

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. Martin Vašek

**NÁHRADNÍ HLASIVKY PRO GENEROVÁNÍ ZDROJOVÉHO
HLASU
ARTIFFICIAL VOCAL FOLDS FOR SOURCE VOICE
GENERATION**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Inženýrská mechanika
Školitel: doc. Ing. Vojtěch Mišun, CSc.

KLÍČOVÁ SLOVA

lidský hlas, zdrojový hlas, jednosměrný ventil, plátkový element, interakce, hlasová protéza

KEY WORDS

human voice, source voice, one-way valve, reed-based valve, interaction, voice prosthesis

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

Technická 2896/2

616 69 Brno

© Martin Vašek, 2013

Obsah

1 ÚVOD.....	4
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	5
3 ZDRAVÝ LIDSKÝ HLAS	5
3.1 Zdravý zdrojový hlas	7
4 NÁHRADNÍ ZDROJOVÝ HLAS	9
4.1 Používané náhrady hlasu.....	9
4.2 Výběr plátkového elementu	10
4.3 Experimentální model plátkového elementu.....	10
4.4 Výpočtový model plátkového elementu	13
5 ANALÝZA A DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	17
6 ÚVAHY NAD BUDOUCÍ KONSTRUKCÍ HLASOVÉ NÁHRADY	27
7 ZÁVĚR.....	27
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	28
SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ A VYTVOŘENÝCH INŽENÝRSKÝCH DĚL.....	30
ŽIVOTOPIS AUTORA.....	30
ABSTRAKT	31

1 ÚVOD

Řeč je jedním z hlavních prostředků komunikace, které člověk využívá. Při její ztrátě se mění jeho postavení ve společnosti. Ztráta tohoto komunikačního prostředku může být způsobena jak ztrátou expresivní složky řeči, tak i receptivní složky řeči [9].

Je třeba správně rozlišovat mezi pojmem řeč a hlas. Řeč je zde chápána jako soubor více projevů a chování člověka. Řečí se člověk dorozumívá (předává informace) s ostatními lidmi a do jisté míry je schopen předávat povely i jiným živočišným druhům.

Expresivní složka zahrnuje projevy a chování směřující k předání informací ostatním posluchačům. Jedním z důležitých projevů expresivní složky řeči je právě hlas.

Zásadní význam má Teorie zdroj-filtr [5,8] popisující vznik samohlásky jako filtrování zdrojového hlasu vokálním traktem (filtrem).

Ke ztrátě expresivní složky řeči – hlasu může dojít z různých příčin. Člověk ztrácí buď mentální schopnosti k vytvoření obsahu řeči, ztratí schopnost ovládat hlasové orgány, nebo tyto orgány nejsou funkční, případně jsou při operaci odstraněny. Důvodů operace vedoucí k odstranění hlasivek (totální laryngektomie – odstranění hrtanu) je více. První zdokumentovanou laryngektomii provedl Billoth v roce 1873 [3]. Tento chirurgický zákrok nezmění pouze podmínky pro tvoření hlasu, ale i jiné fyziologické pochody v oblasti krku, hlavy a plic.

Po každé operaci vedoucí ke ztrátě hlasu se lékaři snaží provádět hlasovou rehabilitaci. Existují různé principy a používají se různé pomůcky.

Teorie popisující vznik samotného zdrojového hlasu při fonaci nahlas se v čase dosti podstatně měnily. Mezi dnes nejčastěji používané patří teorie myoalasto-aerodynamická [26] a historicky novější teorie bublin tlakového vzduchu [13,14,15,17,18].

K výběru plátkového elementu, jako vhodného kandidáta na technické řešení umělých hlasivek, došlo také na základě experimentálních měření prováděných na jednoduchých experimentálních modelech plátkového elementu [14,27]. Hlavním měřením prováděným na experimentálním modelu je měření akustického tlaku generovaného plátkovým elementem. Hlavní požadavek je na tvar amplitudo-frekvenčního spektra a vyplývá z teorie zdroj-filtr. V amplitudo-frekvenčním spektru umělého zdrojového hlasu musí být obsaženy vyšší harmonické složky.

Zároveň byl pro tento typ plátkového elementu vytvořen výpočtový model. Výpočtový model zahrnuje interakci mezi médii a plátkem. S ohledem na princip tvoření hlasu podle teorie bublin tlakového vzduchu je nutné, aby tato interakce byla obousměrná.

Zmíněny jsou také problémy, které je třeba dále řešit, pokud by plátkový element měl být v budoucnu využíván jako umělá hlasivka.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Jak bylo uvedeno v úvodu, je problematika neschopnosti dorozumívat se řečí značně rozsáhlá. Příčiny ztráty řeči je možné zařadit do velkého množství lékařských oborů. Hlavní ze složek expresivní části řeči je lidský hlas. Hlas realizuje zvukovou stránku řeči a jeho prostřednictvím je umožněno předání mluvené řeči posluchačům. Hlas, jako akustický projev řeči, je dále členěn na menší části. Za nejmenší součást hlasu jsou považovány hlásky (samohlásky, souhlásky). Akustická podstata tvorby hlásek je popsána Teorií zdroj-filtr.

V této práci je hlavní důraz kladen na zdrojový hlas („zdroj“ při tvorbě znělých hlásek). Pro tvorbu náhradního zdrojového hlasu je dostupných několik technik hlasové rehabilitace. Některé rehabilitační techniky využívají zvláštní technické pomůcky.

Cílem této práce je prověřit fungování a chování jedné z v budoucnu možných hlasových náhrad – plátkového elementu. Výběr plátkového elementu a jeho důvody zde budou také popsány.

Některé dílčí problémy budou řešeny na nově navrženém a vyrobeném experimentálním modelu plátkového elementu. Pro výpočtové modelování funkce bude sestaven výpočtový model a na něm sledovány další charakteristiky zejména s přihlédnutím k teorii fonace založené na bublinách tlakového vzduchu. Budou vyšetřeny vlivy jednotlivých vstupních parametrů na chování plátkového elementu a generovaný signál (zdrojový hlas).

Budou popsána úskalí konstrukce skutečné hlasové náhrady, pokud by měla být použita pro tvorbu zdrojového hlasu *in vivo*.

3 ZDRAVÝ LIDSKÝ HLAS

Studiu a hledání nových principů, jak generovat umělý zdrojový hlas, by mělo předcházet seznámení s tím, jak je tvořen zdravý lidský hlas. Lidský hlas jako akustický signál nesoucí informace může, a pro potřeby analýzy dokonce musí, být rozdělen na menší části. Postupným dělením se dostáváme z akustického hlediska k nejmenší části a tou je hláska.

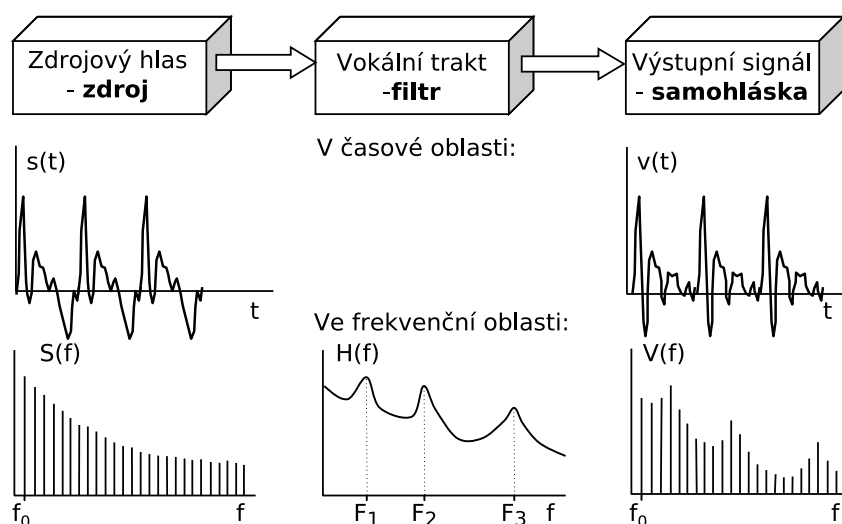
Akustickou podstatu tvorby hlásek je možné chápat jako filtrování vznikajících akustických signálů – Teorie zdroj-filtr [5, 8]. Podle toho jaká hláska se tvoří, mění se charakter akustického signálu a místo jeho vzniku. Při tvorbě neznělých hlásek (neznělé souhlásky a samohlásky vyslovené šeptem) má signál podobu šumu. U znělých hlásek se jedná o periodický signál. Filtr je tvořen akustickými kavitami vokálního traktu (dutina hrdelní, dutina ústní, nosní dutiny). Při artikulaci je tvar vokálního traktu záměrně nastavován do tvaru odpovídajícímu požadované hlásce. Změnou tvaru vokálního traktu se mění modální vlastnosti vzduchových kavit. V případě samohlásek jsou vlastní frekvence vzduchových kavit charakteristické pro každou ze samohlásek a nazývají se formanty. Největší vliv na polohu formantů v amplitudo-frekvenčním spektru má poloha jazyka (včetně polohy kořene jazyka

v dutině hrdelní). Hodnoty prvních tří formantů u českých samohlásek vyslovených nahlas (zněle) jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 1: Rozsah hodnot formantů samohlásek [20,21]

Samo- hláska	$F_1[\text{Hz}]$	$F_2[\text{Hz}]$	$F_2[\text{Hz}]$
a	700-1100	1100-1500	2500-3000
e	480-700	1560-2100	2500-3000
i	300-500	2000-2800	2600-3500
o	500-700	850-1200	2500-3000
u	300-500	600-1000	2400-2900

Toto pojetí tvorby samohlásek umožňuje od sebe oddělit Zdroj a Filtr. Schéma na následujícím obrázku ilustruje situaci při tvorbě samohlásek. Je patrné, že při tomto přístupu jsou považovány vlastnosti zdrojového hlasu za nezávislé na nastavení vokálního traktu. Tento předpoklad je velmi často použitý (i zde). Existují i studie ukazující vliv vokálního traktu na funkci hlasivek [23].



Obr. 1: Schéma teorie zdroj-filtr (pro znělou samohlásku)

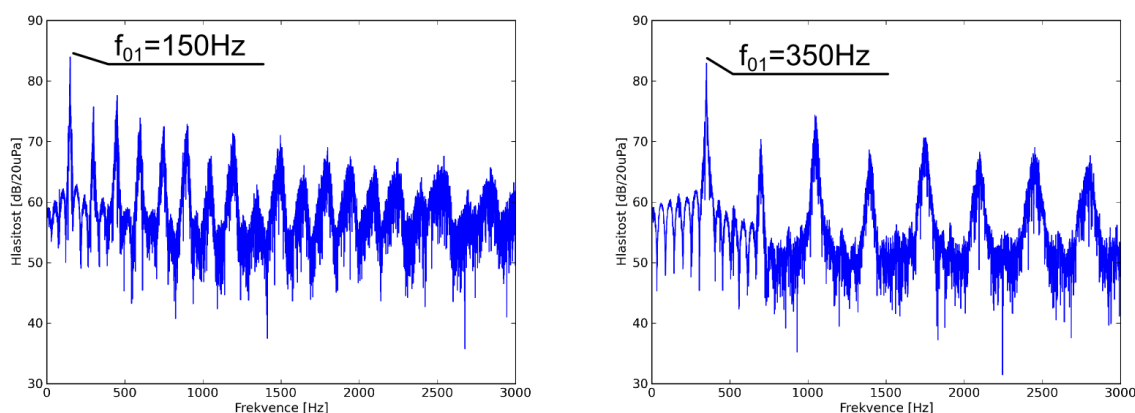
Artikulační schopnosti pacientů po totální laryngektomii jsou sice omezené, ale většinou je pacient stále schopen do jisté míry manipulovat vokálním traktem. Zdroj hlasu – hlasivky jsou odstraněny většinou i s okolními chrupavkami a vazy. Při pohledu na tuto situaci z pohledu Teorie zdroj-filtr je pacient stále schopen ovládat filtr (vokální trakt), ale nemá zdroj hlasu (hlasivky). Úsilí je soustředěno na hledání vhodného náhradního zdrojového hlasu. Nejprve je vhodné začít analýzou toho, jak je tvořen zdravý zdrojový hlas.

3.1 ZDRAVÝ ZDROJOVÝ HLAS

Popis tvorby zdrojového hlasu (fonace) lze provést různě. Nejprve využijeme kvalitativního popisu funkce, budou následovat dvě teorie fonace, které se tuto problematiku snaží popsat.

Zdrojem energie potřebné pro generování zdrojového hlasu jsou plíce. Vzduchu z plic stojí v cestě hlasivky ve fonačním nastavení (tzn. uzavřené a napnuté). Dochází k postupnému poměrně rychlému otevření mezihlasivkové mezery (glotis). Hlasivky jsou maximálně rozevřeny → ve tkáních hlasivek je akumulována maximální energie napjatosti. Mezerou glotis proudí vzduch z plic do supraglotického prostoru. Dochází k poklesu subglotického tlaku. Hlasivky se začínají uzavírat. Hlasivky jsou uzavřeny a celý cyklus se může opakovat. Frekvence tohoto opakování odpovídá základní frekvenci zdrojového hlasu f_{01} . Základní frekvence zdrojového hlasu je $f_{01} = 80$ až 500 Hz. Změnu základní frekvence zdrojového hlasu vnímá posluchač jako změnu výšky hlasu.

