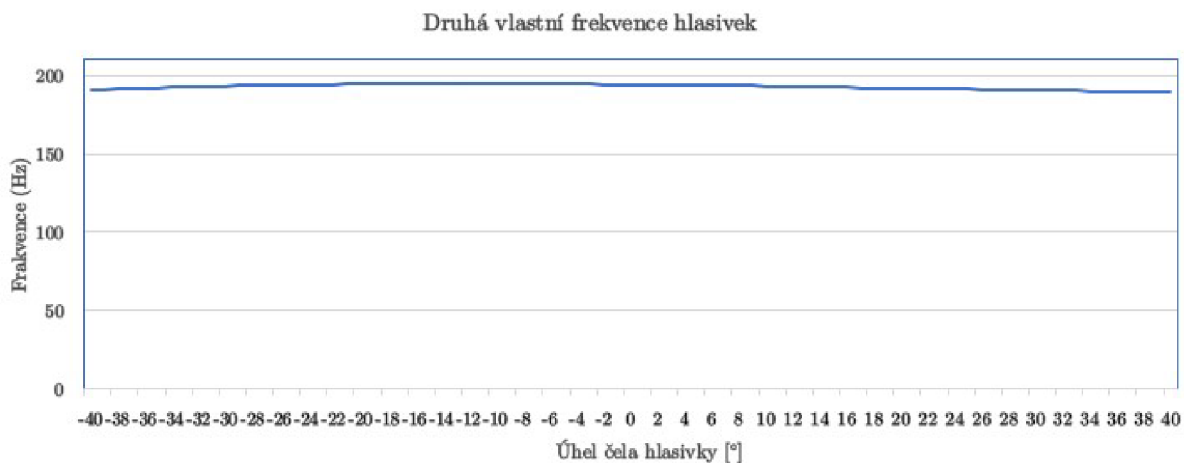
Úhel [°]	1. vlastní frekvence [Hz]	2. vlastní frekvence [Hz]	3. vlastní frekvence [Hz]
-40	147,08	190,75	227,77
-35	147,45	191,97	227,41
-30	147,69	193,13	227,21
-25	147,71	193,91	226,66
-20	147,76	194,74	226,22
-15	147,29	194,65	224,97
-10	146,90	194,68	223,90
-5	146,43	194,51	222,66
0	145,93	194,21	221,36
5	145,41	193,83	219,95
10	144,81	193,24	218,42
15	144,17	192,52	216,89
20	143,62	191,86	215,44
25	143,08	191,19	214,00
30	142,67	190,61	212,70
35	142,28	189,99	211,50
40	142,12	189,65	210,48



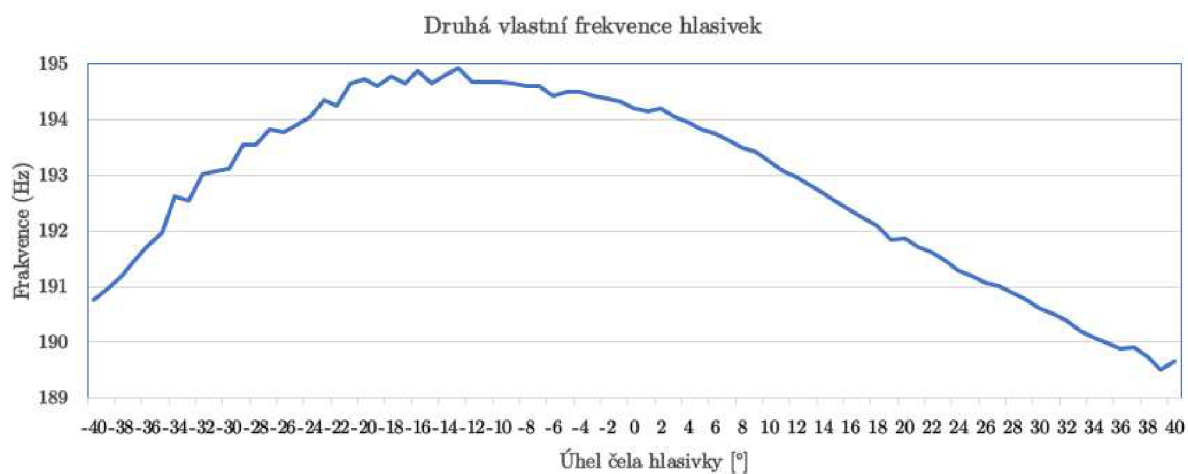
Obr. 31 Graf první vlastní frekvence hlasivek



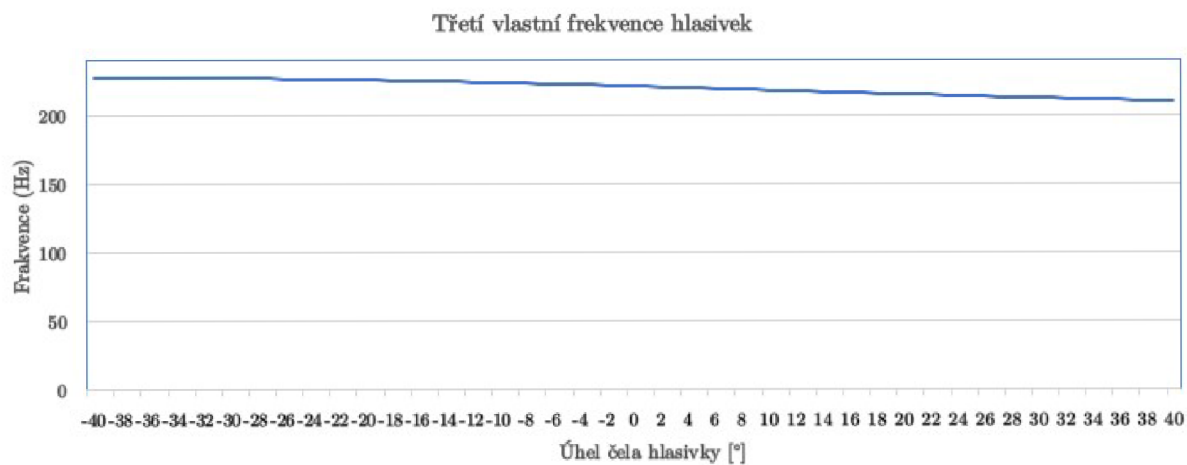
Obr. 32 Detail grafu první vlastní frekvence hlasivek



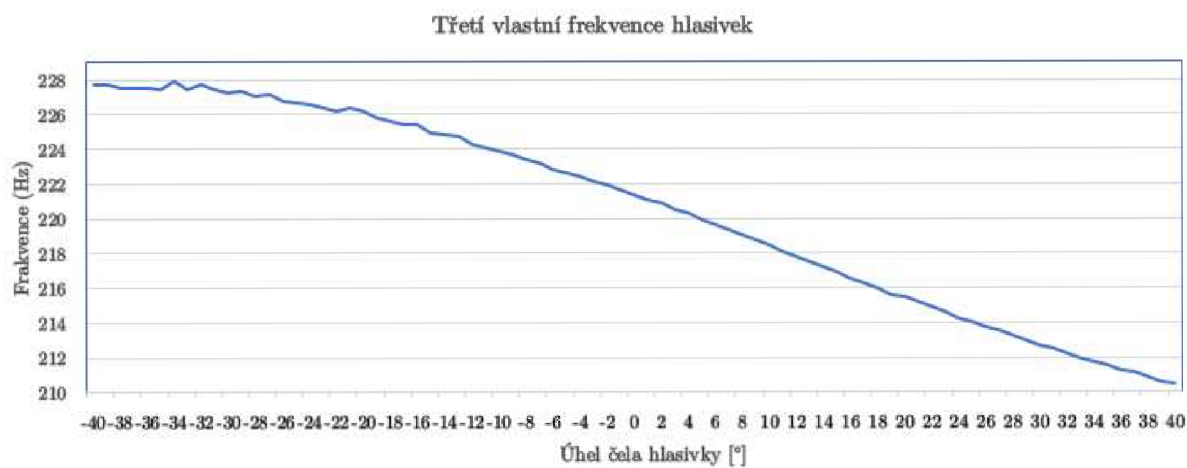
Obr. 33 Graf druhé vlastní frekvence hlasivek



