eské vysoké u ení v Praze, Fakulta strojní

Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Doc., Dr., Ing. Tomá-Vampola

Aplikovaná akustika Applied Acoustics

### Summary

The lecture is divided into two parts. In the first part is discussed the using of the acoustic energy in solving the problem of engineering practice. The presented solutions were motivated by the need of the industrial partner to increase the efficiency of energy devices and design methodology by which the design of acoustic-structural system can be optimized to increase their effectiveness using the acoustic energy. The effectiveness of energy devices, based on the principle of the heat transfer from the hot gas flowing through the exchanger tube sheet is negatively influenced by the amount of volatile dirt in the gas. These ash particles are settled or smelted on the tube sheet and prevent heat transfer to warmed media. The possible technical solution of this problem is to use the acoustic energy to remove these ash particles. In the lecture is demonstrated how to design solutions to remove the ash deposits from the tube sheet of the energy devices using acoustic energy, which was successfully implemented in the industrial practice. In the next part is then summarized how to use acoustic energy to improve the flow of bulk materials in silos. On the basis of the proposed methodology for the optimal design of acoustic power generator was developed the simulation calculation tool enabling easy evaluation of the acoustic pressure fields in confined spaces. This computational tool has been used with success to optimize power transfer in heterogeneous environments, where the speed of sound waves has different values. Findings were first analyzed on a simplified experimental device and later successfully used in industrial practice.

The second part of the lecture is devoted to the results obtained in the field of basic research of creation and production of the human voice. Analysis of the generation sound by the human vocal fold, its spreading by the vocal tract, soft tissues, and bones of human head to perceptions of sound by brain centers represents a very complex problem. The defect of any of the elements of the transport system has resulted in the failure of human perception of sound and own voice speech. Therefore, it is necessary to pay due attention to the analysis of real sound propagation paths and their vibroacoustic characteristics. The findings can be used in clinical practice and will allow better understanding of the basic principles of human phonation and provide the scientific basis for subsequent development of individual voice prosthesis for patients after laryngectomy, or provide a valuable set of information for the selection of the optimal methods of treatment.

## Souhrn

P edná-ka je len na do dvou celk . V prvém celku je pojednáváno o vyuflití akustické energie p i e-ení problému technické praxe. Uvedené postupy byly motivovány pot ebou pr myslového partnera zvý-it efektivnost energetických za ízení a navrhnout metodiku, podle které lze optimalizovat konstruk ní uspo ádání akusticko-strukturní soustavy za ú elem vyuflití akustické energie pro zvý-ení ú innosti t chto za ízení. Ú innost energetických za ízení zaloflených na principu p estupu tepla z proudících spalin do trubkovnic vým níku je negativn ovlivn na mnoflstvím polétavých ne istot ve spalinách. Tyto ne istoty se usazují, i natavují na t lesa trubkovnic a zabra ují p estupu tepla do oh ívaného média. Jedno z moflných technických e-ení daného problému spo ívá v aplikaci akustické energie pro odstra ování t chto ne istot. V p edná-ce je nazna en postup návrhu e-ení odstra ování usazenin z trubkovnic energetických za ízení pomocí akustické energie, který byl úsp -n realizován v pr myslové praxi. Dále jsou pak shrnuty postupy vyuflití akustické energie pro zlep-ení toku sypkých hmot v zásobnících. Na základ navrflené metodiky optimálního návrhu generátoru akustické energie byl vyvinut simula ní výpo tový nástroj, umofl ující snadné ohodnocení vlivu akustické energie na vývin tlakových polí v uzav ených prostorech. Tohoto nástroje bylo s úsp chem vyuflito k optimalizaci p enos energie v heterogenních prost edích, kde rychlost zvukové vlny dosahuje rozdílných hodnot. Poznatky byly nejprve analyzovány na zjednodu-eném experimentálním za ízení a posléze úsp -n vyuflity v pr myslové praxi.