V důsledku těchto periodických pohybů hlasivek se původně konstantní tlak vzduchu v plicích mění na tlakové pulsy, které se šíří do supraglotické oblasti. Vzniká zdrojový hlas. Důležitou vlastností zdrojového hlasu je jeho spektrální složení. V amplitudo-frekvenčním spektru jsou patrné poměrně úzké frekvenční oblasti s výrazně vyšší amplitudou (viz: Obr. 2). Frekvenční poloha první z těchto oblastí odpovídá základní frekvenci zdrojového hlasu f_{01} . Ostatní výrazné frekvence jsou celé násobky základní frekvence (vyšší harmonické frekvence).



Obr. 2: Zdrojové hlasy, různé výšky hlasu

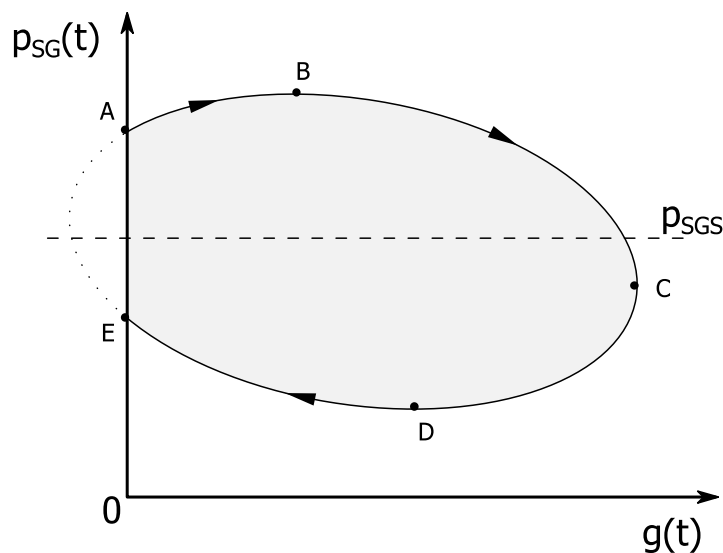
Základní frekvence zdrojového hlasu má vliv nejen na vnímání hlasu (výška hlasu), ale ovlivňuje i to, jak jsou následně vybuzeny formanty dané samohlásky. Při nízké základní frekvenci zdrojového hlasu je buzení vokálního traktu (filtru) lepší a výsledné amplitudo-frekvenční spektrum samohlásky má jasně patrná lokální maxima odpovídající formantům. V případě vysoké základní frekvence jsou frekvenční rozestupy mezi vyššími harmonickými frekvencemi velké a filtr vokálního traktu není tak dobře vybuzen. V některých případech (extrémě vysoké základní frekvence – sopranový zpěv) může mít posluchač problém spolehlivě rozlišovat jednotlivé samohlásky.

Vznik a tvorbu zdrojového hlasu popisuje teorie fonace. V dnešní době je nejčastěji využívána Teorie myoelesto-aerodynamická. Později definovaná Teorie bublin tlakového vzduchu používá k popisu vzniku zdrojového hlasu mírně odlišný přístup a veličiny.

Myoelesto-aerodynamická teorie fonace, jak z názvu vyplývá, je myšlenkově složena ze dvou částí. Myoelastická část teorie popisuje elastické deformace hlasivek při působení svalového napětí a vnějších zátěžných sil. Aerodynamická část vysvětluje spolupůsobení proudícího vzduchu z plic mezihlasivkovou mezerou g na pohyb hlasivek. Aerodynamická část této teorie se opírá především o existenci Bernoulliho efektu. Vznik zdrojového hlasu popisuje pomocí průběhu objemové rychlosti U_g mezihlasivkovou mezerou. Časový průběh objemové rychlosti je nejčastěji popisován pomocí tzv. LF pulzu [6].

Teorie bublin tlakového vzduchu vychází z kvalitativního popisu tvorby hlasu. Důraz klade na transformaci subglotického tlaku $p_{SG}(t)$ na supraglotický $p_{SPG}(t)$ (zdrojový hlas). Pohyb hlasivek je tím co umožňuje tuto transformaci. Z hlediska proudění vzduchu přes hlasivky je určující jejich otevření, mezera glottis $g(t)$. Teorie sleduje průběhy $g(t)$ a $p_{SG}(t)$. Z časových průběhů je konstruována charakteristika $g - p_{SG}$.

Schematicky je charakteristika ukázána na Obr. 3. Jedná se o elipse podobnou křivku v souřadných osách $g - p_{SG}$. Pro případy $g = 0$ (hlasivky uzavřeny) dochází ke zploštění (useknutí) této charakteristiky. Na charakteristice lze označit některé význačné body (A-E). Tyto body odkazují na některé důležité okamžiky



Obr. 3: Shéma charakteristiky $g - p_{SG}$

během funkce hlasivek (maximální otevření, maximální tlak v p_{SG} , ...) [18]. Plocha této charakteristiky (na obrázku vyplněná šedě) je podle Teorie bublin tlakového vzduchu úměrná přivedené práci pro tvorbu zdrojového hlasu. Samotnou charakteristiku $g - p_{SG}$ představuje na obrázku obrysová čára která má šipkami vyznačenou orientaci (orientace pro zdravé hlasivky při fonaci ve fázi výdechu vzduchu z plic).

4 NÁHRADNÍ ZDROJOVÝ HLAS

Nahrazení zdrojového hlasu po totální laryngektomii je základním účelem většiny hlasových rehabilitačních technik po provedené operaci. V dnešní době jsou používány různé způsoby náhrady zdrojového hlasu. Každá z popsaných teorií fonace pracuje také s modely (experimentálními a výpočtovými) [10,11,16].

Dnes nejčastěji používané způsoby náhrady zdrojového hlasu [3] jsou popsány v následující kapitole. V některých případech se využívá i určitých technických pomůcek.

4.1 POUŽÍVANÉ NÁHRADY HLASU

Jsou uvedeny pouze nejčastěji využívané způsoby náhrady zdrojového hlasu. Většinou nahrazení zdrojového hlasu souvisí s hlasovou rehabilitací, při které si pacient musí osvojit některé nové techniky.

- **Šepot**

Jedná se o přirozený způsob tvorby hlasu šepem. Problém může být pro pacienty po totální laryngektomii způsob jakým ve vokálním traktu vytvořit proud vzduchu (není propojení mezi vokálním traktem a plicemi).

- **Elektrolarynx**

Využívá se externího zařízení pro buzení vokálního traktu periodickým signálem. Externí zařízení, elektrolarynx, rozpohybovává měkké tkáně v oblasti krku. Periodické pohyby se přenáší dovnitř vokálního traktu, kde se stávají zdrojem akustických vln (zdrojového hlasu). Zařízení pacient ovládá (spouští činnost generování signálu) pomocí tlačítka na těle přístroje. U znělých samohlásek je generování hlasu vcelku bezproblémové. U souhlásek nastává stejný problém jako u šepotu, totiž že pro tvorbu souhlásek je potřeba proudění vzduchu vokálním traktem.

- **Esophageální hlas**

Spočívá ve vytváření zásoby vzduchu potřebného pro fonaci v prostoru jícnu. Následně je cíleně tento vzduch pouštěn skrze vokální trakt. Zdrojový hlas se tvoří při proudění skrze jícnový svěrač. Při rehabilitaci si pacient musí osvojit jednak techniku vytváření zásoby vzduchu uvnitř jícnu, ale také zvládnout manipulaci s jícnovým svěračem.

- **Tracheo-esophageální hlas**

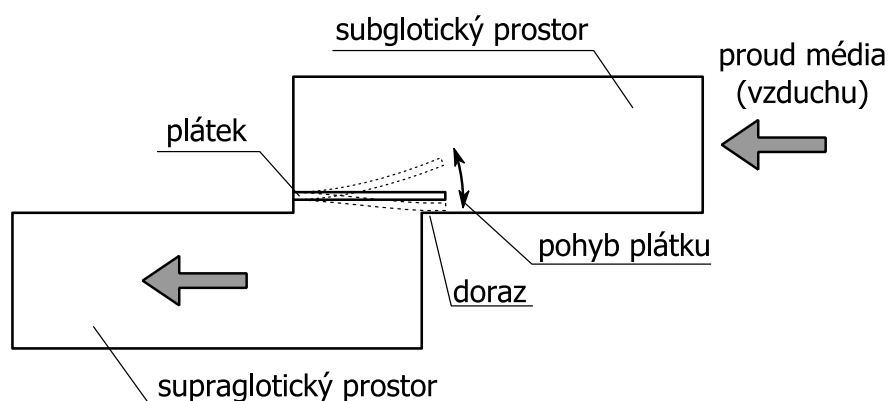
Jedná se modifikaci předchozí metody hlasové rehabilitace. Zdrojový hlas se tvoří na stejném místě – jícnovém svěrači. Zdrojem vzduchu jsou v tomto případě plic. Musí tedy existovat propojení mezi jícnem a tracheou. Propojení (tracheo-esophageální punkce) se vytváří buď přímo při laryngektomii, nebo při následném chirurgickém zákroku. Do této punkce je kvůli bezpečnosti pacienta vložen jednocestný ventil (náhrada epiglottis – hrtanové záklopký), aby pacient nevdechl cizí předměty (potravu, nápoje, sliny) z dutiny ústní. Při rehabilitaci musí pacient zvládnout manipulaci s jícnovým svěračem v součinnosti s aktivitou plic.

4.2 VÝBĚR PLÁTKOVÉHO ELEMENTU

Po zkušenostech s tvorbou zdrojového hlasu VUT hlasivkou [11,18] bylo rozhodnuto o prozkoumání jiných způsobů generování zdrojového hlasu. Pro toto prozkoumání byl vybrán plátkový element v konfiguraci -,+ [7]. Důvody pro jeho výběr jsou především tyto:

- analytický výpočet vlastních frekvencí [2] (bez uvažování interakce se vzduchem, bez uvažování přídavné hmotnosti vzduchu) ukazuje citlivost vlastní frekvence na geometrické parametry – možnost ladění vlastní frekvence
- první vlastní tvar kmitání plátku způsobuje přerušování proudu vzduchu proudícího přes element. Podmínka pro generování zdrojového hlasu na základě teorie bublin tlakového vzduchu
- jednoduché konstrukční provedení. Umožňuje jednak finančně nenáročnou výrobu experimentálního modelu. Jednoduché konstrukční provedení je předpokladem pro vyšší spolehlivost případné reálné hlasové náhrady.
- prvotní experimentální měření ukázala vhodné složení amplitudo-frekvenčního spektra generovaného signálu plátkového elementu v konfiguraci -,+.

Schematické zobrazení funkce plátkového elementu je na Obr. 4. Prostory před a za plátkem jsou pojmenovány shodně, jak je běžné při popisu anatomie hlasových orgánů. Prostor před plátkem je označen jako subglotický, prostor za plátkem je supraglotický.