Obr. 34 Detail grafu druhé vlastní frekvence hlasivek

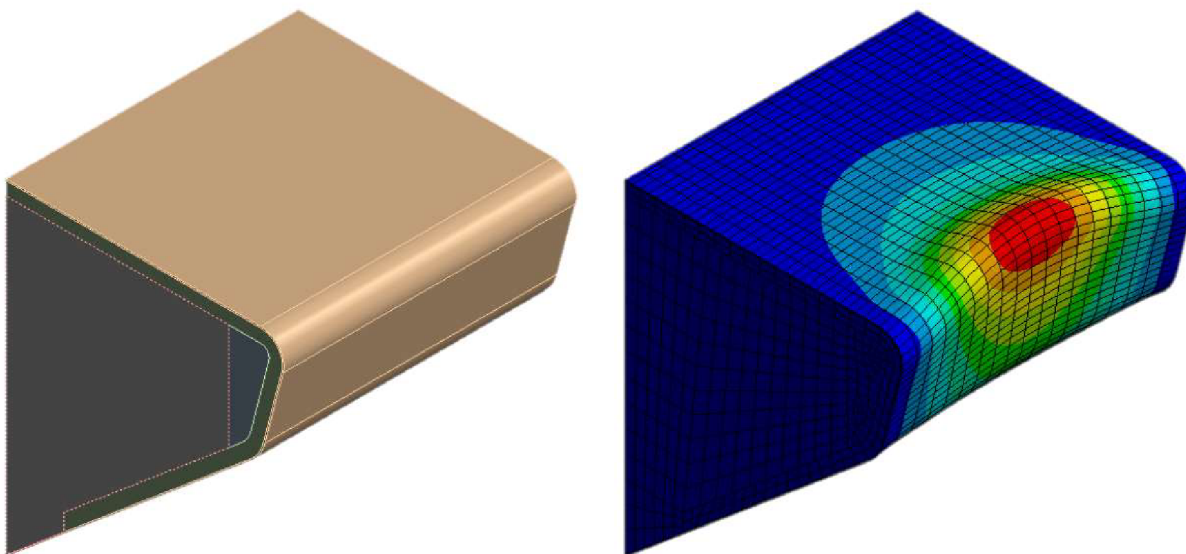


Obr. 35 Graf třetí vlastní frekvence hlasivek

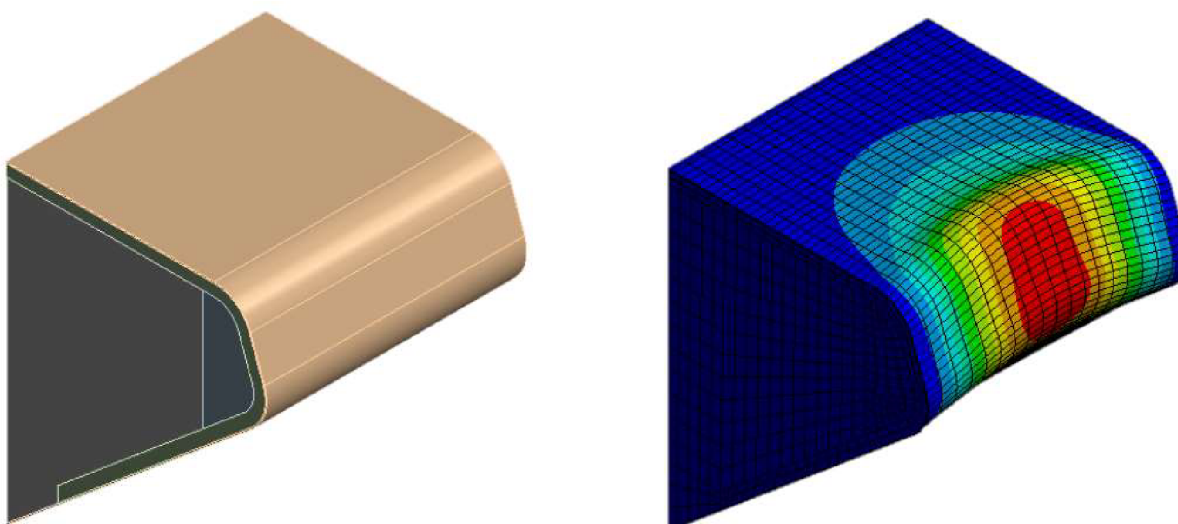


Obr. 36 Detail grafu třetí vlastní frekvence hlasivek

4.4.1 Vlastní tvar pro první vlastní frekvenci



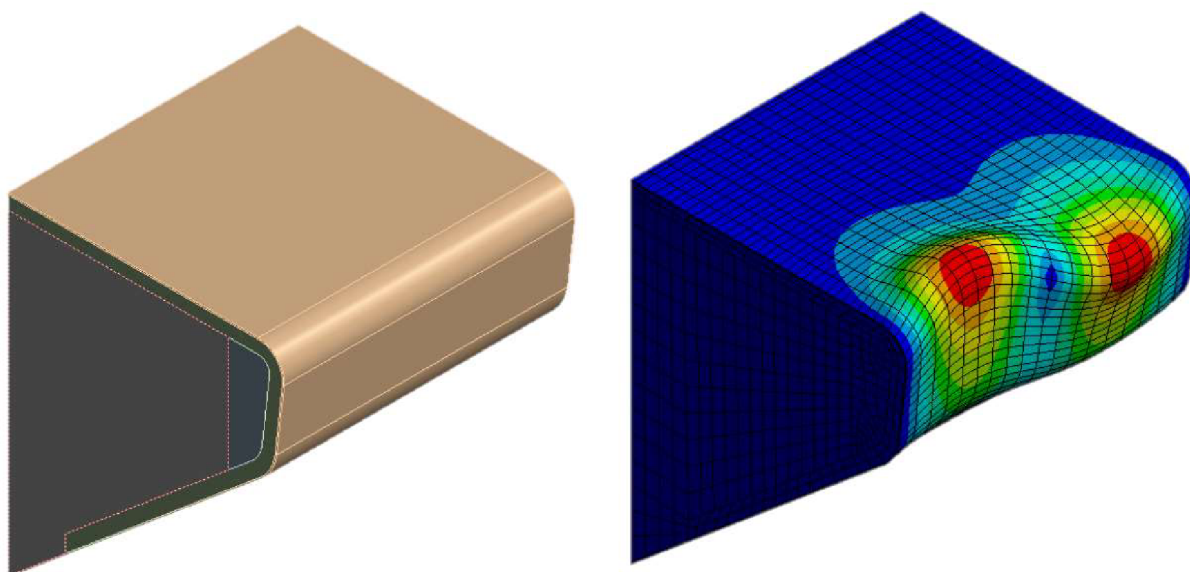
Obr. 37 vlevo původní tvar modelu; vpravo 1. vlastní tvar pro úhel -29°



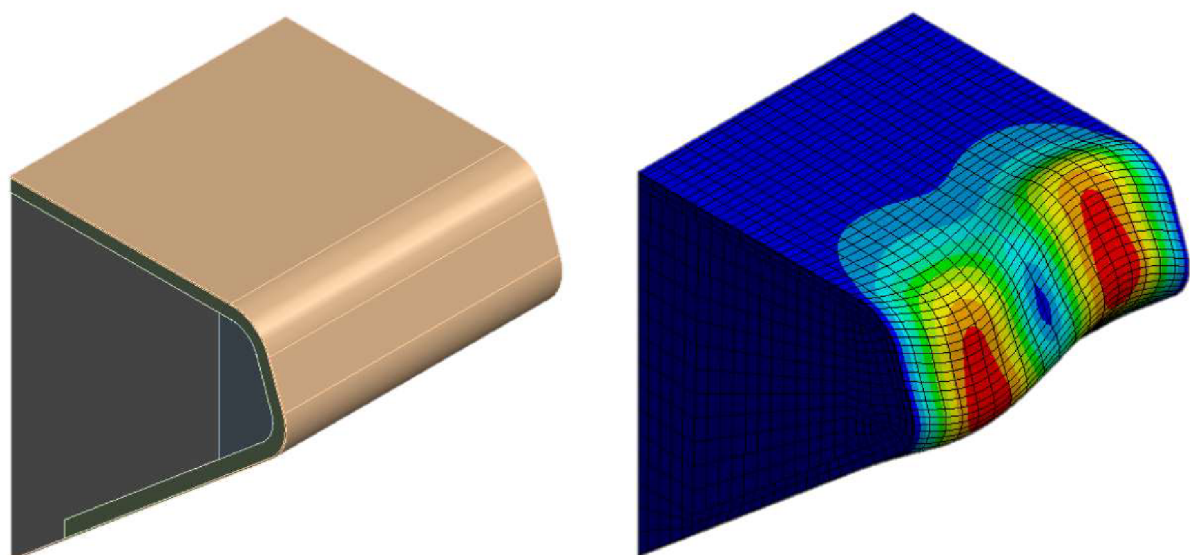
Obr. 38 vlevo původní tvar modelu; vpravo 1. vlastní tvar pro úhel 39°

Pro první vlastní frekvenci z předchozí tabulky (Tab. 4) a grafu (Obr. 31, Obr. 32), vyplývá že vlastní frekvence roste od úhlu -40° do úhlu -35° . V tomto úhlu také začíná interval, od -35° do -20° , ve kterém hodnota frekvence osciluje kolem hodnoty 147,7 Hz. Tento interval také obsahuje maximální dosažené hodnoty 147,82 Hz pro první vlastní frekvenci tohoto modelu, a to konkrétně dvakrát, při úhlu -29° (Obr. 37) a úhlu -27° . Posléze již hodnoty frekvence poměrně pravidelně klesají až do úhlu 37° , od kterého do konce intervalu frekvence opět lehce osciluje. Minimální hodnota první vlastní frekvence je dosažena při úhlu čela hlasivky 39° (Obr. 38) a její hodnota je 142,01 Hz.

4.4.2 Vlastní tvar pro druhou vlastní frekvenci



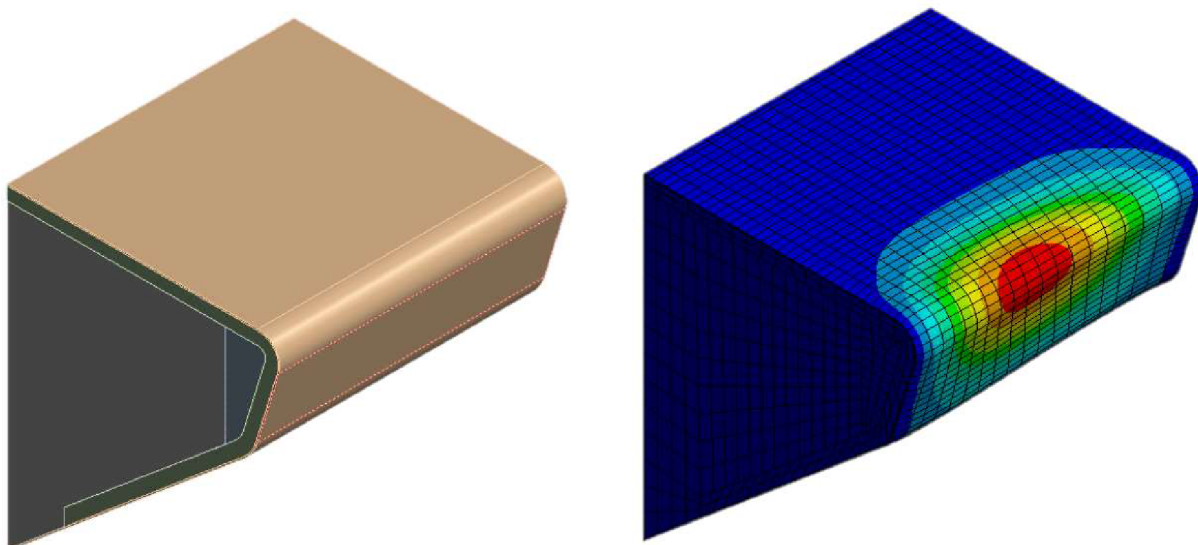
Obr. 39 vlevo původní tvar modelu; vpravo 2. vlastní tvar pro úhel -13°



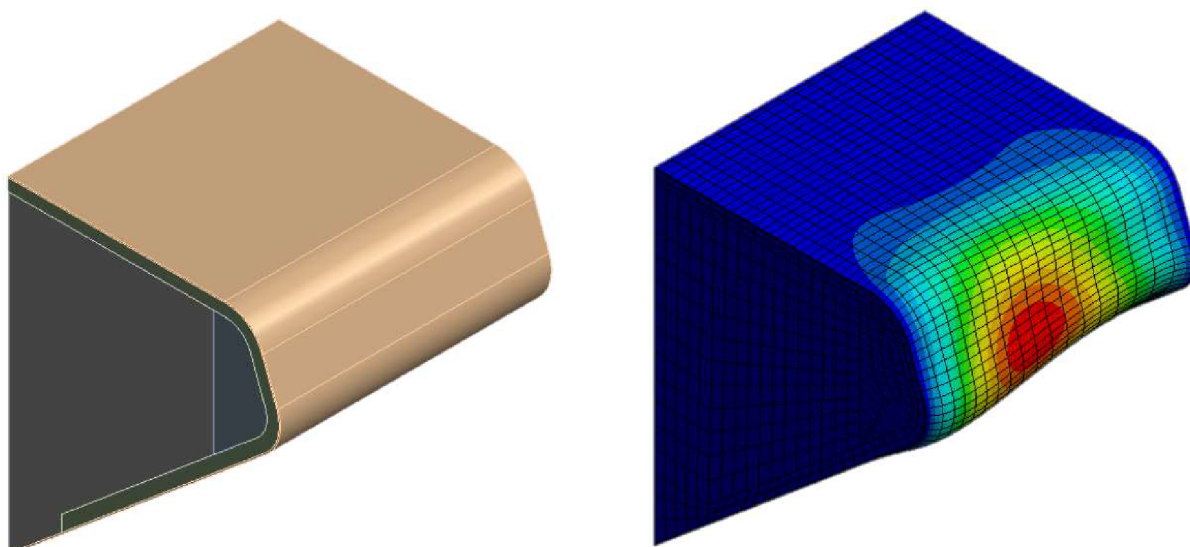
Obr. 40 vlevo původní tvar modelu; vpravo 2. vlastní tvar pro úhel 39°

Hodnoty druhé vlastní frekvence jsou vypsány v prostředním sloupci tabulky (Tab. 4) a vyobrazeny na prostředním grafu (Obr. 33, Obr. 34). Stejně jako u první vlastní frekvence je zpočátku možno pozorovat konstantní růst, i když oproti první frekvenci výrazně rychlejší, až opět do úhlu 35° . Od toho úhlu už růst není tak rapidní a hodnoty při růstu lehce kmitají. Růst pokračuje až do -13° (Obr. 39), kde se zároveň nachází i maximální hodnota druhé vlastní frekvence o velikosti 194,93 Hz. Od tohoto bodu hodnota frekvence pomalu klesá až do úhlu 2° , posléze již frekvence klesá stejnou rychlostí až ke konci, kde je opět mírná oscilace. Minimální hodnota druhé vlastní frekvence je 189,52 při úhlu 39° (Obr. 40).