Druhá ást p edná-ky je v nována výsledk m získaným v oblasti základního výzkumu tvorby a produkce lidského hlasu. Analýza generace zvuku hlasivkami a jeho -í ení vokálním traktem, lebe ními kostmi, m kkými tkán mi lidské hlavy afl k percepci zvuku p íslu-nými mozkovými centry p edstavuje velmi sloflitý komplexní problém. Defekt n kterého z prvk p enosového systému má za následek poruchy vnímání zvuku lov kem a tím i vlastního hlasového projevu. Proto je nutné v novat náleflitou pozornost analýze reálných cest -í ení zvuku a jejich vibro-akustických charakteristik. Získané poznatky mohou být vyuflity v klinické praxi a umoflní lépe porozum t základním princip m fonace lov ka a poskytnou v decký základ pro následný vývoj individuálních hlasových náhrad pro pacienty po laryngektomii, i poskytnout cenný soubor informací pro volbu optimální metody lé by.

Klí ová slova:

akustická energie, generátor akustické energie, i-t ní kotl, zvukovod, tok sypkých hmot, biomechanika hlasu, formanty, vokální trakt lov ka, numerická simulace fonace, simulace kmit lidské hlasivky, samobuzené kmity

Keywords:

acoustic energy, generator of acoustic energy, boiler cleaning, speaking tube, flow of bulk materials, biomechanice of voice, acoustic of the human vocal tract, numerical simulation of phonation, simulation of vibration of the human vocal fold, self-excited vibration

# Obsah:

Summaryí í í í í í í í í í í í í í í í í í í	2
Souhrní í í í í í í í í í í í í í í í í í í	3
Klíová slovaí í í í í í í í í í í í í í í í í í í	4
Obsahí í í í í í í í í í í í í í í í í í í	5
1. Úvodí í í í í í í í í í í í í í í í í í í	6
<ol><li>Vyuflití akustické energie pro zvý-ení ú innosti</li></ol>	
energetických za ízeníí í í í í í í í í í í í í í í í í	6
2.1 Strukturní ástí í í í í í í í í í í í í í í í í	7
2.2 Vliv okrajových podmínek strukturní ástií í í í í	8
2.3 Akustická kavitaí í í í í í í í í í í í í í í í í í	9
2.4 Akustickým niííííííííííííííííííííí	10
2.5 Analytické e-ení vlnové rovnice pro kónický zvukovod.	10
2.6 Volba polohy akustického m ni eí í í í í í í í í í .	12
2.7Aplikaceí í í í í í í í í í í í í í í í í í í	13
3. Vyuflití akustické energie pro zvý-ení toku sypkých hmot	
vzásobnícíchí í í í í í í í í í í í í í í í í í	14
3.1 Experimentální modelí í í í í í í í í í í í í í	14
3.2 Akustické vlastnosti porézních látekí í í í í í í í í	15
3.3 Metoda p enosových maticí í í í í í í í í í í í	16
3.4 P enos energieí í í í í í í í í í í í í í í í í	17
3.5 Výpo etnínástrojí í í í í í í í í í í í í í í í í	18
4. Tvorba a produkce lidského hlasuí í í í í í í í í í í í í .	19
4.1 Vliv piriformních sin a valecul na kvalitu hlasového	
projevuí í í í í í í í í í í í í í í í í í í	20
4.2 Zjednodu-ený výpo tový modelí í í í í í í í í í	22
4.3 Lad nízjednodu-eného modeluí í í í í í í í í í	22
4.4 Analytické odvození polohy antirezonancí ve	
frekven ním spektru hlasuí í í í í í í í í í í í í í	23
4.5 Numerická simulace fonaceí í í í í í í í í í í í	24
5. Vývoj um lé hlasivkyí í .í í í í í í í í í í í í í	26
5.1 Geometrická konfigurace modelu lidských hlasivekí í .	27
5.2 Numerická simulace kmit hlasivekí í í í í í í í	28
6. Závrííííííííííííííííííííííííííííííííííí	29
Literaturaí í í í í í í í í í í í í í í í í í í	30
Odborný flivotopisí í í í í í í í í í í í í í í í í í í	32

# 1. Úvod

P i vývoji a návrhu e-ení problém technické praxe je v sou asné dob k dispozici stále se roz-i ující mnoflství efektivních prost edk simulace, virtuálního modelování a optimalizace. Zdokonalené prost edky analýzy a syntézy jsou konfrontovány s roz-i ujícím se prostorem myslitelných e-ení s vyuflitím netradi ních koncept i vyuflitím nových materiál. Tato situace vyfladuje vývoj nových metodik návrh e-ení problém , jak aplikovaného, tak i základního výzkumu.