Obr. 4: Schéma funkce plátkového elementu v konfiguraci -,+

4.3 EXPERIMENTÁLNÍ MODEL PLÁTKOVÉHO ELEMENTU

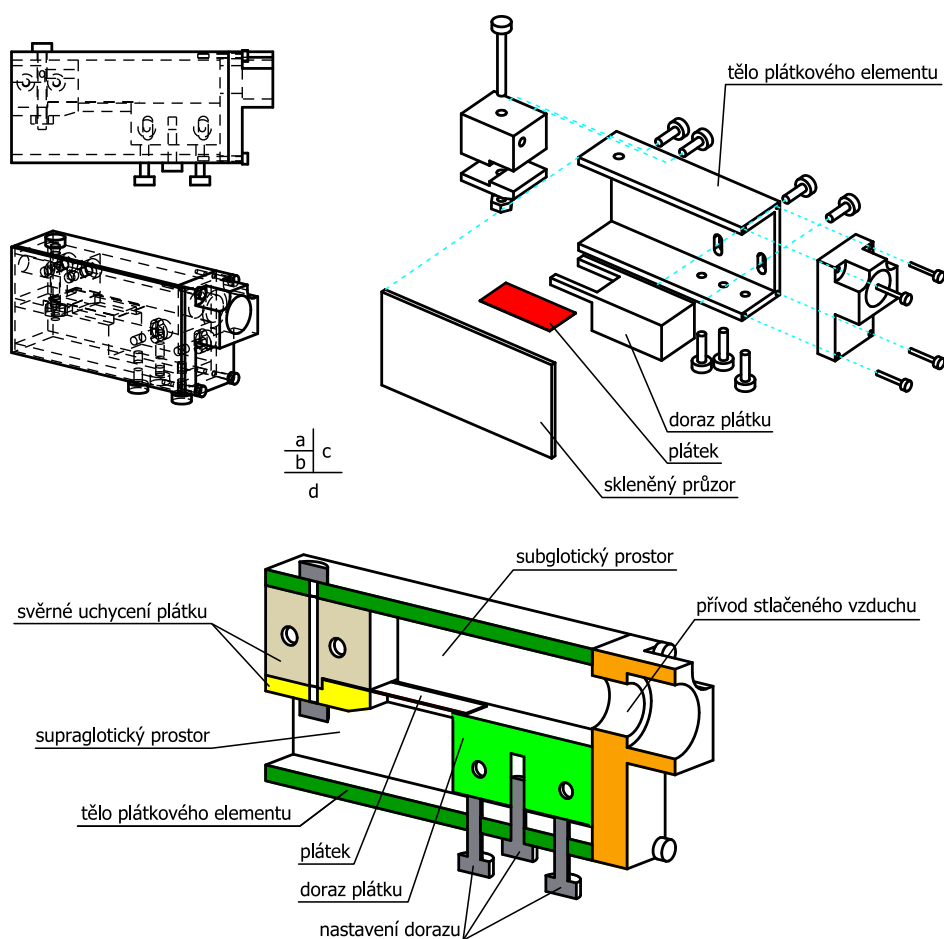
Experimentálních měření jsou prováděny na fyzikálním (experimentálním) modelu plátkového elementu. Tento model je konstruován tak, aby umožňoval změnu některých parametrů. Součástí experimentálního modelu je částečně i subglotický a supraglotický prostor. Na tyto prostory je samozřejmě možné napojit další kavity (model subglotického prostoru, model kavity vokálního traktu).

Je umožněna výměna plátku. Je umožněno změnit materiál plátku, jeho tloušťku případně hmotnost přidanou na konec plátku. Pohyb dorazu umožňuje měnit počáteční mezeru mezi plátkem a dorazem. Výměnou dorazu je možné úplně změnit geometrii plátku a použít například plátek s jinou šířkou nebo lichoběžníkový plátek.

Konstrukce respektuje požadavky používaných měřících metod a je počítáno s rozšiřováním používaných měřících metod. Výroba plátkového elementu není nákladná, což znamená, že při specifických požadavcích nově aplikovaných experimentálních metod je možné plátkový element upravit, případně vyrobit model nový.

- **Konstrukční provedení experimentálního modelu plátkového elementu**

Základní mechanické části jsou vyrobeny z Al-slitiny. Povrchově upraveny anodickou pasivací (tzv. eloxováním). Tvar a jednotlivé části experimentálního modelu ukazuje Obr. 5.



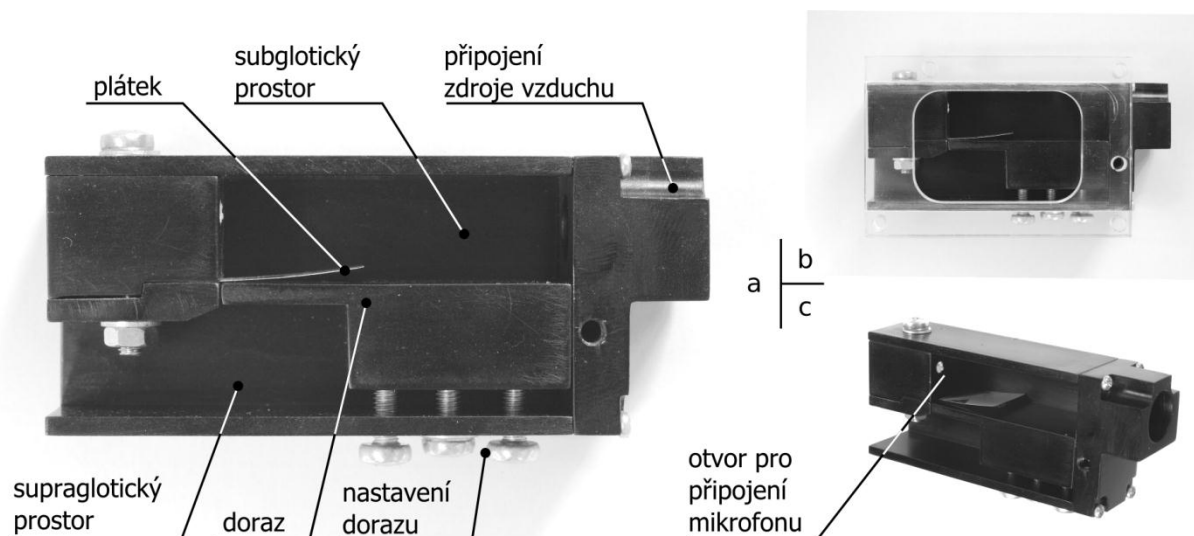
Obr. 5: Konstrukční provedení experimentálního modelu

Z čelní strany experimentálního modelu je umožněn pohled dovnitř modelu přes skleněný průzor. Tohoto průzoru je využito při optických měřeních polohy plátku.

Jednotlivé díly modelu jsou spojeny rozebíratelnými šroubovými spoji (viz: Obr. 5c). Plátek je v modelu uchycen svěrným spojením.

Připojení zdroje vzduchu je přes otvor ($\varnothing 14\text{mm}$) v boční stěně modelu. Boční stěnu je rovněž možné odstranit a zdroj vzduchu napojit přímo na subglotickou kavitu ($20 \times 15\text{mm}$).

Skutečné provedení experimentálního modelu je na Obr. 6.



Obr. 6: Skutečné provedení experimentálního modelu plátkového elementu

- **Změny parametrů experimentálního modelu**

Toto byl jeden z prvních požadavků kladených na konstrukční provedení experimentálního modelu. Jsou umožněny tyto změny:

- změna rozměrů a materiálu plátku
- změna polohy dorazu vůči plátku.

- **Možná experimentální měření**

Jedná se o akustická měření generovaných signálů, ale také měření polohy plátku během funkce plátkového elementu. Hodnota středního subglotického tlaku je měřena připojeným kapalinovým manometrem.

Akustická měření výstupního akustického signálu je možné provádět i uvnitř supraglotické kavity. Pro akustické měření v subglotické kavitě je navržen otvor, kterým lze do této kavity zastrčit měřící mikrofón.

Měření polohy plátku bylo plánováno především bezkontaktními optickými metodami. Jednak fotografováním pod stroboskopickým světlem, ale i měření vysokorychlostní kamerou. Polohu plátku je teoreticky možné sledovat i jinými metodami (kapacitní metody). Aplikace těchto metod je dosti náročná. Z přímých měření připadá v úvahu měření deformací plátku pomocí tenzometrů. Bylo by potřeba aplikovat citlivé a málo hmotné tenzometry. Problém může nastat při přepočtu přetvoření změřeného tenzometrem na polohu plátku. Tento vztah v případě plátku s dorazem nebude jednoduchý.

Další skupinu potencionálních měření tvoří měření proudění vzduchu uvnitř modelu při jeho funkci. Vhodnou metodou pro kvalitativní zobrazení proudění uvnitř kavity je metoda Schlieren [24]. Jedná se o optickou metodu, při které jsou zvýrazněny rozdíly v indexu lomu světla (tyto změny jsou způsobeny lokálními změnami tlaku vzduchu). Kvantitativního vyhodnocení je schopná metoda PIV [1], kdy v určitém optickém řezu získáváme informace o rychlostním poli v daném čase. Pro aplikaci těchto metod by bylo nutné provést mírné konstrukční úpravy experimentálního modelu.

4.4 VÝPOČTOVÝ MODEL PLÁTKOVÉHO ELEMENTU

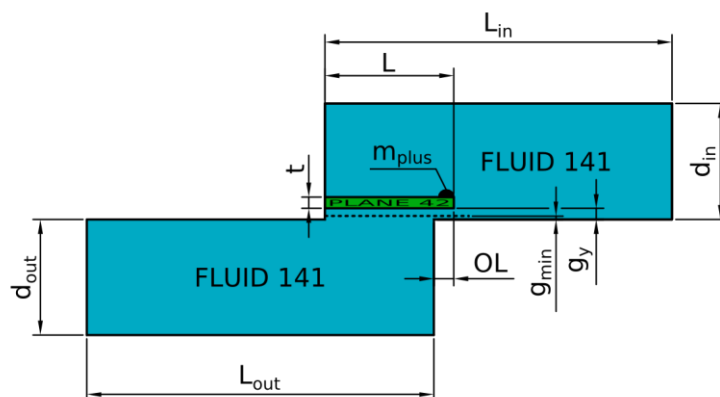
Pro stejnou topologii plátkového elementu je vytvořen dvourozměrný výpočtový model. Model je vytvořen parametricky pro řešení metodou konečných prvků. Změnou parametrů je možné měnit především rozměry modelu a materiálové charakteristiky plátku. Způsob fungování plátkového elementu vyžaduje zahrnutí interakce mezi plátkem a okolním vzduchem. Model interakce je obousměrný. Interakce je řešena po částech (partitioned solution). Každé z řešených fyzikálních prostředí má svůj samostatný výpočtový model. V tomto případě je tedy vytvořen samostatný model plátku (pro strukturální analýzu) a model vzduchových kavit (pro řešení proudění ve vzduchových kavitách).

Model (modely obou fyzikálních prostředí) je řešen v časové oblasti se zahrnutím setrvačných účinků. Časový krok je nastaven konstantní pro celý výpočet. Velikost časového kroku je nastavena relativně malá ($1e-5s$). Malý časový krok je nastaven z důvodu konvergence výpočtu.

Při jednotlivých výpočtových simulacích na výpočtovém modelu je sledován především vliv hodnoty středního subglotického tlaku p_{SGS} a některých geometrických parametrů na chování modelu.

- **Geometrie výpočtového modelu:**

Model geometrie je dvourozměrný plošný (2D), vychází z topologie schematicky zobrazené na Obr. 4. Bylo uvedeno, že model je vytvořen parametricky, jednotlivé geometrické parametry jsou zakótovány na následujícím obrázku.



Obr. 7: Geometrie výpočtového modelu, zakótované geometrické parametry

Na Obr. 7 jsou zároveň rozlišeny strukturální (model plátku – výpočtová síť z prvků PLANE42) a fluidní model (model vzduchových kavit – výpočtová síť z prvků FLUID141). Význam jednotlivých parametrů je patrný z obrázku. Význam parametru g_{min} bude vysvětlen později (vztahuje se k algoritmu deformování sítě vzduchových kavit). Parametr m_{plus} vyjadřuje velikost přídavné hmoty na špičce plátku.

Výpočtová MKP síť je vytvořena z uvedených typů prvků. Výpočty budou probíhat v systému ANSYS. Je snaha udržet tvar sítě co nejpravidelnější. Všechny prvky mají čtyřuzlovou geometrii. Délky hran jednotlivých elementů se liší. V okolí plátku jsou elementy vytvářeny jemnější. U vstupu a výstupu z modelu jsou elementy vytvářeny relativně delší. Model plátku je také diskretizován sítí čtyřuzlových prvků. Přes tloušťku plátku je vytvořeno 6 prvků, po délce plátku 24-27 elementů (podle rozměrů modelu). Přídavná hmota je v modelu reprezentována prvkem MASS21 umístěným na špičce plátku (v uzlu sítě strukturálních prvků).

Celkem je MKP síť modelu tvořen přibližně 26000 elementy s 26105 uzly.

- **Modely materiálů:**

Model materiálu plátku je zvolen lineárně elastický izotropní. U tohoto modelu dostačuje předepsání dvou materiálových charakteristik. Modul pružnosti v tahu E a Poissonovo číslo μ . Hodnoty těchto materiálových charakteristik vybrány podle toho jaký materiál plátku je zkoumán (ocel, mosaz, Al-slitina, plastická hmota).

Model materiálu vzduchu je použitý z databáze ANSYS. Jedná se o viskózní stlačitelnou tekutinu, která má vlastnosti odpovídající vzduchu. Referenční tlak je zadán $p_{atm} = 1013,5hPa$.

- **Zatížení a okrajové a počáteční podmínky:**

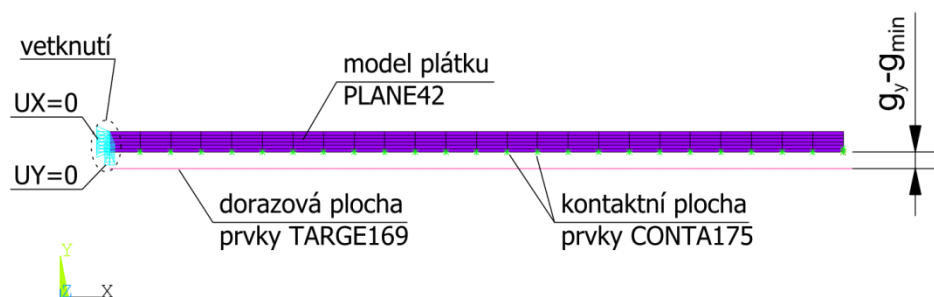
Přenos zatížení z fluidní analýzy na model plátku je zabezpečen v rámci modelu interakce. Na plátek se přenáší tlaky vypočtené při řešení proudění ve vzduchových kavitách.