4.4.3 Vlastní tvar pro třetí vlastní frekvenci



Obr. 41 vlevo původní tvar modelu; vpravo 3. vlastní tvar pro úhel -34°



Obr. 42 vlevo původní tvar modelu; vpravo 3. vlastní tvar pro úhel 40°

Třetí vlastní frekvence je zobrazena na posledním, třetím grafu (Obr. 35, Obr. 36) a její hodnoty v posledním pravém sloupci tabulky (Tab. 4). Po celém rozsahu úhlu čela frekvence hlasivky klesá s mírnými výchyly od monotónnosti. Pokles křivky frekvence je zpočátku mírný, postupně se pak zvětšuje až po úhel -12° , kde začíná konstantní rychlostí klesat až po konečný úhel. Maximální hodnota třetí vlastní frekvence je při úhlu -34° (Obr. 41) o hodnotě 227,9 Hz, naopak její minimální hodnota je v hraničním úhlu 40° (Obr. 42) s hodnotou 210,48 Hz.

4.4.4 Diskuse o výsledcích

Po celkovém zpracování modelů a získání vlastních frekvencí jednotlivých úhlů lze usoudit, že se frekvence kmitání hlasivek se změnou úhlu čela lidské hlasivky nijak rapidně nemění, naopak pohybuje se kolem jedné hodnoty s malými odchylkami, viz. (Tab. 5).

Jak je vidět na detailech grafů pro jednotlivé rezonanční módy, se maximální a minimální odchylka od průměrné hodnoty pohybuje do pěti procent. Na detailech grafů (Obr. 32, Obr. 34, Obr. 36) lze pozorovat drobné oscilace, tyto výchylky jsou způsobeny hrubší sítí, která však byla nejjemnější možná pro použitý hardware. Řešením tohoto problému by bylo zvýšení hustoty sítě, což je odůvodněno výše. Výsledky říkají, že změna úhlu čela lidské hlasivky nemá na vlastní frekvenci nikterak velký vliv a nedojde tak při žádném úhlu čela k nějak velkým odlišnostem. Vzhledem k tomu, že při oscilaci hlasivek, při jejich fonaci, kmitají hlasivky kolem některé z vlastních frekvencí, měla by výrazná změna vlastní frekvence dopad na některou fázi kmitu hlasivky, např. při otevírání nebo zavírání glottis.

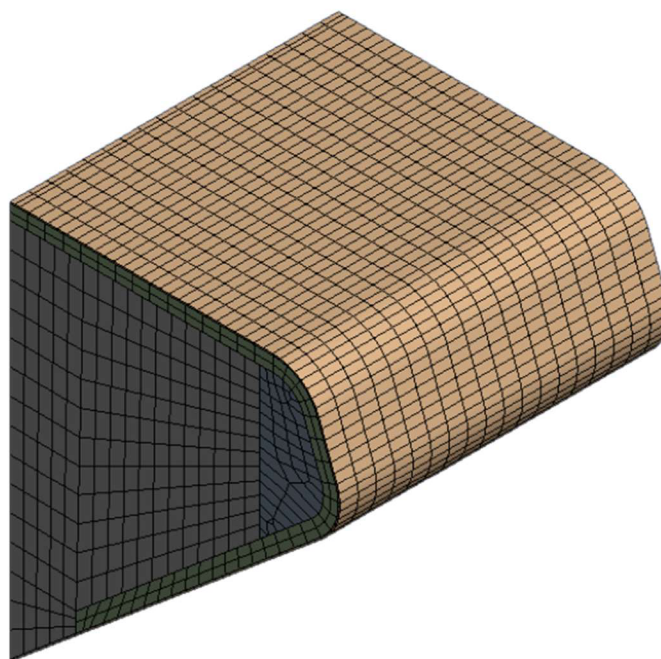
Tabulka 5 (Tab. 5) také obsahuje číselně vyjádřené odchylku minimální a maximální hodnoty frekvence od průměrné hodnoty těchto frekvencí, všechny hodnoty vyšly pod 5 % což značí malou změnu vlastní frekvence.

Tab. 5 Odchylky frekvence

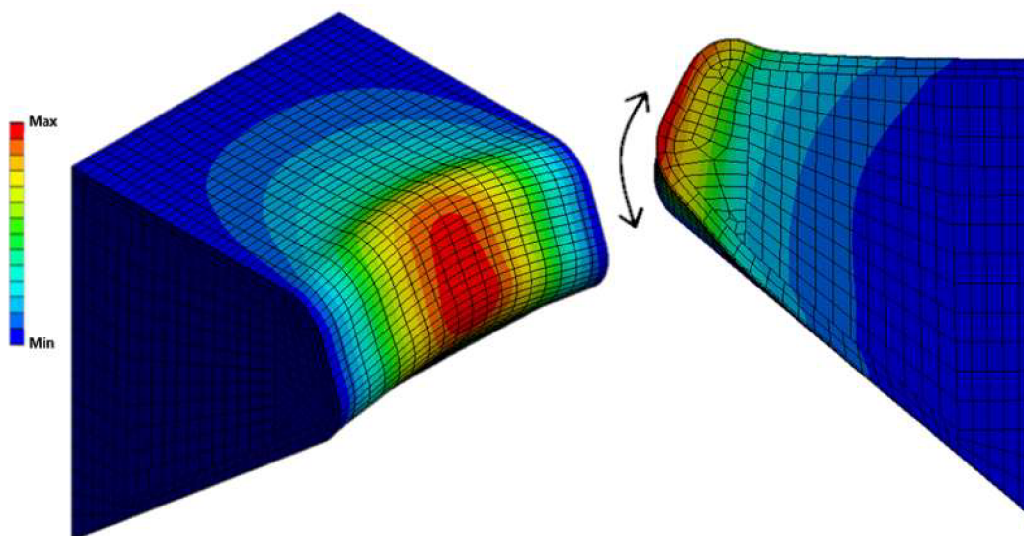
Vlastní frekvence	Max. (Hz)	Min. (Hz)	Prům. (Hz)	Dolní odchylka	Horní odchylka
První	147,82	142,01	145,49	1,601 %	2,391 %
Druhá	194,93	189,52	192,82	1,094 %	1,711 %
Třetí	227,90	210,48	220,52	3,347 %	4,553 %

4.4.5 Vybraný vlastní model hlasivky pro úhel $+40^\circ$

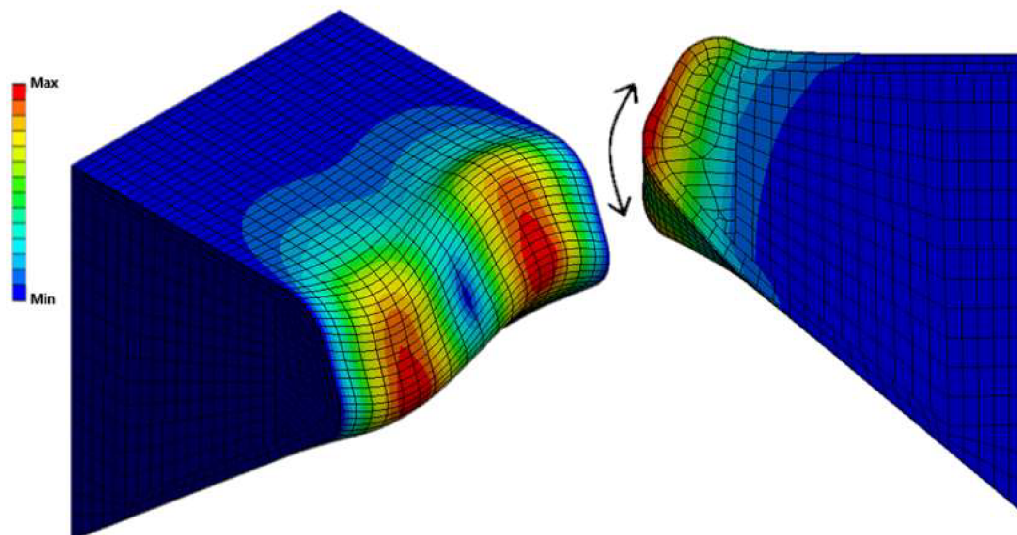
V této podkapitole jsou vyobrazeny čtyři modely vlastních tvarů hlasivek. Jedná se o model s úhlem čela $+40^\circ$, první model reprezentuje původní tvar modelu hlasivky (Obr. 43) a další tři pak modely deformované oscilací při jednotlivých vlastních frekvencích (Obr. 44, Obr. 45, Obr. 46). Při první vlastní frekvenci se maximální deformace nachází uprostřed hlasivky s dvěma uzlovými body po stranách, pohyb čela hlasivky je pak směrem nahoru a dolů znázorněný na obrázku 44 (Obr. 44). Oscilace při druhé vlastní frekvenci deformuje hlasivku podobně jak první, rozdíl je však že zde se nachází tři uzlové body, dva na kraji a jeden uprostřed hlasivky. Maximální deformace hlasivky se pak nachází mezi krajními a prostředním uzlovým bodem, pohybující se nahoru a dolů zobrazené na obrázku 45 (Obr. 45). Při třetí vlastní frekvenci se bod s maximální deformací nachází ve spodní části čela hlasivky pohybující se vodorovně mezi okraji. Na hlasivce se při této oscilaci nachází jeden uzlový bod, který je vždy uložený na vzdálenějším konci hlasivky od bodu maximální deformace, viz obrázek 46 (Obr. 46). Více modelů vykreslujících deformaci při oscilaci o vlastní frekvenci je uvedeno ve druhé příloze (Příloha 1 – Vlastní tvary hlasivek některých úhlů).