P edkládaná p edná-ka shrnuje postupy vyufití akustické energie p i e-ení problém technické praxe a výsledk m, získaným v oblasti základního výzkumu tvorby a produkce lidského hlasu, které jsou nezbytným krokem pro získání poznatk umofl ující lépe porozum t základním princip m fonace lov ka a poskytnou v decký základ pro následný vývoj hlasových náhrad pro pacienty po laryngektomii. Uvedené postupy byly vyvíjeny a zobec ovány p i e-ení ady výzkumných a aplika ních projekt na Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Fakulty strojní VUT v Praze. V p edná-ce jsou uvedeny postupy a poznatky, které byly s úsp chem aplikovány v pr myslové praxi, i konfrontovány recenznímu ízením v renomovaných zahrani ních asopisech.

# 2. Vyuflití akustické energie pro zvý-ení ú innosti energetických za ízení

Ú innost energetických za ízení zaloflených na principu p estupu tepla z proudících spalin do trubkovnic vým níku je negativn ovlivn na mnoflstvím polétavých ne istot ve spalinách. Tyto ne istoty se usazují, i natavují na t lesa trubkovnic a ú inn zabra ují p estupu tepla do oh ívaného média. Jedno z moflných technických e-ení daného problému spo ívá v aplikaci akustického m ni e, produkujícího akustickou energii. Princip vyuflití akustické energie pro odstra ování ne istot byl zkoumán od po átku minulého století [1,2]. e-ení problému interakce akustickostrukturní soustavy za zvý-ené teploty je zna n komplexní problém, který je ovliv ován adou faktor obtífln zahrnutelných do matematického modelu. V p ísp vku je nazna en jeden z moflných zp sob e-ení tohoto problému na základ zjednodu-ujících p edpoklad . Sestavený matematický aplikován na e-ení problém technické praxe. model byl úsp –n Zku-enosti provozovatel akustických m ni potvrzují, fle lze vyuflít akustickou energie pro i-t ní trubkovnic vým ník a tato technologie p iná-í znatelný ekonomický efekt provozovatel m energetických za ízení.

Postup je zaloflen na návrhu akustického m ni e, jehofl budicí frekvence je lad na ve shod s vybranou frekvencí strukturní ásti e-eného systému, která je v souladu s frekvencí akustické kavity.

# 2.1 Strukturní ást

Nezbytným p edpokladem úsp –ného vyufití akustické energie pro odstra ování ne istot z trubkovnic vým níku definovaného akustického prostoru je zji-t ní vlastností analyzované strukturn -akustické soustavy. Strukturní ást bývá sloflena z ady m kce uloflených trubek, kterými proudí oh ívané médium. Pro zji-t ní základních vibra ních charakteristik vým níku lze vyuflít bu experimentálního, i analytického p ístupu.

# a) Experimentální p ístup

Pro zji-t ní základních dynamických vlastností analyzované soustavy lze pouflít metodu experimentální modální analýzy, která na základ vybuzených kmit vyhodnotí nejen vlastní frekvence systému, ale i jeho útlumové charakteristiky. Z po ízených experimentálních dat lze vyhodnotit vhodné frekven ní intervaly, na které by akustický m ni m l být lad n. S ohledem na charakter deformací, by m ly být vybírány vy—í frekven ní intervaly, kde v d sledku vy—ího tlumení nehrozí vybuzení nep ípustných hodnot napjatostí.

# b) Analytický pístup

Nelze-li provést experimentální m ení na analyzované soustav , lze v prvotním p iblíflení vy-et it pot ebné charakteristiky simula n , nap . pomocí metody MKP. Tento p ístup není schopen predikovat korektní útlumové charakteristiky a p i výpo tu panuje jistá míra nejistoty v definici okrajových podmínek. Pro vy—í vlastní tvary, v-ak neznalost korektních okrajových podmínek nehraje podstatnou roli.



**Obr. 1** EMA ó modální kladívko.

## 2.2 Vliv okrajových podmínek strukturní ásti

Pro vy-et ení vlivu okrajových podmínek na hodnoty vlastních frekvencí budeme trubkovnici vým níku modelovat v prvním p iblíflení jako 1D kontinuum pro n fl lze p edpokládat, fle akustická vlna vybudí jeho ohybové kmity.