Okrajové podmínky pro model plátku jsou poměrně jednoduché a spočívají v zamezení všech posuvů a rotací v místě vetknutí plátku. Další okrajovou podmínkou je kontaktní okrajová podmínka (kontakt plátku s dorazem). Předepsání kontaktní podmínky spočívá v přidání speciálních MKP prvků v místech, kde kontaktní podmínku požadujeme.

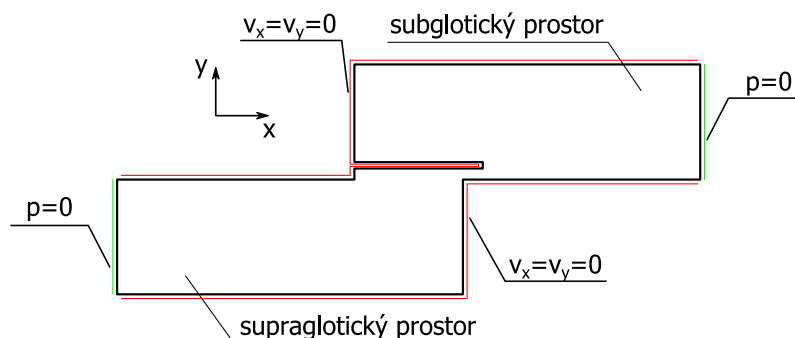
Okrajové podmínky pro model vzduchových kavit jsou následující:

- na vstupu vzduchu do modelu je předepsán požadovaný střední subglotický tlak p_{SGS} (relativní hodnota vůči referenčnímu tlaku p_{atm})
- na výstupu vzduchu z modelu je předepsán nulový tlak (přetlak) výstup do okolní atmosféry
- na všech ostatních stěnách modelu jsou předepsány nulové rychlosti proudění vzduchu

Všechny předepsané okrajové podmínky jsou ukázány na následujících obrázcích:



Obr. 8: Okrajové podmínky pro model plátka



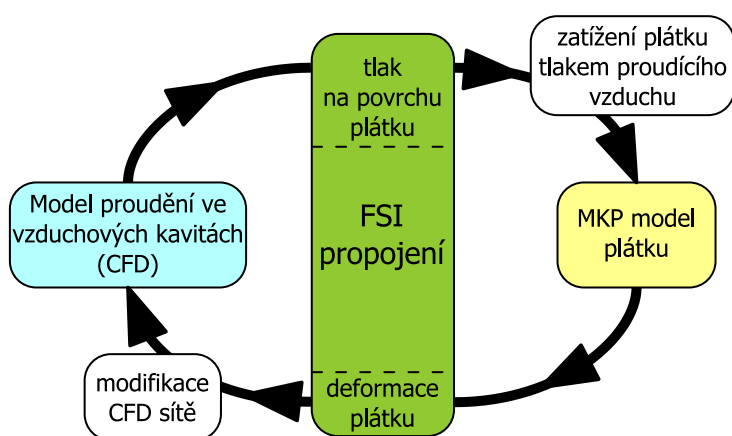
Obr. 9: Okrajové podmínky pro model vzduchových kavit

Počáteční podmínky jsou předepsány v prvním řešeném časovém kroku u modelu vzduchových kavit. V celém prostoru subglotické kavity je předepsán požadovaný střední subglotický tlak p_{SGS} .

• Model interakce:

Interakce mezi modelem plátka a modelem vzduchových kavit zajišťuje především zatěžování plátka tlaky vypočtenými ve fluidním modelu a zpětně deformaci výpočtové sítě fluidní sítě na základě pohybu plátka. Model interakce je tedy obousměrný.

V každém časovém kroku je nejprve vyřešeno proudění vzduchu ve vzduchových



Obr. 10: Interakce modelu plátka a vzduchu

kavitách. V místech na povrchu plátka jsou odečteny tlaky vzduchu a tyto aplikovány jako zatížení v modelu plátka. Řešením modelu plátka získáme nový deformovaný tvar plátka. Na základě tvaru plátka je upraven tvar výpočtové sítě fluidního prostředí. Může se začít řešit další časový krok. Graficky je tento postup ukázán na Obr. 10.

Modrou a žlutou barvou jsou na Obr. 10 označeny jednotlivé řešené modely. Zatížení plátka tlakem proudícího vzduchu je provedeno pomocí příkazu *ldread*.

Příkaz načte požadované zatížení z výsledkového souboru a aplikuje jej na povrch plátku. Plátek je v tomto případě na površích zatížen rovnoměrně rozloženým tlakem.

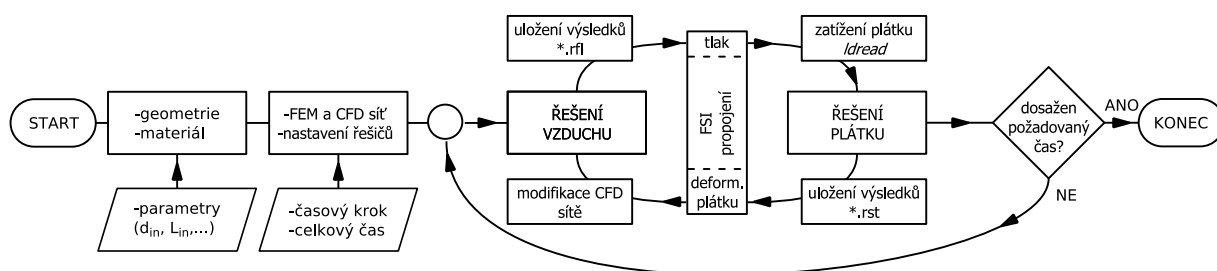
Pro modifikaci sítě vzduchových kavit byla v procesu ladění výpočtového modelu snaha také využít standartního příkazu systému ANSYS – *demorph*. Ukázalo se, že deformace sítě touto metodou v některých případech způsobuje problémy. Dojde k poškození sítě vzduchových kavit. Z toho důvodu byl pro deformaci sítě nasazen vlastní algoritmus. Tento algoritmus sice není univerzální, ale na pravidelné čtyřuzlové síti je stabilní a plně dostačuje. Pomocí tohoto algoritmu je požadovaná deformace sítě v místě plátku plynule rozpočítána na elementy sítě v okolí plátku.

Modifikace sítě vzduchových kavit naráží i na jiné problémy. V případě kontaktu plátku s dorazem by se model vzduchových kavit měl rozdělit na dvě samostatné části (subglotický a supraglotický prostor). Elementy v prostoru mezi plátkem a dorazem by měly v případě kontaktu zaniknout. Tímto by během výpočtu docházelo ke změnám sítě, což je řešitelné jen velmi problematicky. Tento problém byl vyřešen zavedením náhradní dorazové plochy. Kontaktní okrajová podmínka je předepsána mezi touto náhradní kontaktní plochou a spodní plochou plátku. Náhradní dorazová plocha je od dorazu vzdálena o g_{min} (viz: Obr. 7). Při kontaktu plátku s náhradní dorazovou plochou jsou všechny elementy mezi plátkem a dorazem zdeformovány do mezery o velikosti g_{min} .

• Algoritmus a nastavení výpočtu

Řešení obou modelů probíhá po jednotlivých časových krocích. Velikost časového kroku je pevně nastavena $\Delta t = 1 \cdot 10^{-5} s$. Při řešení modelu plátku je tento časový krok rozdělen z důvodu plynulejší aplikace zatížení rozdělena na deset menších kroků (tzv. substepů). Tento přístup je vhodný i z důvodu přítomnosti kontaktních okrajových podmínek. Při řešení obou fyzikálních prostředí jsou při výpočtu zohledněny setrvačné síly.

Výpočetní model je sestaven tak, aby bylo možné jednoduše měnit vstupní parametry (geometrii a střední subglotický tlak p_{SGS}). Z toho důvodu je celý algoritmus výpočtu zapsán pomocí příkazů jazyka APDL. Potom stačí zadat rozměry geometrie a hodnotu středního subglotického tlaku a tvorba modelu a jeho řešení probíhá automaticky. Vývojový diagram výpočtového algoritmu je na Obr. 11.



Obr. 11: Algoritmus řešení modelu plátkového elementu

5 ANALÝZA A DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Experimentální model slouží především pro akustická měření generovaného signálu (zdrojového hlasu). Optická měření pohybu plátku jsou také provedena. Experimenty je popsáno chování plátkového elementu při měnících se podmínkách (změna středního subglotického tlaku, změna délky supraglotické kavity). Experiment s měnícím se středním subglotickým tlakem ukáže vliv na základní frekvenci zdrojového hlasu, tedy závislost $f_{01}(p_{SGS})$. Zároveň je sledováno i složení amplitudo-frekvenčního spektra. Složení amplitudo-frekvenčního spektra je důležité, aby byl plátkový element schopen korektně vybudit formanty jednotlivých samohlásek, v případě, že by byl použitý jako umělý zdrojový hlas. Na tento experiment navazuje další při kterém se mění délka supraglotické kavity. Zde je cílem ukázat, jak je plátkový element citlivý na připojený akustický rezonátor (čímž je v tomto případě právě supraglotická kavita).

Optická měření jsou provedena za účelem popisu pohybu plátku během funkce plátkového elementu. Je provedeno jak snímání pod stroboskopickým světlem, tak videozáznam rychlokamerou OLYMPUS.

Výpočtový model poslouží především pro získání informací o charakteristice $g - p_{SG}$. Charakteristika je hlavní způsob, jak je v teorii bublin tlakového vzduchu popisována fonace. Jako u experimentálního modelu bude sledován vliv velikosti předepsaného středního subglotického tlaku p_{SGS} na hodnotu základní frekvence generovaného signálu. V případě výpočtového modelu je časově a kapacitně náročné získat dlouhý časový záznam generovaného signálu použitelný pro rychlou Fourierovu transformaci (FFT). Relativně malý počet časových kroků a vysoká vzorkovací frekvence má nepříznivý vliv na velikost frekvenčního kroku ve spektru. Situace je vyřešena výběrem generovaného signálu ze stabilní fáze funkce plátkového elementu a jeho vícenásobným navázáním.

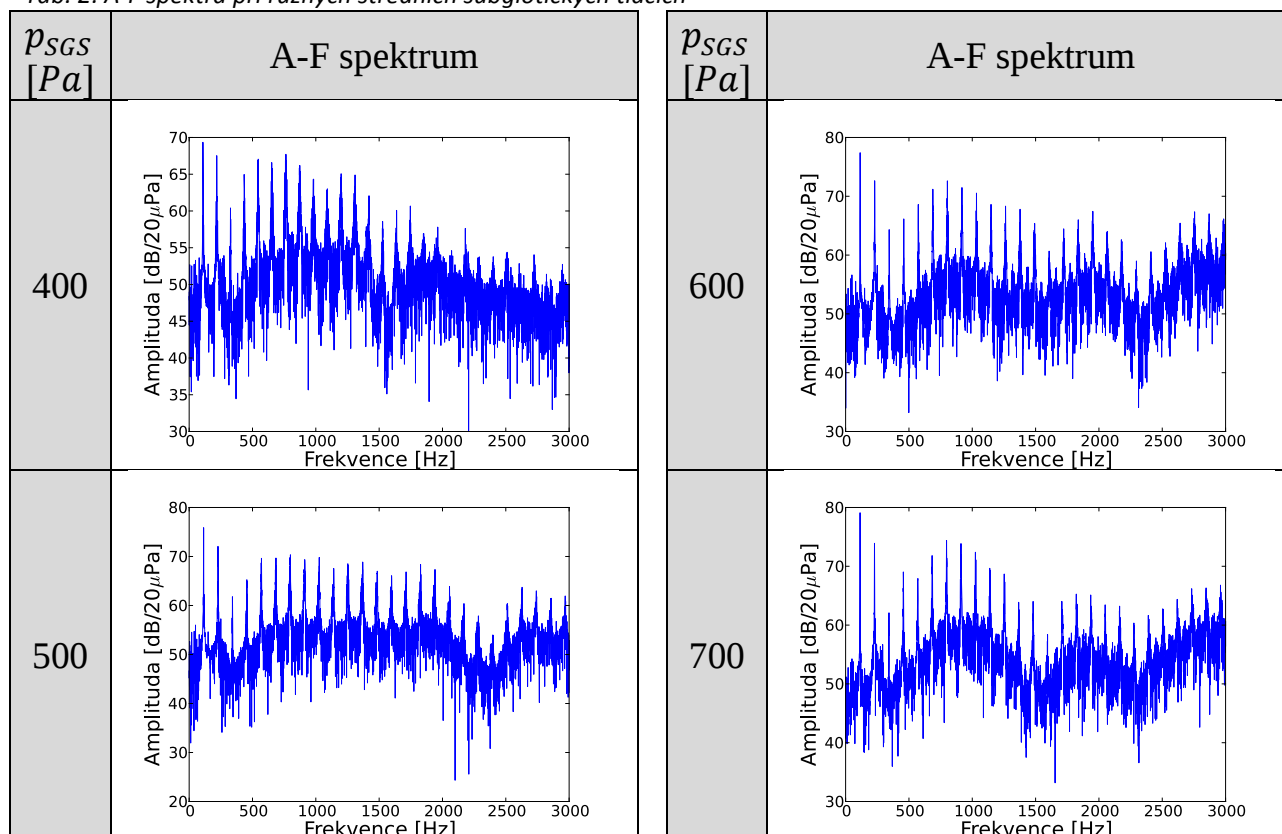
Na výpočtovém modelu jsou sledovány jednotlivé fáze funkce tohoto elementu. U některých konfigurací lze identifikovat jak fázi rozběhu funkce, přechod ke stabilní funkci a stabilní funkci. Pro vyšetřování stability se jako nejvhodnější ukázalo zobrazení sledovaných veličin ve fázové rovině [2], případně sledování průběhu charakteristiky $g - p_{SG}$.