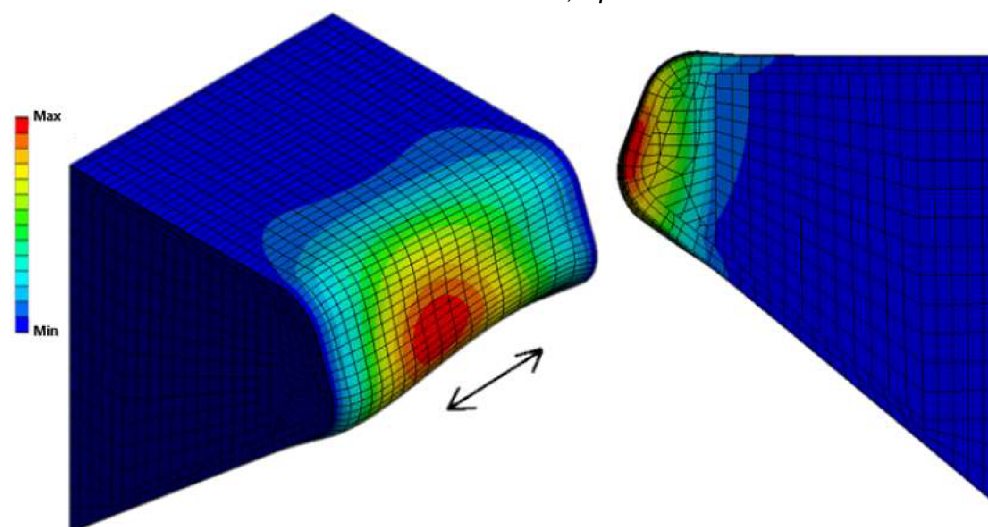
Obr. 43 Původní model hlasivky s úhlem čela $+40^\circ$



Obr. 44 vlevo model 1. vlastní frekvence úhlu $+40^\circ$; vpravo řez v místě maximální deformace



Obr. 45 vlevo model 2. vlastní frekvence úhlu $+40^\circ$; vpravo řez v místě maximální deformace



Obr. 46 vlevo model 3. vlastní frekvence úhlu $+40^\circ$; vpravo řez v místě maximální deformace

5. ZÁVĚR

Důležitým podkladem pro tuto práci bylo zjištění anatomie, obzvláště pak fyziologie hlasivek. Po tomto poznání lze pak vznik hlasu jednoduše popsat jako přerušování toku vzduchu hlasivkami v hrtanu, tlačeního z plic a hnaného dále skrz artikulační a rezonanční prvky hlasového ústrojí. Z předchozích výzkumů víme, že by se oscilační frekvence hlasivek měla pohybovat kolem jedné vlastní frekvence. Motivací k vytvoření této práce pak bylo vytvořit vlastní parametrický model a získat hodnoty vlastních frekvencí za účelem přispění k vývoji tvorby náhradních lidských hlasivek.

V první části bakalářské práce byla popsána anatomie lidského hlasového ústrojí systematicky rozdělená do čtyř částí. Zprvu se kapitola věnuje rychlému rozdělení anatomie s navazujícím krátkým popisem historického zkoumání anatomie a fyziologie hlasivek. Posléze je v kapitole popsána respirační část ústrojí následovaná popisem fonační části, která je popsána podrobněji. Zakončení kapitoly je tvořeno velmi stručným popisem artikulační části s rezonančními dutinami spojenými do jedné podkapitoly.

Druhá část se věnuje tvorbě a vzniku samotného lidského hlasu. Zprvu byly definovány důležité pojmy s následným popisem vzniku hlasu. Dále je kapitola věnována lidským hlasivkám a jejich pohybu. Ukončení tvoří podkapitola o znělé a neznělé fonaci s dodatečným vyobrazením akustických vln českých samohlásek.

Třetí část je složena z krátké rešerše modelů lidských hlasivek. Kapitola je rozdělena podle typů modelů, a to na hmotové modely, modely s vysokým počtem stupňů volnosti a geometrické modely.

Poslední kapitola této práce je rozdělena na dvě části, z nichž první je zaměřena na geometrii Schererova třívrstvého modelu M5 a samotnou tvorbu modelu pro tuto práci. V první podkapitole je model tvořen parametrickými rovnicemi. Posléze výsledky jednotlivých parametrů pro celý rozsah úhlů čela hlasivky, s tabulkovým i grafickým vyobrazením. Z těchto výsledků plyne, že parametry R_L , Q_4 a Q_5 jsou pro všechny úhly čela konstantní a nezávislé na jeho změně. Parametry Q_2 a R_ψ konstantně rostou, naopak u Q_2 v závislosti na úhlu jeho hodnota rovnoměrně klesá. Parametr B a Q_1 je pak vyjádřen grafem nelineární funkce s rostoucím potenciálem pro parametr B a klesajícím pro parametr Q_1 . Změna těchto parametrů však není nijak rapidní, jedná se o změny v rádech setin centimetrů. Maximální rozdíl je pak u parametru B s hodnotou 0,1026 cm mezi úhly -40° a $+40^\circ$.

Dále je v této podkapitole popsána tvorba modelu s popisem jeho výhod, nevýhod, ale i změn potřebných pro zjednodušení parametrizace. Tyto změny se projeví hlavně v definování laterální stěny hlasivkového vazů a také při úpravě rovnic. Úprava těchto rovnic je pak vysvětlena v práci výše.

Další podkapitola udává hodnoty použitého materiálového modelu s návazností na použití a specifikování konečnoprvkové sítě.

Poté je v této části práce krátce vysvětlena modální analýza a definovány okrajové podmínky modelu pro výpočetní software.

Druhá část této kapitoly je pak věnována výsledným hodnotám vlastní frekvence. Tato část začíná popisem postupu v práci a následným tabulkovým uvedením výsledků vlastní frekvence vybraných úhlů čela, kompletní výsledky lze pak najít v příloze 3 (**Příloha 3 – Vlastní frekvence**). Výsledky jsou pak dále rozvinuty i do grafové podoby. Další podkapitola se jednotlivě věnuje prvním třem vlastním frekvencím s popisem grafů včetně modelů pro maximum a minimum jednotlivých frekvencí. Z řešení pak vyplývá že průměrná hodnota první vlastní frekvence je 145,49 Hz, druhé 189,52 Hz a třetí 220,5 Hz.

Hlavními výsledky této práce pak byly jednotlivé hodnoty vlastních frekvencí pro každý úhel hlasivky lidského těla, které nám potvrdily předpoklad, že hlasivky kmitají kolem jednoho rezonančního módu a vlastní frekvence se v závislosti na úhlu čela hlasivky nijak zásadně nemění. Tento fakt je pak vyobrazen graficky na **Obr. 31**, **Obr. 33** a **Obr. 35** a numericky v příloze 3 (**Příloha 3 – Vlastní frekvence**). Fakt, že se frekvence nijak zásadně nemění, určuje, že hlasivka bude dobře kmitat při frekvenci pro řeč s jakýmkoliv úhlem čela hlasivky. Lidské hlasivky tedy nemají žádný úhel čela při kterém, by oproti ostatním chtěly kmitat hůře.

SEZNAM LITERATURY A ZDROJŮ

- [1] DRÁBKOVÁ, Jarmila. *Teoretické podklady anatomie, fyziologie a patofyziologie: pomocný učební text*. B.m.: Brno: IDVPZ, 2001.
- [2] HRADECKÁ, Zuzana. Fyziologie lidského hlasového ústrojí [online]. 2007, 1–105. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/77787/prif_m/
- [3] ŠVEC, Jan G. Studium mechanicko-akustických vlastností zdroje lidského hlasu. 1996, **1996**.
- [4] ŠVEC, Jan G. UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI P ř í ro do v ě de ck á fakulta Základní a aplikovaný výzkum tvorby lidského hlasu Habilita č ní práce v oboru Biofyzika RNDr . Jan G . Švec , Ph . D . et Ph . D . 2019, (February).
- [5] BIOFYZIKY, Katedra a Bakalářská PRÁCE. *UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA*. nedatováno.
- [6] *Conducting Zone | Boundless Anatomy and Physiology* [online]. [vid. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://courses.lumenlearning.com/boundless-ap/chapter/conducting-zone/>
- [7] *Respiratory Zone | Boundless Anatomy and Physiology* [online]. [vid. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://courses.lumenlearning.com/boundless-ap/chapter/respiratory-zone/>
- [8] DYLEVSKÝ, Ivan a Trojan STANISTAL. *SOMATOLOGIE*. Praha: Avicenum Praha, 1990.
- [9] *The Lungs and Pleurae | Boundless Anatomy and Physiology* [online]. [vid. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://courses.lumenlearning.com/boundless-ap/chapter/the-lungs-and-pleurae/>
- [10] KLÍMA, Jaromír. Computational Modelling of Function of Human Vocal Folds. 2009, 83.
- [11] LEKEŠ, Filip. *Modální analýza modelů hlasivek se soustřeňými parametry*. B.m., 2018. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [12] KUBÍČEK, Radek. Dynamic Characteristics Obtained From Solution of Simple Vocal Folds Models [online]. 2016, 81. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?action=detail&zp_id=92416&fid=&rok=&typ=&jazyk=&text=radek+kubiček&hl_klic_slova=0&hl_abstrakt=0&hl_nazev=0&hl_autor=1&str=1
- [13] *Svaly laryngu – WikiSkripta* [online]. [vid. 2021-02-18]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Svaly_laryngu
- [14] MATUG, Michal. Náhradní hlasivky pro generování zdrojového hlasu. 2015, 147.
- [15] TITZE, Ingo R. *Principles of voice production*. B.m.: Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall, 1994.
- [16] *Stavba a funkce hlasového ústrojí « E-learningová podpora mezioborové integrace výuky tématu vědomí na UP Olomouc* [online]. [vid. 2021-02-20]. Dostupné z: <http://pfyziolmysl.upol.cz/?p=2661>
- [17] *Artikulační ústrojí – Wikisofia* [online]. [vid. 2021-02-20]. Dostupné z: https://wikisofia.cz/wiki/Artikulační_ústrojí
- [18] *What Is Voice? What Is Speech? What Is Language? | NIDCD* [online]. [vid. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.nidcd.nih.gov/health/what-is-voice-speech->

language#vsl_01

- [19] *Phonation - an overview | ScienceDirect Topics* [online]. [vid. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/phonation>
- [20] *Základy otorinolaryngologie a foniatrie pro studenty speciální pedagogiky | Lékařská fakulta Masarykovy univerzity* [online]. [vid. 2021-02-25]. Dostupné z: https://is.muni.cz/elportal/estud/pdf/js09/orl/web/pages/7_1_anatomie_fyziologie_a_vyvoj_hlasu.html
- [21] VAN DEN BERG, J. Myoelastic-aerodynamic theory of voice production. *Journal of speech and hearing research* [online]. 1958, **1**(3), 227–244 [vid. 2021-05-11]. ISSN 00224685. Dostupné z: doi:10.1044/jshr.0103.227
- [22] ŠÍBL, Michal. Using Finite Element Method for Modelling of Movement and Stress of Vocal Folds During Setting to Phonation Position [online]. 2014, 130. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86614
- [23] ŠVEC, Jan G., Harm K. SCHUTTE, C. Julian CHEN a Ingo R. TITZE. *Integrative Insights into the Myoelastic-Aerodynamic Theory and Acoustics of Phonation. Scientific Tribute to Donald G. Miller* [online]. B.m.: Mosby Inc. 2021. ISSN 18734588. Dostupné z: doi:10.1016/j.jvoice.2021.01.023
- [24] MATUG, Michal. Analysis of Czech Vowels to Be Generated Aloud and in a Whisper [online]. 2008, 67. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6629
- [25] MIŠUN, Vojtěch. *Vibrace a hluk*. B.m.: skripta VUT Brno, 2005.
- [26] GORDON, Matthew a Peter LADEFOGED. *Phonation types: a cross-linguistic overview* [online]. nedatováno [vid. 2021-03-04]. Dostupné z: <http://gordon.faculty.linguistics.ucsb.edu/phonation.pdf>
- [27] ECKERT, Hartwig a John LAVER. *Menschen und ihre Stimmen*. B.m.: Beltz, Psychologie-Verl.-Union, 1994.
- [28] *Types of phonation* [online]. [vid. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://www.ims.uni-stuttgart.de/institut/arbeitsgruppen/ehemalig/ep-dogil/EGG/page10.htm#nil>
- [29] *Phonation* [online]. [vid. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://home.cc.umanitoba.ca/~krussll/138/sec5/phonatio.htm>
- [30] VAMPOLA, T, J HORÁČEK a I KLEPÁČEK. *MODELLING OF THE VIBRATION PROPERTIES OF THE HUMAN VOCAL FOLD* [online]. nedatováno [vid. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://www.engmech.cz/improc/2007/151-Vampola-PT.pdf>
- [31] CVETICANIN, L. Review on Mathematical and Mechanical Models of the Vocal Cord [online]. 2012, **2012**. Dostupné z: doi:10.1155/2012/928591
- [32] STORY, Brad H a Ingo R TITZE. Principles of Voice Production. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 1993, **94**, 1148 [vid. 2021-03-11]. Dostupné z: doi:10.1121/1.408053
- [33] ZHENG, X., R. MITTAL, Q. XUE a S. BIELAMOWICZ. *Direct-numerical simulation of the glottal jet and vocal-fold dynamics in a three-dimensional laryngeal model* [online]. B.m.: The Journal of the Acoustical Society of America [online], 2011. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.3592216