**Obr. 2** Zjednodu-ený výpo tový model. a) vetknutý nosník, b) vetknutý nosník prufln podep ený

Za p edpokladu zanedbání tlumení, rota ní setrva nosti a vn j-ího zatíflení, lze dynamické chování nosník dle Obr. 2a popsat vlnovou rovnicí popisující jeho ohybové kmity [3]

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{EJ}{\rho A} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0.$$
 (1)

Pro ustálený stav ohybových kmit , lze z rovnice (1) metodou separace prom nných odvodit nelineární frekven ní rovnici. Pro model dle Obr. 2a ve tvaru

$$\cos(\alpha L)\cosh(\alpha L) + 1 = 0.$$
<sup>(2)</sup>

Pro obecn j-í p ípad uloflení soustavy dle Obr. 2b dostáváme frekven ní rovnici ve tvaru

$$sinh(\alpha L)cos(\alpha L) - cosh(\alpha L)sin(\alpha L) =$$
  
EJ(kL<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>[1+cosh(\alpha L)cos(\alpha L)], (3)

kde  $\alpha = \sqrt[4]{\Omega^2 \rho A(EJ)^{-1}}$ , konstanty hustoty materiálu , pr ezu A, modulu prufinosti E a kvadratického momentu plochy J jsou poplatné pr m ru trubky a jejího materiálu. L je délka uvaflovaného nosníku.

Ze vztah (2 a 3) je z ejmé, fle modální charakteristiky strukturní ásti modelu jsou funkcí materiálových parametr analyzované soustavy. V p ípad pouflití akustického m ni e p i vy—ích teplotách je nezbytné zavést korek ní sou initel modulu prufinosti, který za íná být významný pro teplotní rozsah nad 400 °C [4].

e-ení vynucených kmit strukturní ásti analyzované soustavy lze hledat ve tvaru lineární kombinace normovaných vlastních tvar kmit a za

p edpokladu, fle budící ú inek je funkcí i vy—ích harmonických sloflek, lze výsledné e-ení nalézt ve tvaru superposice jednotlivých budicích ú ink

$$y(x,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi_n^*(x)}{\Omega_{0n}^2 - (m\omega)^2} \frac{1}{\rho A} \int_{x=0}^{L} \varphi_n^*(x) f(x) dx \right] \sin(m\omega t).$$
(4)

Ze vztahu (4) je patrné, fle pro systém buzený harmonickou silou bude ve výsledné odezv systému zastoupena celá ada vlastních tvar kmit . Pro tlumený systém dojde ke sníflení jednotlivých amplitud a mírnému p elad ní vlastních frekvencí.

### 2.3 Akustická kavita

Vy-et ení základních modálních charakteristik akustické kavity bylo provedeno pomocí metody MKP. Ve výpo tu nebyla uvaflována odrazivost hrani ních ploch analyzovaného systému a ani útlumový mechanismus v samotné tekutin . Zm na rychlosti a hustoty zvuku byla uvaflována teplotn závislá. S ohledem na frekven ní hustotu vlastních tvar kmit akustické kavity je patrné, fle i kdyfl budeme budit akustický prostor harmonickou funkcí o definované frekvenci, dojde k vybuzení celé ady vlastních tvar kmit .



Obr. 3 Hustota vlastních tvar kmitu akustické kavity.

#### 2.4 Akustický m ni

Na základ vypo tených frekven ních charakteristik akustické a strukturní ásti analyzované soustavy lze vybrat vhodné frekven ní rozsahy, na které by m l být akustický m ni lad n. Za ízení se skládá z t lesa m ni e, kde je ustáleným proudem vzduchu rozkmitávaná tenká titanová membrána generující zvukové vlny, které se pomocí zvukovodu –í í do dané technologie. Vlnovou rovnici umofl ující e–it tlaková pole ve zvukovodech lze v prvním p iblíflení odvodit pro 1D model, který v dostate né p esnosti vystihuje chování akustických soustav pro nifl–í hodnoty budicích frekvencí. Vlnovou rovnici, lze odvodit z rovnice kontinuity a Eulerovy rovnice ve tvaru

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \left[ 1 - \frac{v_0^2}{c_0^2} \right] = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + 2 \frac{v}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t} \,. \tag{5}$$

Kde  $c_0$  je rychlost zvuku,  $v_0$  je rychlost ustáleného toku akustického media a p je akustický tlak. Za p edpokladu, fle Machovo íslo  $M^2 = v_0^2 c_0^{-2} << 1$ , lze zanedbat vliv ustáleného toku akustického média.