Změny tvaru charakteristiky $g - p_{SG}$ způsobené vlivem změn geometrie (tloušťka plátku t , délka subglotické kavity L_{in}) a materiálových charakteristik plátku jsou sledovány pro střední subglotické tlaky $p_{SGS} = 300; 500; 1000 Pa$.

• Výsledky dosažené na experimentálním modelu:

Bylo uvedeno, že základním experimentem prováděným na experimentálním modelu jsou akustická měření generovaného signálu. Pro nastavené hodnoty středního subglotického tlaku $p_{SGS} = 400; 500; 600; 700 Pa$ byly zaznamenány a zpracovány vygenerované akustické signály.

Tab. 2: A-F spektra při různých středních subglotických tlacích



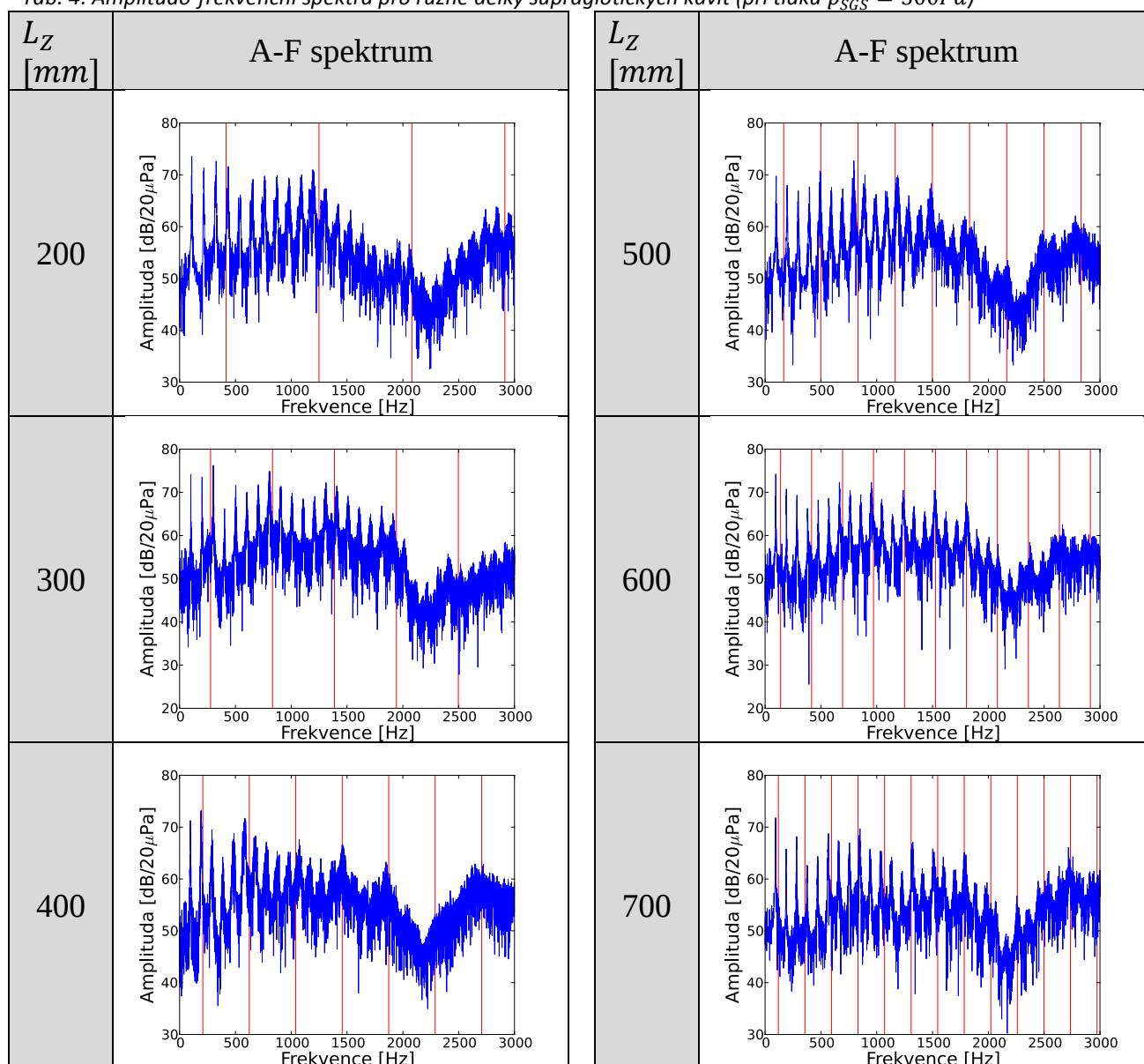
Amplitudo-frekvenční spektra ukazují přítomnost vysokého počtu vyšších harmonických frekvencí ve vygenerovaném signálu. U nejnižšího předepsaného středního subglotického tlaku jsou vyšší harmonické frekvence výrazné až do frekvence přibližně 1500Hz (přibližně 14. Harmonický násobek). Se zvyšujícím se středním subglotickým tlakem jsou vyšší harmonické frekvence výraznější i pro vyšší harmonické násobky. Zároveň se stávají výraznější oproti šumu pozadí. Hodnota základní frekvence generovaného signálu se se změnou hodnoty p_{SGS} mírně mění. Odečtené hodnoty základních frekvencí f_{01} jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 3: Závislost základní frekvence f_{01} na p_{SGS}

p_{SGS} [Pa]	400	500	600	700
f_{01} [Hz]	108,5	114,0	114,5	114,0

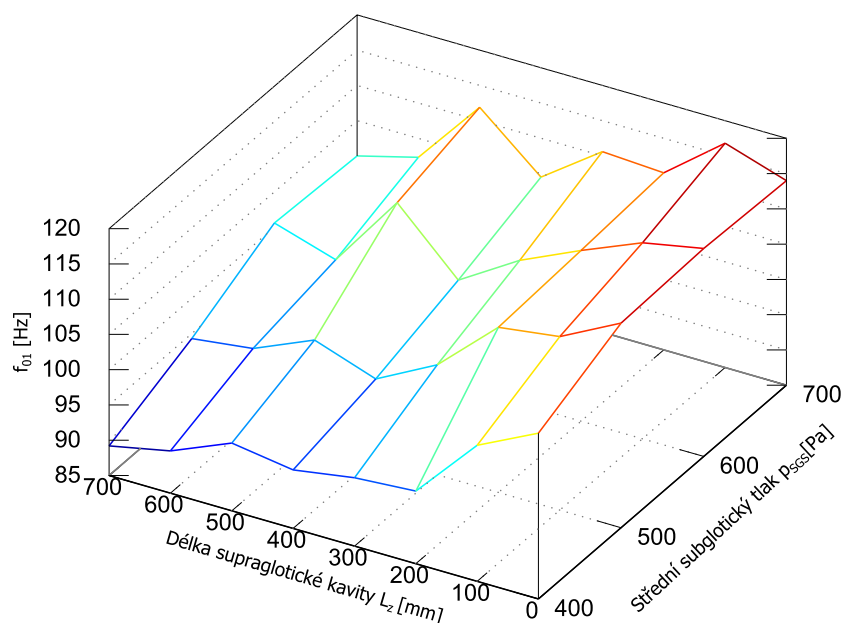
Experimenty pokračují připojením různě dlouhých supraglotických kavit. Výstup z plátkového elementu přímo vstupuje do připojené supraglotické kavity. V těchto případech je generovaný signál zaznamenáván až na výstupu ze supraglotické kavity.

Tab. 4: Amplitudo-frekvenční spektra pro různé délky supraglotických kavít (při tlaku $p_{SGS} = 500Pa$)



Tento experiment ukazuje schopnost plátkového elementu vybudit módy připojené kavity (vlastní frekvence jsou v amplitudo-frekvenčních spektrech vyznačeny svislými červenými čarami). Ve spektrech je vidět zesílení frekvenčních složek v okolí vlastních frekvencí kavít. Zároveň je sledováno jak základní frekvence f_{01} generovaného signálu reaguje na připojení supraglotické kavity. Délka připojených kavít L_Z se zvětšuje po 100mm přírůstcích až do 700mm. Pro každou délku připojené supraglotické kavity jsou provedeny čtyři měření při různých hodnotách středního subglotického tlaku ($p_{SGS} = 400; 500; 600; 700Pa$). Zaznamenané akustické signály jsou opět zpracovány na amplitudo-frekvenční spektra. Vybraná spektra ($p_{SGS} = 500Pa, L_Z > 100mm$) jsou v Tab. 4.

Na Obr. 12 je vidět průběh základní frekvence f_{01} při všech prováděných změnách (délky L_Z a tlaku p_{SGS}).

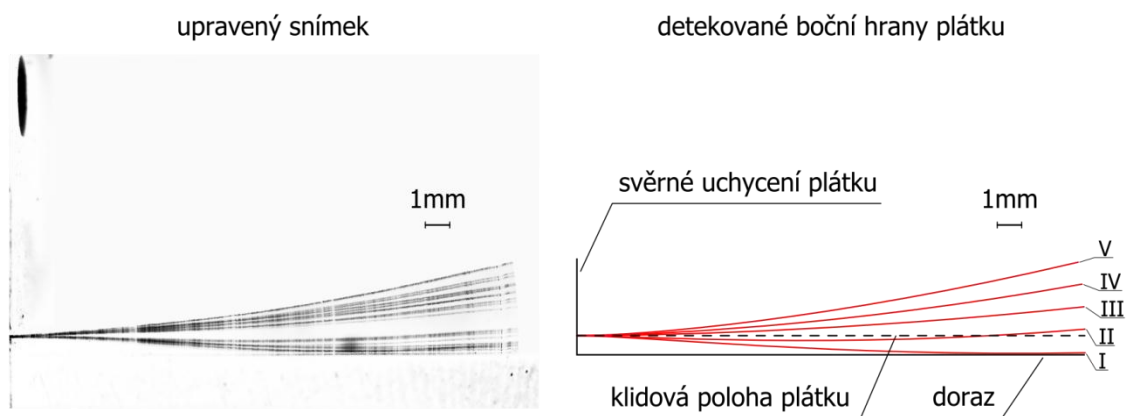


Obr. 12: Závislost $f_{01}(L_z, p_{sgs})$

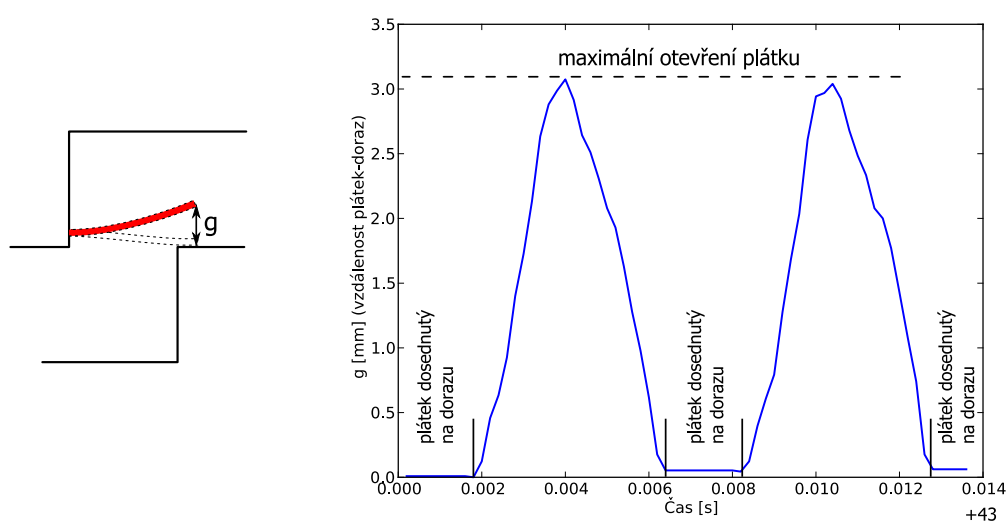
Optická měření provedená na experimentálním modelu zachycují polohu plátku při funkci plátkového elementu. Jsou využité dvě metody pro zachycení polohy plátku. Fotografie pod stroboskopickým světlem a video záznam rychlokamerou.