- [34] SCHERER, Ronald C., Daoud SHINWARI, Kenneth J. DE WITT, Chao ZHANG, Bogdan R. KUCINSCHI a Abdollah A. AFJEH. Intraglottal pressure profiles for a symmetric and oblique glottis with a divergence angle of 10 degrees. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 2001, **109**(4), 1616–1630. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.1333420
- [35] LINK, G., M. KALTENBACHER, M. BREUER a M. DÖLLINGER. A 2D finite-element scheme for fluid-solid-acoustic interactions and its application to human phonation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 2009, **198**(41–44), 3321–3334. ISSN 00457825. Dostupné z: doi:10.1016/j.cma.2009.06.009
- [36] TITZE, I. R. Comments on the myoelastic-aerodynamic theory of phonation. *Journal of Speech and Hearing Research* [online]. 1980, **23**(3), 495–510 [vid. 2021-02-26]. ISSN 00224685. Dostupné z: doi:10.1044/jshr.2303.495
- [37] MARTÍNEK, Tomáš. Finite element modelling of pathological changes in human vocal folds tissue and their influence on videokymograph. 2013, 124.
- [38] PAVLICA, Ondřej. Computational Modelling of Interaction between Oscillating Vocal Folds and Air Flow. 2011, 108.
- [39] *ANSYS Meshing | SVS FEM s.r.o.* [online]. [vid. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/produkty/geometrie-a-sit/ansys-meshing>
- [40] KŠICA, Filip. *Modelování dynamických vlastností a chování technických soustav*. B.m., 2016. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [41] *swift - Create Voice Frequency Graph when user record audio? - Stack Overflow* [online]. [vid. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://stackoverflow.com/questions/37010257/create-voice-frequency-graph-when-user-record-audio>
- [42] *Human respiratory system - Muscle and lung receptors | Britannica* [online]. [vid. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/human-respiratory-system/Muscle-and-lung-receptors>
- [43] *MLUVNÍ ORGÁNY | Nový encyklopedický slovník češtiny* [online]. [vid. 2021-03-02]. Dostupné z: https://www.czechency.org/slovník/MLUVNÍ_ORGÁNY
- [44] J.L., Flanagan. *Source-system interaction in the vocal tract*. B.m.: nnals of the New York Academy of Sciences, 1968.

Seznam zkratek a symbolů

Zkratka	Význam
MKP	Metoda konečných prvků
MEADT	Myoelasto-aerodynamická teorie

Symbol	Rozměr	Význam
R_0	[cm]	Parametr hlasivky
T	[cm]	Kontrolní parametr hlasivky
Ψ	[cm]	Úhel čela hlasivky
R_Ψ	[cm]	Parametr hlasivky
R_L	[cm]	Parametr hlasivky
B	[cm]	Parametr hlasivky
Q_1	[cm]	Parametr hlasivky
Q_2	[cm]	Parametr hlasivky
Q_3	[cm]	Parametr hlasivky
Q_4	[cm]	Parametr hlasivky
Q_5	[cm]	Parametr hlasivky
E_{epi}	[Pa]	Modul pružnosti epitelu
E_{lam}	[Pa]	Modul pružnosti lamina propria
E_{vaz}	[Pa]	Modul pružnosti vazů
E_{sval}	[Pa]	Modul pružnosti svalů
μ_{epi}	[-]	Poissonův poměr epitelu
μ_{lam}	[-]	Poissonův poměr lamina propria
μ_{vaz}	[-]	Poissonův poměr vazů
μ_{sval}	[-]	Poissonův poměr svalů
ρ	[kg*m ⁻³]	Hustota

Seznam obrázků

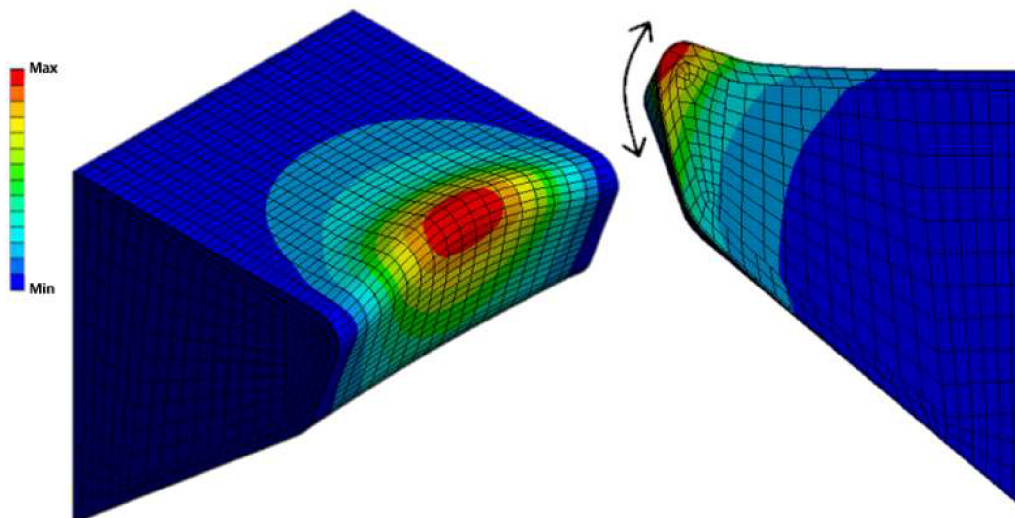
Obr. 1 Anatomie lidského respiračního ústrojí [41].....	17
Obr. 2 Pozorování hlasivek pomocí videolaryngoskopie [4].....	18
Obr. 3 Mechanika dýchání [42].....	20
Obr. 4 Kostra hrtanu [9].....	21
Obr. 5 Ventrální pohled na hrtan [9].....	22
Obr. 6 Vnitřní svalstvo a chrupavky (kaudální pohled) [10, 11].....	22
Obr. 7 Řez hlasivkami [11].....	24
Obr. 8 Ústní dutina s artikulačními prvky [43].....	25
Obr. 9 Pohyby hlasivek [22].....	28
Obr. 10 Pohyb hlasivek při modálním hlasu [29].....	29
Obr. 11 Akustické vlny českých samohlásek [3].....	30
Obr. 12 Ewaldova píšťala [3].....	31
Obr. 13 Jednohmotový model [44].....	32
Obr. 14 Dvouhmotový model [3].....	32
Obr. 15 Tříhmotový model [3].....	33
Obr. 16 Model slizniční vlny [3].....	33
Obr. 17 Proudění tuhým modelem s hlasivkami v konvergentní poloze [22].....	34
Obr. 18 Ukázka geometrie kanálu [22].....	34
Obr. 19 Výpočetní MKP model lidské hlasivky [30].....	35
Obr. 20 Zhengův třívrstvý model [33].....	36
Obr. 21 Třívrstvý Schererův model [35].....	37
Obr. 22 Lineárně tvořený model [34].....	38
Obr. 23 Graf parametru Q_1	40
Obr. 24 Graf parametru B	40
Obr. 25 Graf parametru $R\psi$	40
Obr. 26 Graf parametru Q_2	41
Obr. 27 Graf parametru Q_3	41
Obr. 28 Model M5 s úhlem čela hlasivky +40°.....	42
Obr. 29 Síť hlasivky.....	43
Obr. 30 Vetknutí hlasivky.....	45
Obr. 31 Graf první vlastní frekvence hlasivek.....	47
Obr. 32 Detail grafu první vlastní frekvence hlasivek.....	47
Obr. 33 Graf druhé vlastní frekvence hlasivek.....	48
Obr. 34 Detail grafu druhé vlastní frekvence hlasivek.....	48
Obr. 35 Graf třetí vlastní frekvence hlasivek.....	49
Obr. 36 Detail grafu třetí vlastní frekvence hlasivek.....	49
Obr. 37 vlevo původní tvar modelu; vpravo 1. vlastní tvar pro úhel -29°.....	50
Obr. 38 vlevo původní tvar modelu; vpravo 1. vlastní tvar pro úhel 39°.....	50
Obr. 39 vlevo původní tvar modelu; vpravo 2. vlastní tvar pro úhel -13°.....	51
Obr. 40 vlevo původní tvar modelu; vpravo 2. vlastní tvar pro úhel 39°.....	51
Obr. 41 vlevo původní tvar modelu; vpravo 3. vlastní tvar pro úhel -34°.....	52

Obr. 42 vlevo původní tvar modelu; vpravo 3. vlastní tvar pro úhel 40°	52
Obr. 43 Původní model hlasivky s úhlem čela $+40^\circ$	54
Obr. 44 vlevo model 1. vlastní frekvence úhlu $+40^\circ$; vpravo řez v místě maximální deformace	55
Obr. 45 vlevo model 2. vlastní frekvence úhlu $+40^\circ$; vpravo řez v místě maximální deformace	55
Obr. 46 vlevo model 3. vlastní frekvence úhlu $+40^\circ$; vpravo řez v místě maximální deformace	55

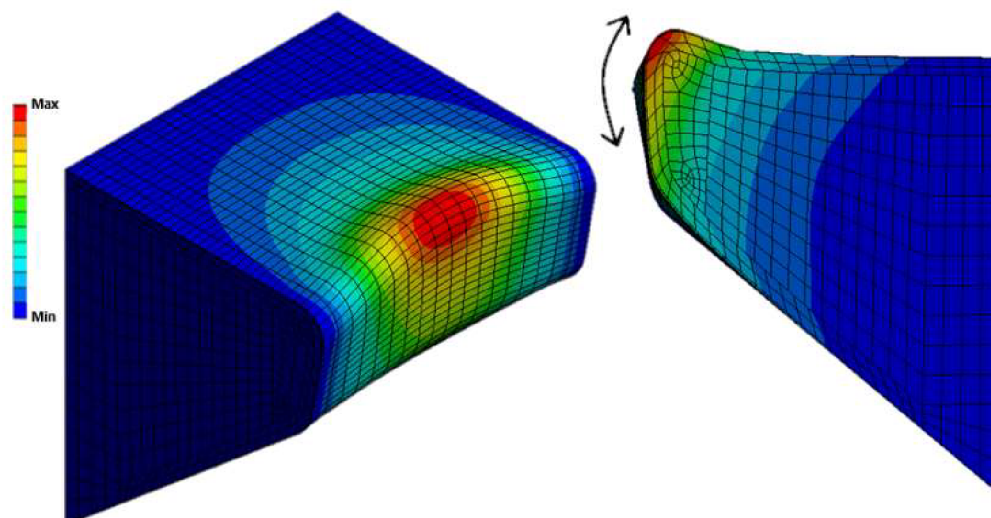
Seznam tabulek

Tab. 1 Parametry vybraných úhlů	39
Tab. 2 Materiálové hodnoty pro jednotlivé vrstvy hlasivky	43
Tab. 3 Vlastní frekvence vybraných úhlů čela hlasivky	46
Tab. 4 Odchyłky frekvence	44
Tab. 5 Odchyłky frekvence	53