Výsledek snímání pohybu plátku pod stroboskopickým světlem je fotografie, na které je zachyceno několik poloh plátku. Pro kvantitativní vyhodnocení takového snímku je potřeba snímek kalibrovat. Zde se při kalibraci neuvažuje zkreslení objektivu a pro celý snímek je určeno měřítko zobrazení. Vhodnými úpravami snímku (úpravy kontrastu) lze dosáhnout zvýraznění jednotlivých poloh plátku v obraze. Pro detekci plátku v obraze je potom možné použít různé automatické metody segmentace obrazu. Zde bylo rozlišení plátku provedeno vizuálně. Při vizuální detekci jsou respektovány podmínky uchycení plátku v modelu. V místě svěrného spoje plátku je dodržena podmínka nulového natočení plátku v tomto místě. Jeden ze snímků (po úpravě kontrastu) a nalezené tvary plátku jsou na Obr. 13.

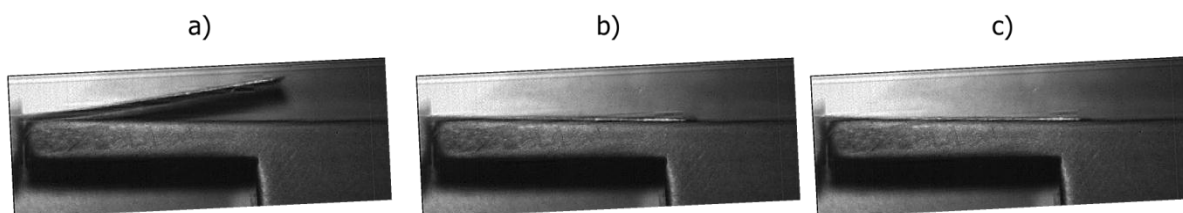
Při videozáznamu pohybu plátku rychlokamerou je v každém záběru zachycena poloha plátku v konkrétním časovém okamžiku. Oproti stroboskopické metodě tedy existuje i informace o čase. Zpracování obrazu musí probíhat po jednotlivých snímcích (časech). Je sledována pouze vzdálenost volného konce plátku od dorazu g (viz: Obr. 14). Při vizuálním sledování pořízeného videozáznamu lze pozorovat různé fáze funkce plátkového elementu. Je možné vidět rozběh funkce i její stabilizaci. Vybrané snímky z videozáznamu jsou na Obr. 15.



Obr. 13: Fotografie pod stroboskopickým světlem, detekce plátku



Obr. 14: Vyhodnocení polohy konce plátku z videozáznamu rychlokamerou



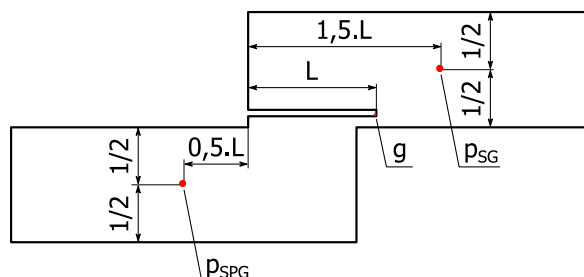
Obr. 15: Vybrané snímky z videozáznamu:

- a) maximální mezera g
- b) první kontakt konce plátku z dorazem
- c) maximální kontakt plátku z dorazem

• Výsledky dosažené na výpočtovém modelu:

Při řešení výpočtového modelu je v každém časovém kroku vyřešen jak pohyb vzduchu v kavitách, tak pohyb plátku. Pro sestavení charakteristiky $g - p_{SG}$ je nutné v každém časovém kroku znát polohu plátku vůči náhradní dorazové ploše (mezera g) a tlak v prostoru před plátkem (p_{SG}). Pro další zpracování je také vyčíslen průběh supraglotického tlaku p_{SPG} . Místa, kde jsou tyto veličiny vyhodnocovány, jsou vyznačena na Obr. 16.

Chování výpočtového modelu je sledováno při měnícím se středním subglotickém tlaku p_{SGS} na vstupu do modelu. Hodnoty středního subglotického tlaku jsou voleny v rozmezí 200-1000Pa s přírůstkem 50Pa. Model geometrie má pevné nastavení parametrů (tzv. referenční geometrie).

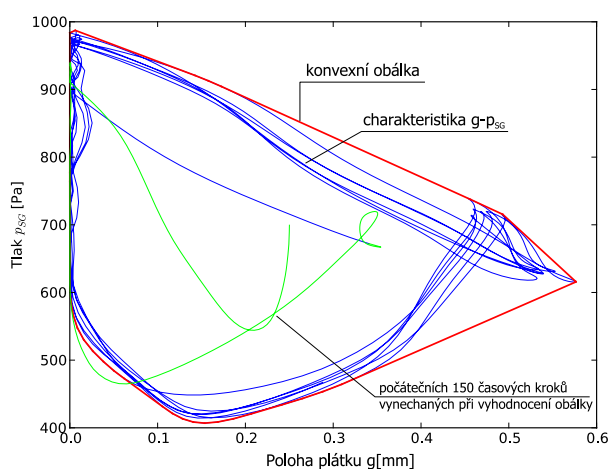


Obr. 16: Místa pro výpis výsledků

Rozměry referenční geometrie jsou (viz: Obr. 7): $L = 12\text{mm}$; $t = 0,3\text{mm}$; $L_{in} = 50\text{mm}$; $L_{out} = 50\text{mm}$; $d_{in} = 10\text{mm}$; $d_{out} = 10\text{mm}$; $g_y = 0,3\text{mm}$; $g_{min} = 0,05\text{mm}$; $OL = 1\text{mm}$. Materiálové charakteristiky plátku jsou zadány následovně: $E = 8e + 8\text{Pa}$; $\mu = 0,3$; $\rho = 957\text{ kg/m}^3$ (odpovídá HDPE).

Pro každý nastavený střední subglotický tlak je provedena samostatná výpočtová simulace (viz: Obr. 11). V první fázi je řešeno tisíc časových kroků. Pokud během této doby nedojde ke stabilizaci funkce modelu, je následně zvětšen počet časových kroků (na 2500 až 4000).

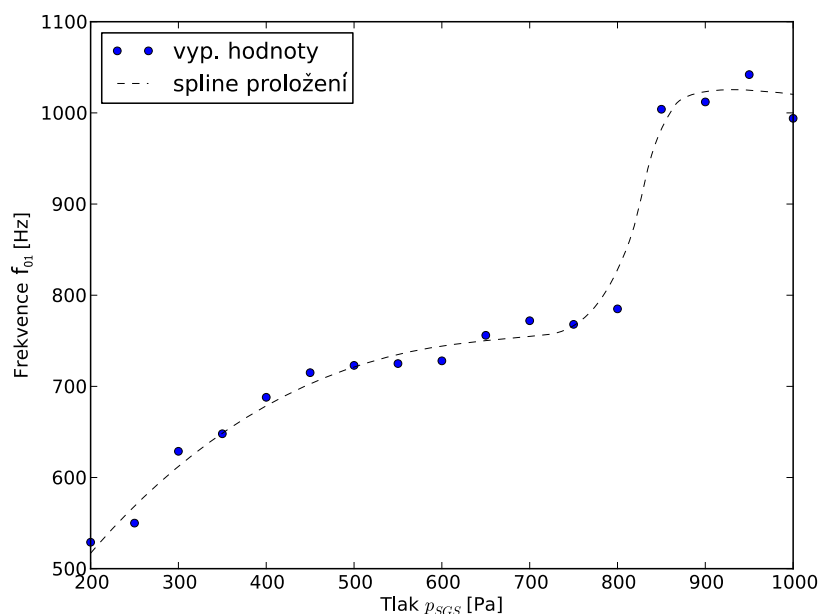
Pro každý předepsaný tlak je z výsledků simulace vyhodnocena charakteristika $g - p_{SG}$ a **amplitudo-frekvenční spektrum supraglotického tlaku $p_{SPG}(t)$** . Zde jsou uvedeny pouze souhrnné výsledky těchto simulací. Z amplitudo-frekvenčních spekter je zajímavá závislost první vlastní frekvence supraglotického tlaku na střední hodnotě subglotického tlaku (viz: Obr. 18).



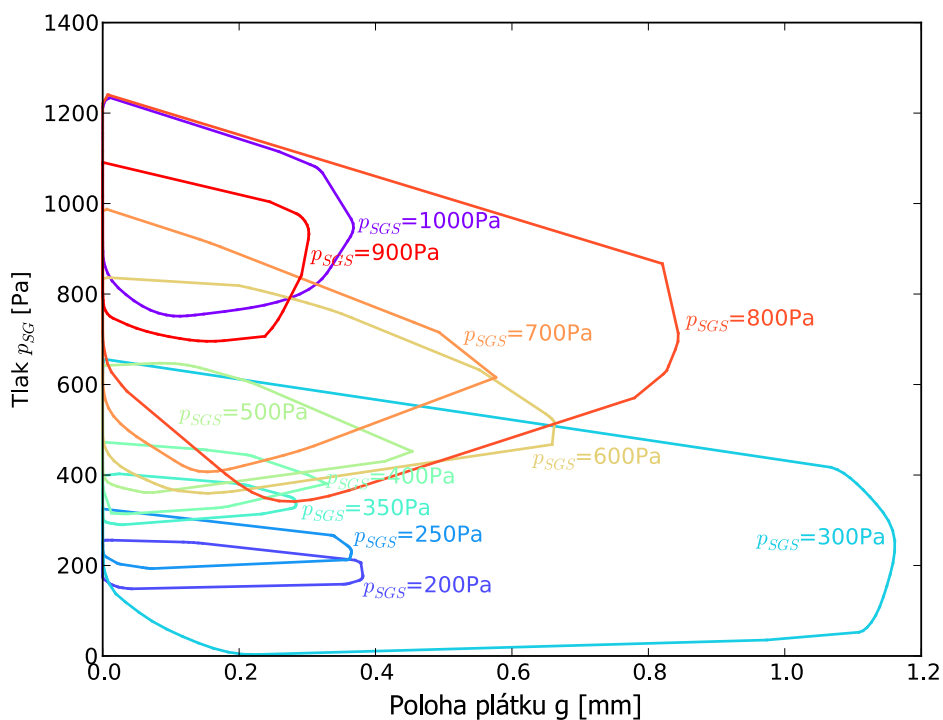
Obr. 17: Tvar konvexní obálky charakteristiky $g - p_{SG}$

Srovnání charakteristik $g - p_{SG}$ pro různé hodnoty středního subglotického tlaku je provedeno srovnáním konvexních obálek jednotlivých charakteristik. Konvexní obálky toto porovnání zpřehlední. Tvorbu konvexní obálky charakteristiky $g - p_{SG}$ lze schematicky popsat jako napnutí pružného vlákna okolo této charakteristiky. Do vyhodnocení konvexních obálek nebude zahrnuto prvních 150 časových kroků (úplný počátek funkce plátkového

elementu). Tvar konvexní obálky jedné z vypočtených charakteristik ukazuje Obr. 17. Srovnání charakteristik $g - p_{SG}$ (jejich konvexních obálek) při různých předepsaných hodnotách středního subglotického tlaku p_{SGS} je na Obr. 19.