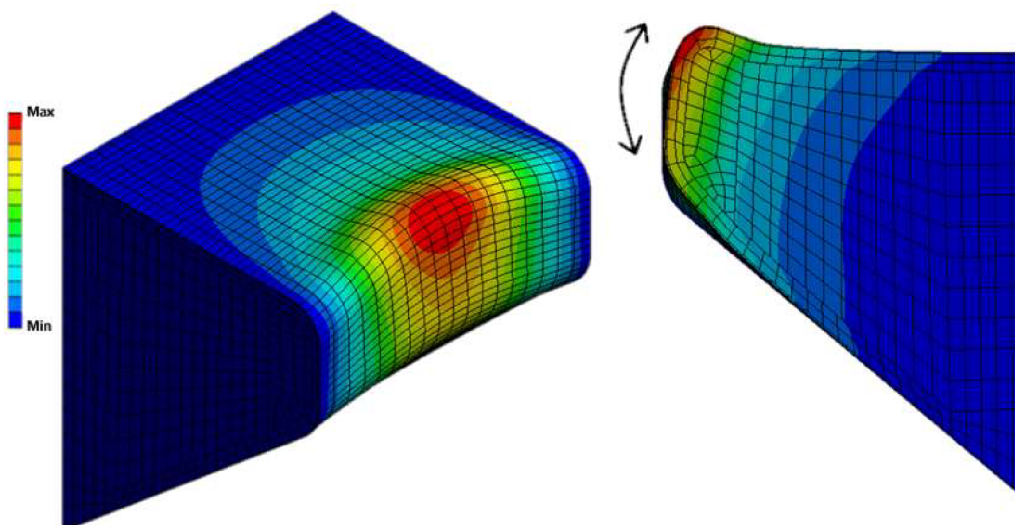
Příloha 1 – Vlastní tvary hlasivek některých úhlů



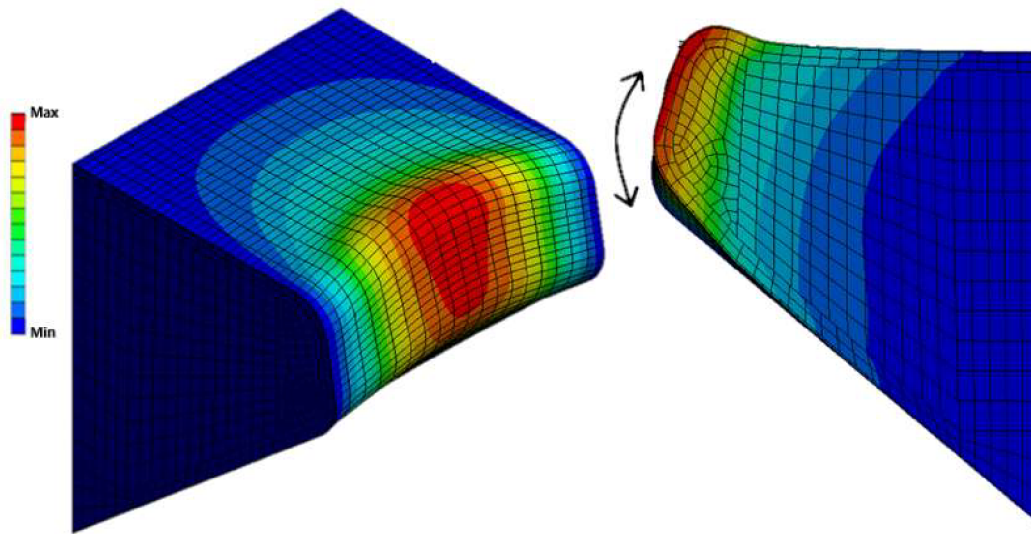
vlevo model 1. vlastní frekvence úhlu -40° ; vpravo řez v místě maximální deformace



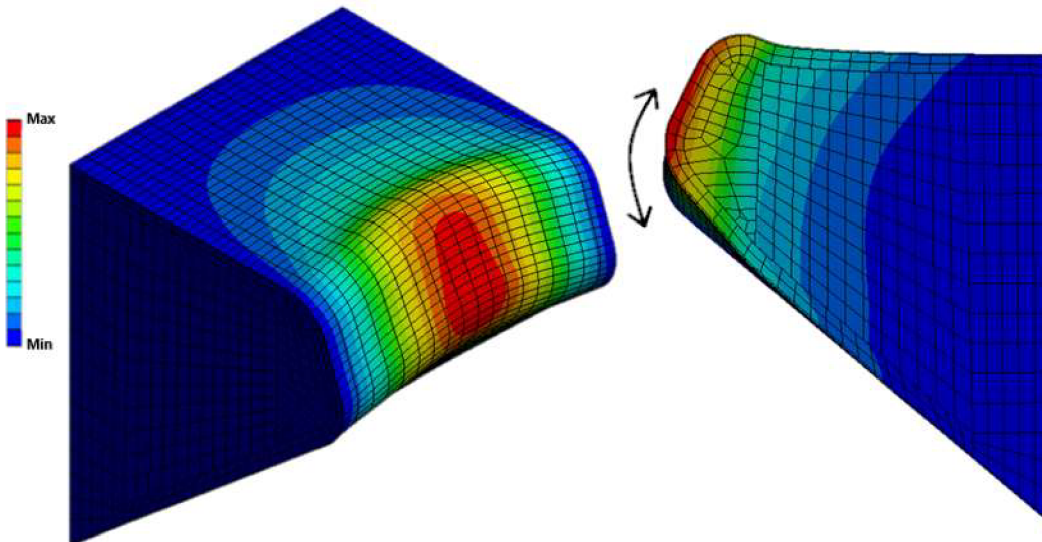
vlevo model 1. vlastní frekvence úhlu -20° ; vpravo řez v místě maximální deformace



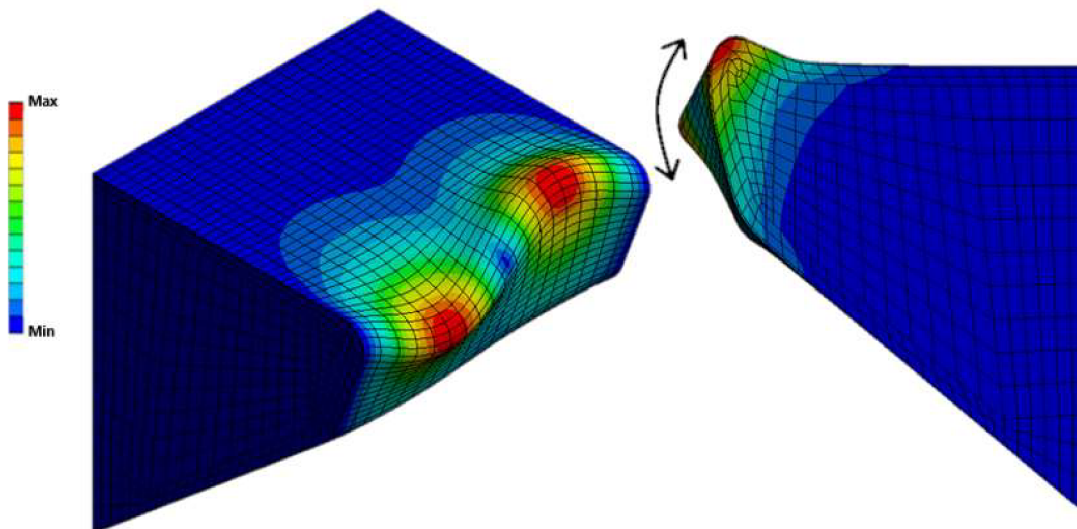
vlevo model 1. vlastní frekvence úhlu 0° ; vpravo řez v místě maximální deformace



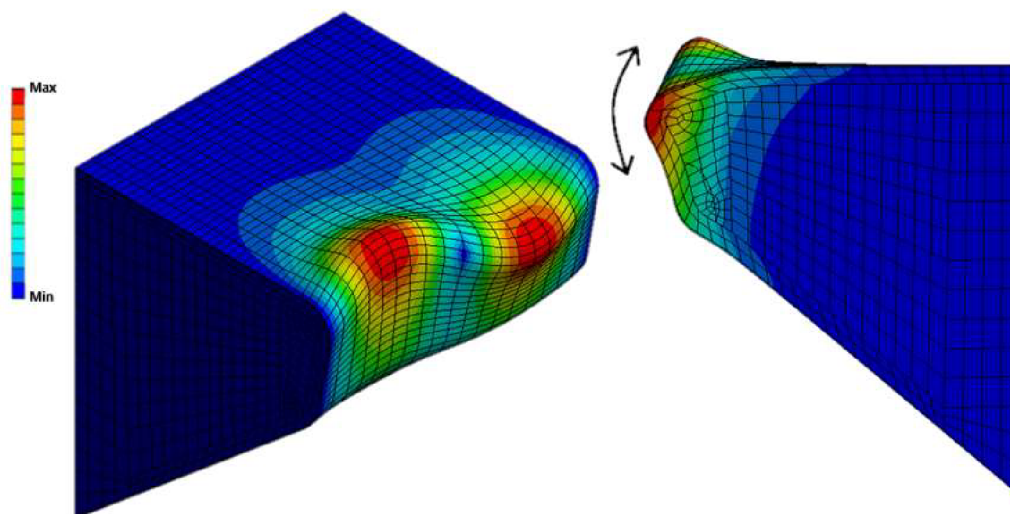
vlevo model 1. vlastní frekvence úhlu +20°; vpravo řez v místě maximální deformace



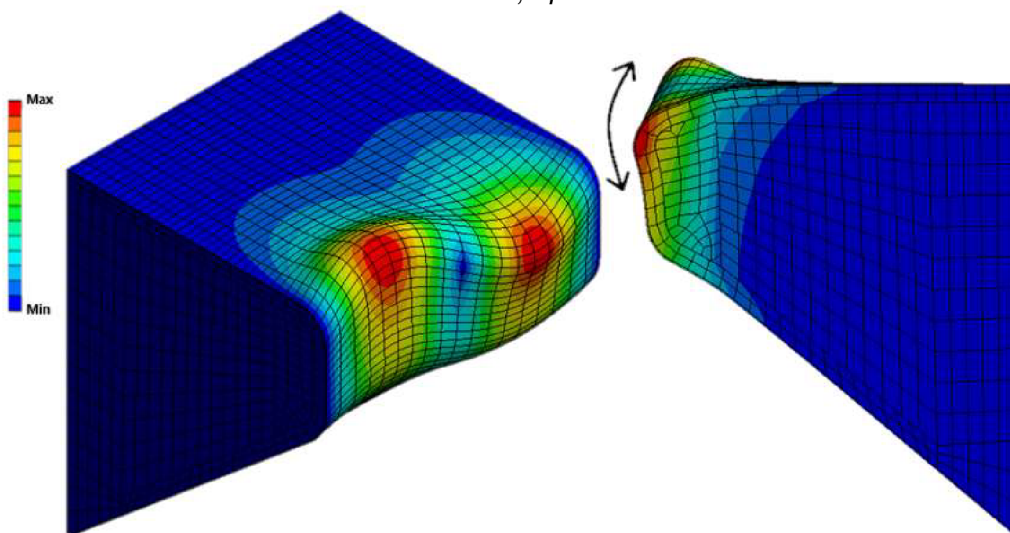
vlevo model 1. vlastní frekvence úhlu +40°; vpravo řez v místě maximální deformace