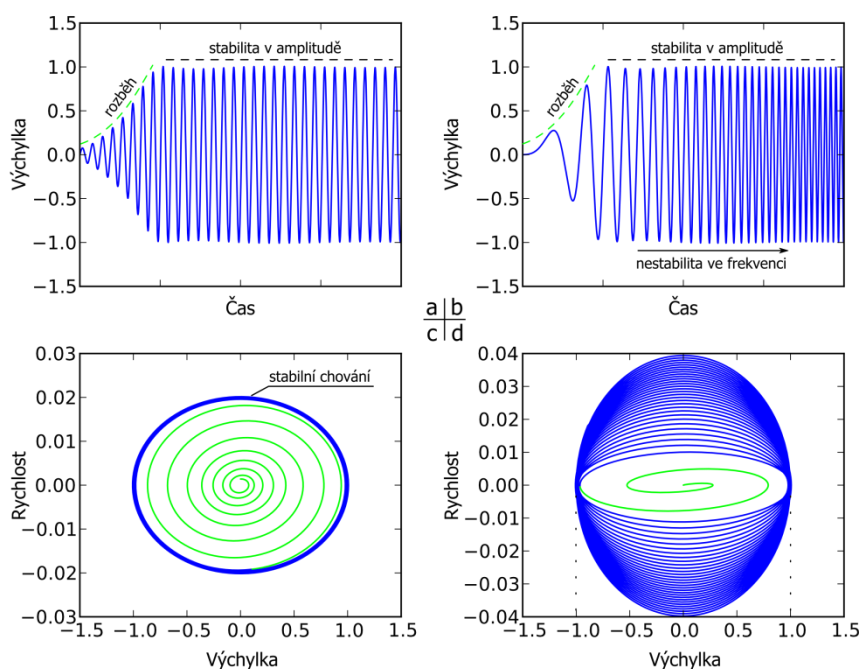
Obr. 18: Vypočtené hodnoty základních frekvencí při různých tlacích p_{SGS}



Obr. 19: Konvexní obálky charakteristik $g - p_{SG}$ pro různé p_{SGS}

Stabilita chování modelu plátkového elementu může být posuzována různými způsoby:

1. Posouzení stability maximálních a minimálních hodnot sledované veličiny v čase. Ve fázi rozběhu funkce tyto hodnoty v čase mění svou velikost, při stabilní funkci je dosahováno přibližně stále stejných hodnot (viz: Obr. 20a). Tímto přístupem není možné vyhodnocovat stabilitu, pokud je signál periodický a v čase se mění jeho perioda (viz: Obr. 20b).
2. V situaci, kdy se perioda mění (viz: Obr. 20b), je vhodné použít zobrazení posuzované veličiny ve fázové rovině [2] $(x(t), \frac{dx(t)}{dt})$; $x(t)$ – posuzovaná veličina, viz: Obr. 20c,d). Zde se změny periody (frekvence) ukáží ve změně rychlosti změn sledované veličiny (viz: Obr. 20d).
3. Z hlediska použité teorie fonace (Teorie bublin tlakového vzduchu) je možné stabilitu posuzovat i podle průběhu charakteristiky $g - p_{SG}$. Pokud se tvar charakteristiky pro různé periody nemění, lze předpokládat, že generovaný signál (zdrojový hlas) bude mít stabilní vlastnosti. Ve stabilní charakteristice $g - p_{SG}$ jsou patrné opakující se smyčky (charakteristika je saturovaná). Tato situace je vidět například u charakteristiky $g - p_{SG}$ na Obr. 17.



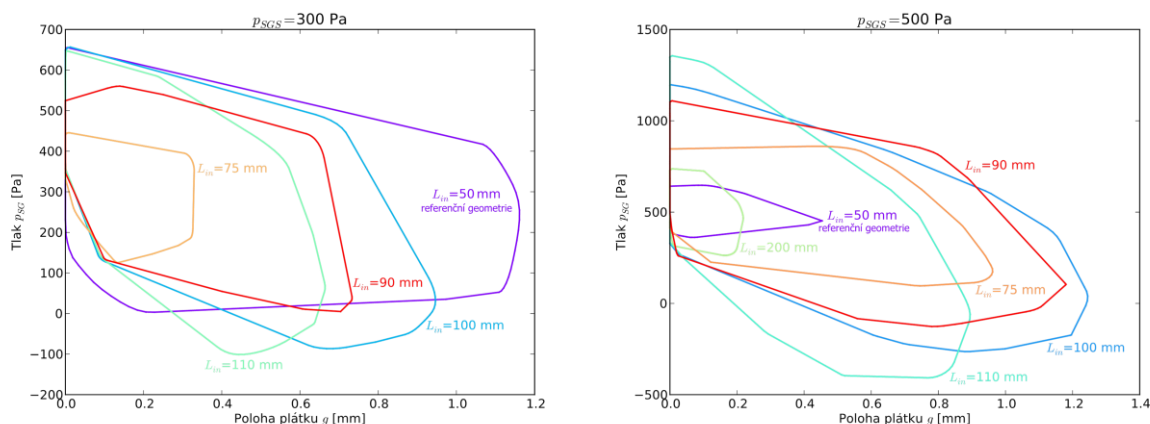
Obr. 20: Usuzování na stabilitu podle velikosti amplitudy a ve fázové rovině (schéma)

K posouzení stability chování jsou využity všechny tři popsané metody.

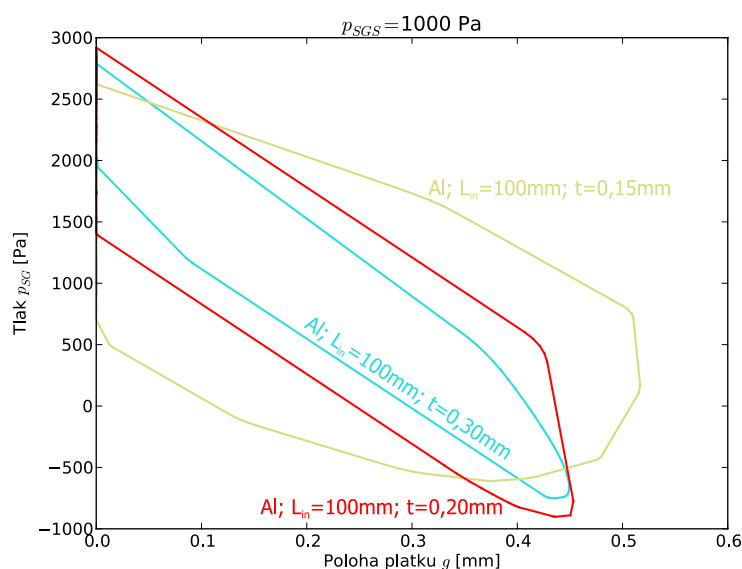
Doposud se jednalo o simulace na výpočtovém modelu s tzv. referenční geometrií. **Vliv některých rozměrů a materiálových charakteristik** je rovněž na výpočtovém modelu zkoumán. Změny se týkají délky subglotické kavity a ohybové tuhosti plátku. Při předepsaných středních subglotických tlacích $p_{SGS} = 300; 500 Pa$ jsou provedeny simulace s měnící se délkou subglotického prostoru L_{in} (viz: Obr. 7). Při tlaku $p_{SGS} = 1000 Pa$ a $L_{in} = 100 mm$ jsou provedeny výpočty při měnících

se ohybových tuhostech plátku. Ohybová tuhost plátku je ovlivněna změnou modulu pružnosti v tahu použitého modelu materiálu a změnami tloušťky plátku.

Všechny tyto vlivy se promítají do tvaru charakteristiky $g - p_{SG}$.



Obr. 21: Vliv délky subglotické kavity na tvar charakteristiky $g - p_{SG}$



Obr. 22: Vliv ohybové tuhosti plátku na tvar charakteristiky $g - p_{SG}$

• Diskuze dosažených výsledků a jejich dopad:

Provedené **experimenty** na modelu plátkového elementu ukazují na vhodnost jeho použití pro generování umělého zdrojového hlasu. Amplitudo-frekvenční spektrum generovaného signálu vykazuje dostatečné množství vyšších harmonických frekvencí. Změny základní frekvence způsobené měnící se délkou supraglotického prostoru jsou znatelné. Nejedná se ale, v žádném případě, o situaci, ke které dochází u některých typů hudebních nástrojů. Nedochází totiž k tomu, že by se základní frekvence plátkového elementu rovnala vlastní frekvenci připojené kavity.

Provedená optická měření polohy plátku a jejich zpracování (viz: Obr. 14, Obr. 15) ukazují, že pohyb plátku při činnosti elementu není pouze prvním vlastním tvarem. Je patrné, že pohyb plátku je složen nejen z tvarů vlastního kmitání, ale je

ovlivňován průběhy tlaků v navazujících prostorech (sub- a supraglotické kavity) a výrazně především kontaktem plátku s dorazem. Tato skutečnost je jednou z příčin, proč charakteristika $g - p_{SG}$ má složitější průběh (viz: Obr. 17) oproti tvaru této charakteristiky u VUT hlasivky [18]. Z videozáznamu pohybu plátku rychlokamerou je také patrná tendence k odskakování plátku od dorazu (podobně jako se ukazuje na výpočtovém modelu).

Přirozenou vlastností plátkového elementu v konfiguraci $- , +$ je, že při překročení určité hodnoty středního subglotického tlaku dochází k trvalému uzavření (dosednutí plátku na doraz). Mezní hodnota středního subglotického tlaku, při kterém již dojde k trvalému uzavření, je závislá především na ohybové tuhosti plátku a částečně i na poloze dorazu.

Vliv parametrů **výpočtového modelu** na jeho chování byl vyhodnocen na základě porovnání charakteristik $g - p_{SG}$. Uvedená charakteristika je důležitá, pokud k popisu tvorby zdrojového hlasu využijeme Teorii bublin tlakového vzduchu [13,17,18]. Zde studovaný plátkový element je možné zařadit do kategorie $(-, +)$. Zdravé lidské hlasivky, stejně jako VUT hlasivku, lze naproti tomu zařadit do kategorie $(+, -)$. Již z rozdílu v tomto zařazení je patrné, že musí existovat i rozdíly v chování mezi zde studovaným plátkovým elementem a zdravými hlasivkami. Tvorba zdrojového hlasu zdravými hlasivkami je popsána v kap. 3.1. Je možné vysledovat základní rozdíly mezi zdravými hlasivkami (popř. VUT hlasivkou) a plátkovým elementem.

Zdravé hlasivky ve fonačním nastavení jsou napnuté a vzájemně přitlačené (v důsledku činnosti hrtanového a hlasivkového svalstva). Naproti tomu plátek plátkového elementu je před začátkem generování zdrojového hlasu nezatížen. Mezi plátkem a dorazem je mezera (g_y). Zvyšování tlaku v subglotickém prostoru vede u hlasivek k jejich otevření (zvětšení mezery glottis) u plátkového elementu k jeho uzavírání. Důležitá u obou způsobu generování zdrojového hlasu je dynamika vzduchu v subglotickém prostoru. Změny tlaku vzduchu v subglotickém prostoru způsobí u zdravých hlasivek jejich opětovné uzavření, u plátkového elementu umožní jeho otevření. Z tohoto popisu vyplývá i jeden důsledek pro charakteristiku $g - p_{SG}$, orientace charakteristiky pro plátkový element je opačná (u zdravých hlasivek při fonaci ve fázi výdechu je orientace vyznačena na Obr. 3).

Vliv hodnoty středního subglotického tlaku na tvar charakteristiky $g - p_{SG}$ (popřípadě její konvexní obálku viz: Obr. 19) lze vyhodnotit následovně. Při středních subglotických tlacích $p_{SGS} = 300; 800 \text{ Pa}$ je vidět výraznější odlišnost sledované charakteristiky oproti charakteristikám s blízkou hodnotou p_{SGS} . Po srovnání tvaru konvexních obálek lze říci, že při nižších středních subglotických tlacích je tvar charakteristiky podlouhlý ve směru osy g . Zvyšováním středního subglotického tlaku se charakteristika ve směru osy g zkracuje a dochází k rozšíření ve směru osy p_{SG} . Pokud odhlédneme od vybočujících případů $p_{SGS} = 300; 800 \text{ Pa}$, postupně se zvyšuje i celkový rozkmit subglotického tlaku p_{SG} . Podobně se zvětšuje

i rozkmit tlaku p_{SG} při kterém je plátek v kontaktu s dorazem ($g = 0\text{mm}$). Charakteristiky se stávají podlouhlé ve směru osy p_{SG} .

Délka subglotické kavity L_{in} má také vliv na charakteristiku $g - p_{SG}$. Obdobně jako v předchozím popsaném případě dochází ke změnám tvaru charakteristiky. Dochází k naladění dynamických charakteristik plátku a vzduchových kavit. Mění se maximální výchylka plátku a rozkmit subglotického tlaku. S těmito změnami také souvisí změna hmotnostního toku vzduchu přes plátkový element. V případech, kde má charakteristika relativně větší plochu, současně roste i hmotnostní průtok vzduchu přes plátkový element.

6 ÚVAHY NAD BUDOUCÍ KONSTRUKCÍ HLASOVÉ NÁHRADY

Konstrukce hlasové náhrady není cílem této práce. Konstrukce a především aplikace této náhrady je provázena řadou biomedicínských a etických problémů. Experimenty s hlasovými náhradami není možné, z etických důvodů, provádět libovolně a vždy by při takovýchto experimentech měl být přítomen lékař. Experimentům *in vivo* by vždy z hlediska bezpečnosti měly předcházet experimenty simulující tyto podmínky. Hlasová náhrada musí spolehlivě fungovat v těchto simulovaných podmínkách a měla by se prokázat dostatečná životnost.

Způsobů použití hlasové náhrady může být více. Jednak se může jednat o protézu pro externí buzení vokálního traktu, jako v případě VUT hlasivky [12]. Je možná i integrace hlasové náhrady do TE ventilu [22]. O obou těchto řešení lze jako zdroj energie použít vzduch z plic.

Při odhlédnutí od etických otázek existuje množství dalších problémů, které je nutné před použitím hlasové náhrady vyřešit. Některé z těchto problémů jsou, nutnost použití biokompatibilních materiálů, životnost použitých materiálů (mechanická a biologická [4,19, 25]), kondenzace vlhkosti vydechovaného vzduchu z plic na površích plátkového elementu a ovlivnění jeho funkce. Biokompatibilita materiálu je podmínkou pro použití hlasové náhrady v těle pacienta. Tvorbu kondenzátů a jejich formování do souvislých vrstev je možné ovlivnit povrchovou úpravou důležitých částí (úprava smáčivosti povrchů). S tvorbou kondenzátních povlaků souvisí i problematika tvorby bakteriálních či mykotických plaků. Vlhké prostředí kondenzátních povlaků je prostředím vhodným pro růst a přemnožení bakterií a jednoduchých hub.

Tvorba lidského hlasu vyžaduje navrhnout konstrukci hlasové náhrady tak, aby se mohly střídát úseky znělé a neznělé.

7 ZÁVĚR

Hledání vhodného principu generování umělého hlasu se vždy skládá z více etap. Je vhodné navázat a inspirovat se tím, jak je hlas tvořen u zdravého člověka. Zásadní je z hlediska fyzikální podstaty tvorby hlasu respektovaná Teorie zdroj-filtr [5]. Díky této teorii je možné na akustickou část tvorby jednotlivých menších částí

hlasového projevu pohlížet jako na filtrování hlasivkami vytvořeného zdrojového hlasu (v případě znělých samohlásek).

Na pracovišti ÚMTMB FSI VUT Brno v minulosti vzniklo několik návrhů a experimentálních modelů umělých hlasivek založených na Teorii bublin tlakového vzduchu. Jedná se o typy, které jsou také součástí patentovaného zařízení k externímu buzení vokálního traktu (všechny v konfiguraci +,- dle [7]). Pro pokračování ve zkoumání tvorby zdrojového hlasu byl vybrán plátkový element (v konfiguraci -,+).

Základní věc požadovaná po generovaném akustickém signálu, pokud má být použitý jako zdrojový hlas, je složení jeho amplitudo-frekvenčního spektra. Tento požadavek plátkový element splňuje. Výpočtový model vykazuje vyšší hodnoty základních frekvencí generovaného signálu. Některé z hodnot základních frekvencí dosahovaných na výpočtovém modelu by nebyly vhodné pro vybudění hlásek (příliš vysoká základní frekvence). Experimentální model ukazuje vhodné složení amplitudo-frekvenčního spektra generovaného signálu. Schopnost vybudit vlastní tvary připojených supraglotických kavit je experimentálně ověřena.

Větší potenciál v dalším zkoumání vidím ve studiu experimentálních modelů a vytváření podmínek blízkým podmínkám, při kterých by byl plátkový element použitý jako umělá hlasivka. Vyřešení problémů (materiálových, výrobních, ...) na experimentálních modelech umožní případnou rychlejší výrobu skutečné umělé hlasivky pro *in vivo* testy. Tohle testování je ovšem nemyslitelné bez účasti lékařů v řešitelském týmu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1]	Adrian, R.J.: <i>Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics</i> . Annual review of fluid mechanics, 1991, Vol. 23, p. 261-304
[2]	Brepta, R.; Půst, L.; Turek, F.: <i>Mechanické kmitání – technický průvodce 71</i> , Sobotáles, Praha, 1994
[3]	Brown, D.H., Hilgers, F.J.; Irish, J.C.; Balm, A.J.: Postlaryngectomy voice rehabilitation: state of the art at the millennium, <i>World J Surg.</i> , 2003, Vol 27, p.824-831
[4]	Everaert, E.P.; Mahieu, H.F.: A new method for in vivo evaluation of biofilms on surface-modified silicone rubber voice prostheses, <i>Eur. Arch. Otolaryngology</i> , 1997, Vol. 254, p. 261-263
[5]	Fant, G.: <i>Acoustic theory of speech production</i> . 2nd edition, Hague, 1960
[6]	Fant, G.; Liljencrants, J.; Lin, Q.: <i>A four-parameter model of glottal flow</i> , Speech Transmission Laboratory-Quarterly Progress and Status Reports (STL-QPSR), 1985, Vol. 26, p. 1-13
[7]	Fletcher, N.H.: <i>Autonomous vibration of simple pressure-controlled valves in gas flows</i> , <i>Journal of the Acoustical Society of America</i> , 1978, Vol. 63, p. 1559-1565
[8]	Helmholtz, H.L.F.; Ellis, A.J.: <i>On the sensation of tone as a physiological basis for theory of music</i> , 3. Vydání, 1895, Longmans Green, Londýn-New York
[9]	LEJSKA, M.: <i>Poruchy verbální komunikace a foniatrie</i> , Brno, 2003
[10]	Mišun, V., a kolektiv: <i>Charakteristiky umělých hlasivek</i> , Interakce a zpětné vazby, Praha, 2004
[11]	Mišun, V.: <i>Definition of the vocal folds function model</i> , Interakce a zpětné vazby, Praha, 2001
[12]	Mišun, V.: Equipment for source voice generation PCT/CZ2004/000041, World intellectual patent

	organisation, 2004, Ženeva, Švýcarsko
[13]	Mišun, V.: <i>New principle of the vocal folds function</i> , Proc. Inter. Conf. Advances in quantitative laryngology and speech research, Hamburg, Germany, 2003
[14]	Mišun, V.: <i>Tajemství lidského hlasu</i> , VUTIUM Brno, Brno, 2010
[15]	Mišun, V.: <i>Vocal folds function modelling by means of the principle of compressed air bubble</i> , Proc. of ICVPB, Denver, USA, 2002
[16]	Mišun, V.; Dohnal, P.; Hruža, V.; Janovský, P.; Švancara, P.; Valenta, J.; Urban, F.: <i>Experimentální analýza umělých hlasivek</i> , Proc. of International acoustic conference, Kočovce, Slovenská republika, 2004
[17]	Mišun, V.; Přikryl, K.: <i>The source voice generation on the basis of the „compressed air bubble“ principle</i> , International conference on voice physiology and biomechanics, Marseille, France, 2004
[18]	Mišun, V.; Švancara, P.; Vašek, M.: <i>Experimental analysis of the characteristics of artificial vocal folds</i> , Journal of voice, 2011, Vol. 25, p. 308-318
[19]	Neu, T.R.; Van der Mei, H.C.; Busscher, H.J.; Dijk, F.; Verkerke, G.J.: <i>Biodeterioration of medical-grade silicone rubber used for voice prostheses: a SEM study</i> , Biomaterials, 1993, Vol. 14, p. 459-464
[20]	Palková, Z.: <i>Fonetika a fonologie češtiny s obecným úvodem do problematiky oboru</i> , 1.vyd., Karolinum, Praha, 1994
[21]	Petr, J.: <i>Mluvnice češtiny: vysokoškolácká učebnice pro studenty filoz.a pedagog.fak.stud.oboru č.73-21-8 a č.76-12-8 aprobace český jazyk</i> , 1.vyd., Academia, Praha, 1986
[22]	Plaats, A.; Schutte, H.K.; van der Eerden, F.J.M.; de Vries, M.P.; Mahieu, H.F.; Verkerke, G.J.: <i>An In-vitro Test Set-Up for Evaluation of a Voice-Producing Element Under Physiologic Acoustic Conditions</i> , Annals of Biomedical Engineering, 2006, Vol. 34, p. 893-900
[23]	Rothenberg, M.: <i>Acoustic interaction between the glottal source and the vocal tract</i> , Vocal fold physiology, 1980, U. of Tokyo Press, p. 305-328
[24]	Settles, G.S.: <i>Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media</i> , Springer, 2001
[25]	The Netherlands Cancer Institute, Netherlands, http://www.provoxweb.info
[26]	van den Berg, J.: <i>Myoelastic-Aerodynamic theory of voice production</i> , Journal of speech and hearing research, 1958, Vol. 1, p. 227-224
[27]	Vašek, M.; Mišun, V.: <i>Interakce jazyčkového elementu a navazujících kavit</i> , In Interakce a zpětné vazby, Praha, Česká republika, 2007

SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ A VYTVOŘENÝCH INŽENÝRSKÝCH DĚL

Mišun, V.; Švancara, P.; Vašek, M.: <i>Experimental analysis of the characteristics of artificial vocal folds</i> , Journal of voice, 2011, Vol. 25, p. 308-318, (IF=1,39).
Vašek, M.; Mišun, V.: <i>Interakce jazyčkového elementu a navazujících kavit</i> , In Interakce a zpětné vazby, Praha, Česká republika, 2007
Vašek, M.; Mišun, V.: <i>Experimentální ověření spektrálních vlastností umělých vokálních traktů</i> . In Zborník referátov z XIII. medzinarodného akustického seminára. Kočovce, 2008, p. 117-120.
Matug, M.; Vašek, M.; Mišun, V.; Navrátil, P.; Řehák, K.; Civín, A.: <i>Computational model of voice producing element in terms of varying inlet pressure</i> . In 13th Conference Applied mechanics 2011, Velké Bílovice. 2011, p. 143-146.
Matug, M.; Vašek, M.; Mišun, V.; Navrátil, P.; Civín, A.; Řehák, K. <i>Analysis of influence of vocal fold - vocal tract models connection by using FEM</i> . In Engineering Mechanics 2011, 17th International Conference. Prague, 2011, p. 391-394.
Vašek, M.: <i>Plátkový element</i> ; Plátkový element - generátor zdrojového hlasu. A2/ 714. (funkční vzorek – v rámci projektu FSI-S-10-52 – Komplexní řešení vybraných problémů biomechaniky člověka)
Vašek, M.; Matug, M.; Mišun, V.: <i>Laditelný vokální trakt</i> ; Laditelný model vokálního traktu. A2/ 608. (funkční vzorek – v rámci projektu FSI-S-10-52 – Komplexní řešení vybraných problémů biomechaniky člověka)
Matug, M.; Vašek, M.; Mišun, V.: <i>Držák kavit</i> ; Univerzální držák kavit. A2/ 608. (funkční vzorek – v rámci projektu FSI-S-10-52 – Komplexní řešení vybraných problémů biomechaniky člověka)

ŽIVOTOPIS AUTORA

Martin Vašek

Narozen: 17. 5. 1982 v Brně

Národnost: česká

Vzdělání:

2006–dosud: doktorské studium; Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství; obor Inženýrská mechanika

2001–2006: magisterské studium; Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství; obor Aplikovaná mechanika; diplomová práce: Návrh, tuhostní a pevnostní posouzení svařence přidržovacího beranu lisu CTM400

1997–2001: Střední průmyslová škola strojnická Brno, Sokolská 1, obor: Strojírenství

Pracovní zkušenosti:

2011–dosud: Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o.; výzkumný pracovník

2000–2010: KIP Brno, spol. s r.o.; konstrukce manipulačních zařízení, tvorba výkresové dokumentace; (dohoda o provedení práce)

ABSTRAKT

Práce se zabývá prověřením funkce jednoho z vybraných principů tvorby zdrojového hlasu. Z různých principů byl vybrán plátkový element v konfiguraci -,+.

Chování plátkového elementu je studováno na experimentálním a výpočtovém modelu. Konstrukční návrh experimentálního modelu vychází ze zkušeností z měření na jednoduchých modelech plátkových elementů prováděných v počátcích studia. Měření prováděná na experimentálním modelu jsou především akustická měření generovaného signálu, ale jsou umožněna i optická měření polohy plátku.

Princip fungování plátkového elementu vyžaduje ve výpočtovém modelu zohlednění interakce mezi plátkem a proudícím vzduchem. Je použitý obousměrný model interakce mezi fyzikálním prostředím vzduchu a plátkem. Každé z fyzikálních prostředí je řešeno na samostatném výpočtovém modelu. Interakce je řešena po částech.

Prováděné výpočty a experimenty jsou zaměřeny na chování plátkového elementu v podmínkách měnících se vstupních parametrů (střední subglotický tlak, délky navazujících kavit, geometrie a materiál plátku).

Problematika budoucí konstrukce hlasové náhrady a její úskalí jsou také diskutovány.

ABSTRACT

This work focuses on verification of the function of a chosen principle of source voice generation - the reed-based element in configuration -,+.

Both experimental and computational models are used to study the behaviour of the reed-based element. The design of the experimental model is based on the preliminary experiments with simple reed-based elements, which were carried out at the beginning of my studies. The measurements carried out on the experimental model are mainly acoustical (measurements of the generated acoustical signal), but optical measurements of the reed's movement and position are possible and used as well.

Because of the nature of the reed-based element's behavior, the fluid structure interaction must be taken into consideration in the computational model. A two-way model of fluid structure interaction is used between the fluid part of the computational model and the structural one. A partitioned solution is used to solve the fluid-structure interaction.

The simulations (computational and experimental) are focused on describing the behavior of the reed-based element in changing conditions of variable input parameters (the mean value of the subglottal pressure, the lengths of attached cavities, the geometry and the material of the "reed").

The design of a voice prosthesis is discussed as well. Some specific issues, which need to be solved when designing a voice prosthesis, are highlighted.