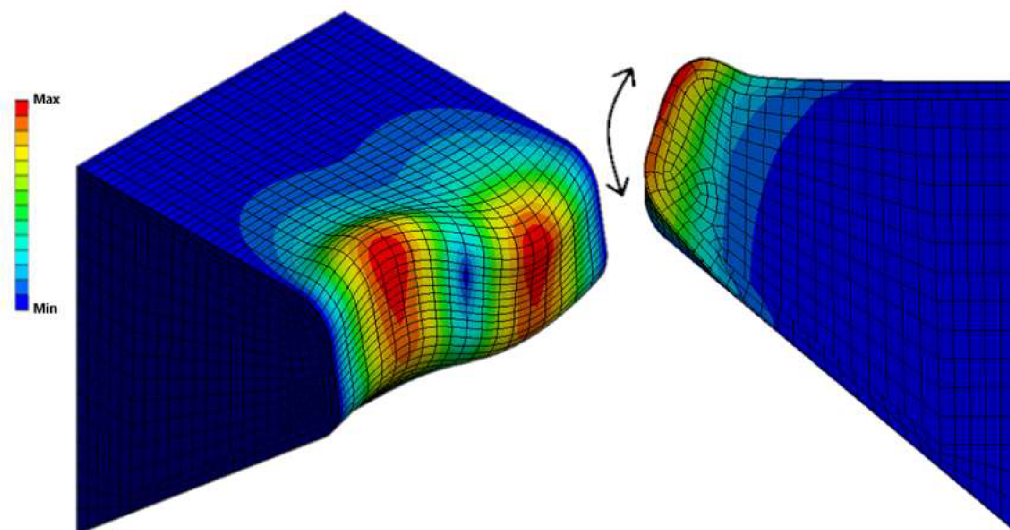
vlevo model 2. vlastní frekvence úhlu -40°; vpravo řez v místě maximální deformace



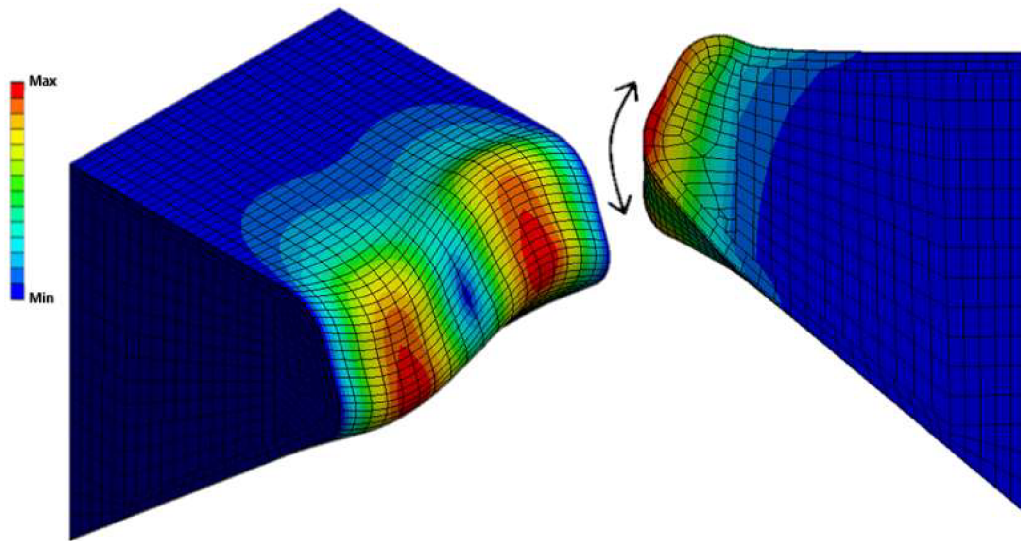
vlevo model 2. vlastní frekvence úhlu -20° ; vpravo řez v místě maximální deformace



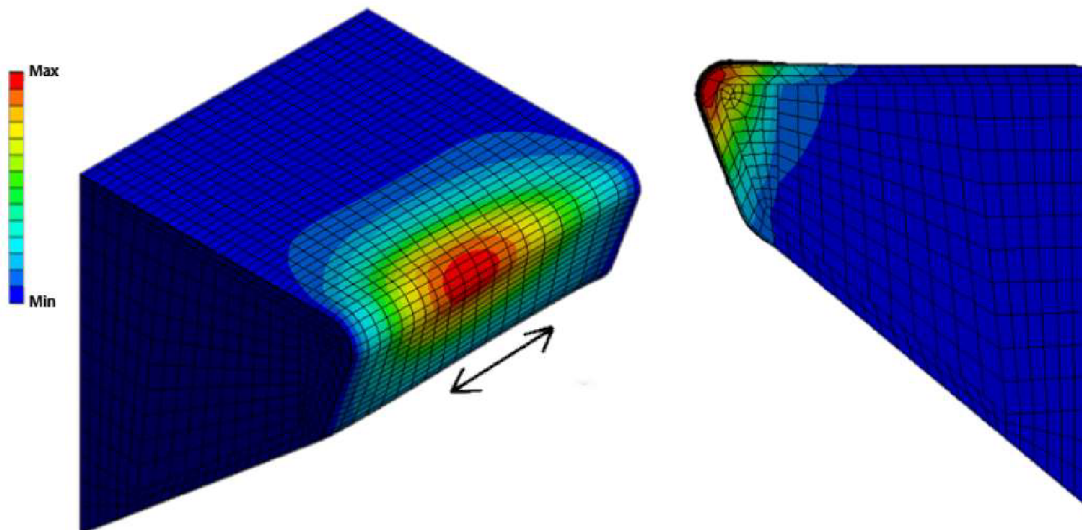
vlevo model 2. vlastní frekvence úhlu 0° ; vpravo řez v místě maximální deformace



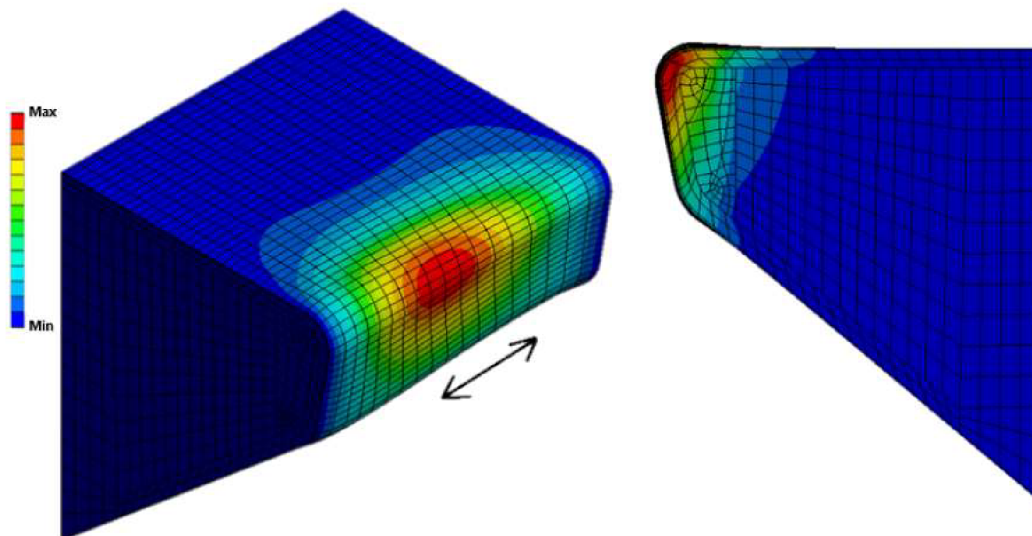
vlevo model 2. vlastní frekvence úhlu $+20^\circ$; vpravo řez v místě maximální deformace



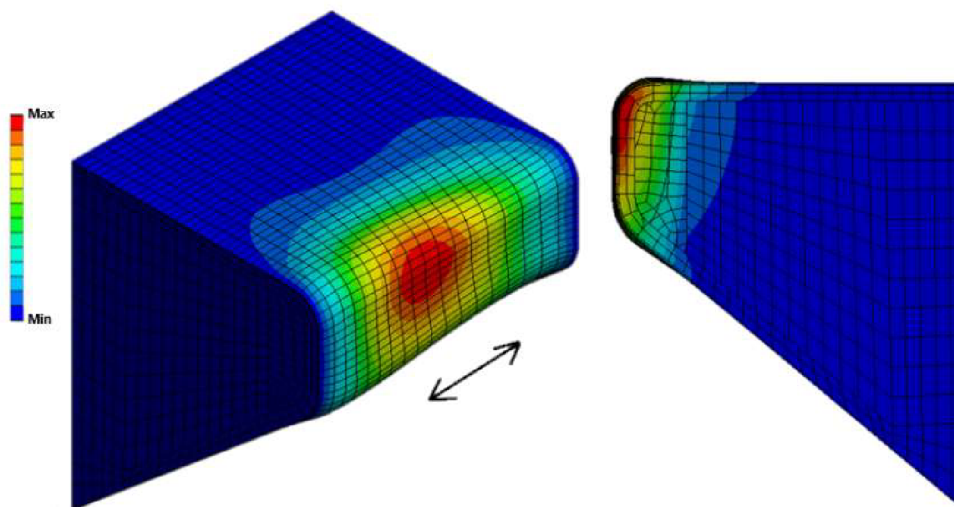
vlevo model 2. vlastní frekvence úhlu $+40^\circ$; vpravo řez v místě maximální deformace



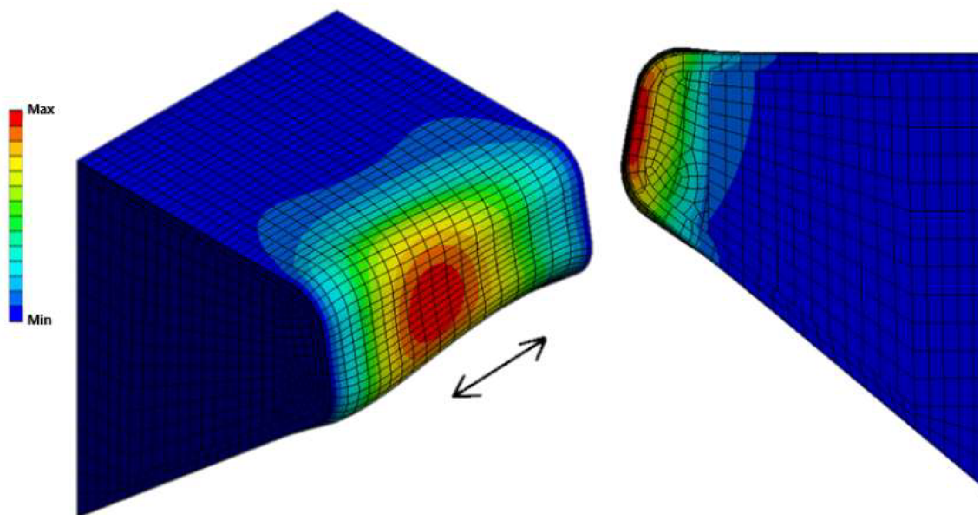
vlevo model 3. vlastní frekvence úhlu -40° ; vpravo řez v místě maximální deformace



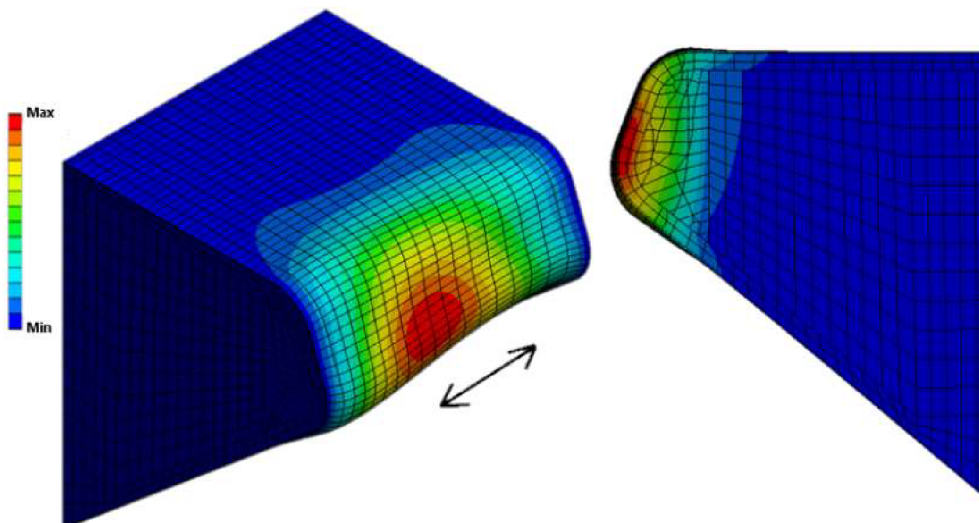
vlevo model 3. vlastní frekvence úhlu -20° ; vpravo řez v místě maximální deformace



vlevo model 3. vlastní frekvence úhlu 0° ; vpravo řez v místě maximální deformace



vlevo model 3. vlastní frekvence úhlu $+20^\circ$; vpravo řez v místě maximální deformace



vlevo model 3. vlastní frekvence úhlu -40° ; vpravo řez v místě maximální deformace

Příloha 2 – Hodnoty parametrů hlasivky

Ψ [°]	R_0 [cm]	$R\psi$ [cm]	RL [cm]	B [cm]	$Q1$ [cm]	$Q2$ [cm]	$Q3$ [cm]	$Q4$ [cm]	$Q5$ [cm]	T [cm]
-40	0,0987	0,0735	0,15	0,1282	0,2688	-0,0513	0,2526	0,0987	0,1149	0,3
-39		0,0740		0,1282	0,2667	-0,0501	0,2514			
-38		0,0745		0,1282	0,2645	-0,0488	0,2501			
-37		0,0749		0,1282	0,2625	-0,0476	0,2489			
-36		0,0754		0,1283	0,2604	-0,0464	0,2477			
-35		0,0759		0,1283	0,2584	-0,0451	0,2464			
-34		0,0764		0,1284	0,2564	-0,0439	0,2452			
-33		0,0769		0,1285	0,2544	-0,0426	0,2439			
-32		0,0774		0,1286	0,2524	-0,0413	0,2426			
-31		0,0779		0,1287	0,2505	-0,0401	0,2414			
-30		0,0784		0,1288	0,2486	-0,0388	0,2401			
-29		0,0789		0,1289	0,2467	-0,0376	0,2389			
-28		0,0795		0,1291	0,2449	-0,0363	0,2376			
-27		0,0800		0,1293	0,2430	-0,0350	0,2363			
-26		0,0806		0,1294	0,2412	-0,0337	0,2350			
-25		0,0811		0,1296	0,2394	-0,0325	0,2338			
-24		0,0817		0,1298	0,2377	-0,0312	0,2325			
-23		0,0823		0,1301	0,2359	-0,0299	0,2312			
-22		0,0829		0,1303	0,2342	-0,0286	0,2299			
-21		0,0835		0,1306	0,2325	-0,0273	0,2286			
-20	0,0841	0,1308	0,2309	-0,0260	0,2273					
-19	0,0847	0,1311	0,2292	-0,0248	0,2261					
-18	0,0853	0,1314	0,2276	-0,0235	0,2248					
-17	0,0860	0,1317	0,2260	-0,0222	0,2235					

-16		0,0866		0,1321	0,2244	-0,0209	0,2222			
-15		0,0873		0,1324	0,2228	-0,0196	0,2209			
-14		0,0880		0,1328	0,2212	-0,0183	0,2196			
-13		0,0887		0,1332	0,2197	-0,0170	0,2183			
-12		0,0894		0,1335	0,2182	-0,0157	0,2170			
-11		0,0901		0,1340	0,2167	-0,0144	0,2157			
-10		0,0908		0,1344	0,2152	-0,0131	0,2144			
-9		0,0915		0,1348	0,2137	-0,0118	0,2131			
-8		0,0923		0,1353	0,2123	-0,0105	0,2118			
-7		0,0930		0,1358	0,2109	-0,0092	0,2105			
-6		0,0938		0,1363	0,2094	-0,0079	0,2092			
-5	0,0987	0,0946	0,15	0,1368	0,2080	-0,0065	0,2078	0,0987	0,1149	0,3
-4		0,0954		0,1373	0,2067	-0,0052	0,2065			
-3		0,0962		0,1378	0,2053	-0,0039	0,2052			
-2		0,0970		0,1384	0,2039	-0,0026	0,2039			
-1		0,0978		0,1390	0,2026	-0,0013	0,2026			
0		0,0987		0,1396	0,2013	0,0000	0,2013			
1		0,0996		0,1402	0,2000	0,0013	0,2000			
2		0,1005		0,1408	0,1987	0,0026	0,1987			
3		0,1014		0,1415	0,1974	0,0039	0,1974			
4		0,1023		0,1422	0,1962	0,0052	0,1961			
5		0,1032		0,1429	0,1949	0,0065	0,1948			
6		0,1042		0,1436	0,1937	0,0079	0,1934			
7		0,1051		0,1443	0,1925	0,0092	0,1921			
8		0,1061		0,1451	0,1913	0,0105	0,1908			

33	0,1379	0,1720	0,1655	0,0426	0,1587
32	0,1363	0,1706	0,1664	0,0413	0,1600
31	0,1347	0,1692	0,1673	0,0401	0,1612
30	0,1332	0,1679	0,1682	0,0388	0,1625
29	0,1317	0,1665	0,1691	0,0376	0,1637
28	0,1302	0,1652	0,1701	0,0363	0,1650
27	0,1288	0,1640	0,1710	0,0350	0,1663
26	0,1273	0,1627	0,1720	0,0337	0,1676
25	0,1260	0,1615	0,1729	0,0325	0,1688
24	0,1246	0,1603	0,1739	0,0312	0,1701
23	0,1233	0,1592	0,1749	0,0299	0,1714
22	0,1220	0,1581	0,1759	0,0286	0,1727
21	0,1207	0,1570	0,1769	0,0273	0,1740
20	0,1194	0,1559	0,1780	0,0260	0,1753
19	0,1182	0,1549	0,1790	0,0248	0,1765
18	0,1170	0,1539	0,1801	0,0235	0,1778
17	0,1158	0,1529	0,1811	0,0222	0,1791
16	0,1147	0,1519	0,1822	0,0209	0,1804
15	0,1135	0,1510	0,1833	0,0196	0,1817
14	0,1124	0,1501	0,1844	0,0183	0,1830
13	0,1113	0,1492	0,1855	0,0170	0,1843
12	0,1102	0,1483	0,1866	0,0157	0,1856
11	0,1092	0,1475	0,1878	0,0144	0,1869
10	0,1081	0,1467	0,1889	0,0131	0,1882
9	0,1071	0,1459	0,1901	0,0118	0,1895

34	0,0987	0,1395	0,15	0,1735	0,1646	0,0439	0,1574	0,0987	0,1149	0,3
35		0,1411		0,1750	0,1638	0,0451	0,1562			
36		0,1428		0,1766	0,1629	0,0464	0,1549			
37		0,1446		0,1781	0,1621	0,0476	0,1537			
38		0,1463		0,1798	0,1612	0,0488	0,1525			
39		0,1482		0,1814	0,1604	0,0501	0,1512			
40		0,1500		0,1831	0,1596	0,0513	0,1500			

Příloha 3 – Vlastní frekvence

Úhel [°]	1. vlastní frekvence [Hz]	2. vlastní frekvence [Hz]	3. vlastní frekvence [Hz]
-40	147,08	190,75	227,77
-39	147,14	190,97	227,69
-38	147,22	191,2	227,53
-37	147,3	191,47	227,52
-36	147,40	191,75	227,49
-35	147,45	191,97	227,41
-34	147,71	192,61	227,90
-33	147,60	192,55	227,48
-32	147,78	193,03	227,72
-31	147,75	193,08	227,43
-30	147,69	193,13	227,21
-29	147,82	193,54	227,38
-28	147,77	193,56	227,06
-27	147,82	193,83	227,13
-26	147,71	193,78	226,80
-25	147,71	193,91	226,66
-24	147,69	194,04	226,55
-23	147,79	194,35	226,41
-22	147,66	194,26	226,21
-21	147,79	194,65	226,39
-20	147,76	194,74	226,22
-19	147,60	194,59	225,82
-18	147,62	194,79	225,63
-17	147,47	194,66	225,41
-16	147,48	194,87	225,37

-15	147,29	194,65	224,97
-14	147,29	194,8	224,81
-13	147,28	194,93	224,71
-12	147,07	194,67	224,28
-11	146,99	194,67	224,06
-10	146,90	194,68	223,90
-9	146,81	194,66	223,65
-8	146,70	194,61	223,39
-7	146,62	194,59	223,16
-6	146,46	194,43	222,78
-5	146,43	194,51	222,66
-4	146,35	194,49	222,43
-3	146,29	194,43	222,17
-2	146,16	194,37	221,90
-1	146,07	194,32	221,64
0	145,93	194,21	221,36
1	145,84	194,16	221,08
2	145,79	194,20	220,9
3	145,64	194,04	220,54
4	145,55	193,96	220,26
5	145,41	193,83	219,95
6	145,30	193,74	219,65
7	145,19	193,62	219,34
8	145,06	193,49	219,04
9	144,98	193,42	218,79
10	144,81	193,24	218,42

11	144,67	193,07	218,10
12	144,56	192,96	217,81
13	144,43	192,81	217,50
14	144,30	192,67	217,19
15	144,17	192,52	216,89
16	144,05	192,37	216,58
17	143,93	192,23	216,29
18	143,81	192,09	215,98
19	143,62	191,84	215,57
20	143,62	191,86	215,44
21	143,49	191,71	215,15
22	143,41	191,61	214,86
23	143,3	191,46	214,57
24	143,16	191,28	214,25
25	143,08	191,19	214,00
26	142,99	191,07	213,74
27	142,96	191,02	213,50
28	142,87	190,88	213,23
29	142,79	190,76	212,97
30	142,67	190,61	212,70
31	142,61	190,51	212,47
32	142,53	190,39	212,24
33	142,4	190,2	211,94
34	142,34	190,09	211,71
35	142,28	189,99	211,50
36	142,21	189,89	211,27
37	142,24	189,90	211,14

38	142,13	189,74	210,83
39	142,01	189,52	210,51
40	142,12	189,65	210,48