#### 2.5 Analytické e-ení vlnové rovnice pro kónický zvukovod

Tlakové pole v kónickém zvukovodu lze popsat rovnicí

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} + \frac{1}{S(x)} \frac{\partial S(x)}{\partial x} \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2}, \qquad (6)$$

kde S(x) je prom nný pr ez zvukovodu. Jedná se o tzv. Besselovu diferenciální rovnici, jejímfl e-ením získáme asov a prostorov prom nné tlakové pole ve tvaru

$$p(x,t) = \frac{1}{x} \left( \ddot{C}_1 e^{-j\vartheta x} + \ddot{C}_2 e^{j\vartheta x} \right) e^{j\omega t}, \qquad (7)$$

kde  $\mathcal{G} = \sqrt{k^2 - j\beta k}$  je komplexní vlnové íslo a je bezrozm rový initel vyjad ující vliv tlumení v akustické tekutin . Jeho hodnoty se m ní v intervalu 0 afl 1. Neznámé komplexní integra ní konstanty,  $\ddot{C}_1, \ddot{C}_2$  lze vyjád it z okrajových podmínek e-ené soustavy, je budicí kruhová frekvence systému a  $k = \omega c_0^{-1}$  je vlnové íslo. Jediný mechanismus disipace akustické energie, který je nutný uvaflovat p i analýze akustických zvukovod je vyza ovací akustická impedance, kterou lze modelovat reakcí prost edí nad pístov kmitající kruhovou deskou v nekone né st n [5]. Pro tento model disipace akustické energie, lze odvodit výraz pro akustickou vyza ovací impedanci ve tvaru

$$Z_{a} = \frac{c_{0}\rho_{0}}{S} \left(A + iB\right), A = 1 - \frac{J_{1}(2kR)}{kR}, B = \frac{H_{1}(2kR)}{kR},$$
(8)

kde funkce  $J_1$  a  $H_1$  lze vyjád it pomocí ad [6]

$$J_{1}(2kR) = \left(\frac{2kR}{2}\right) \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m}}{m!(m+1)!} \left(\frac{2kR}{2}\right)^{2m},$$

$$H_{1}(2kR) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m}}{\Gamma\left(m+\frac{3}{2}\right)\Gamma\left(m+\frac{3}{2}+1\right)} \left(\frac{2kR}{2}\right)^{2m+2}.$$
(9)

Ve vztahu (9) odpovídá reálná ást vyza ovacímu odporu a ást imaginární p ipadá na fiktivní hmotu spolu-kmitající se zvukovodem.

Zm nou délky zvukovodu, je moflné provést jeho lad ní na pofladovanou frekvenci. Vliv délky zvukovodu a teploty prost edí na vlastní kruhové frekvence zvukovodu jsou patrné z Obr. 4. Pro vy–et ení závislostí byla vyuflita rovnice (7), která formou okrajových podmínek zohled uje vliv disipace energie vyza ováním do okolního prost edí (rovnice 8).



Obr. 4 Závislost frekvence zvukovodu na délce a teplot .

## 2.6 Volba polohy akustického m ni e

Pro nalezení vhodné polohy akustického m ni e v akustické kavit vyjdeme z p edpokladu bodového zdroje akustické energie –í ící se do neomezeného prost edí. Tento p edpoklad je v reálné konstrukci zachován pouze p i vývinu tlakových polí, kdy nedochází ke zp tnému odrazu akustických vln, nicmén s ohledem na pracovní reflim akustického m ni e lze pro prvotní výpo et tento p edpoklad akceptovat.

K popisu –í ení akustické energie v neomezeném prost edí vyjdeme z vlnové rovnice transformované do sférických sou adnic [5]. Pro úhlov symetrickou úlohu, pro rozbíhavou vlnu, postupující od zdroje (neuvaflujeme zp tnou vlnu po odrazu) je výsledné tlakové pole

$$p(r,t) = \frac{\ddot{C}_1}{r} e^{-jkr} T(t) .$$
 (10)

Za p edpokladu harmonické asové funkce a s vyuflitím pohybové rovnice lze rychlostní pole odvodit ve tvaru

$$v(r,t) = \frac{\ddot{C}_1}{j\omega r} e^{-jkr} \left(\frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2}\right) T(t).$$
(11)

Pro popis toku akustické energie definovanou akustickou kavitou pouflijeme vektor komplexní intenzity [7]

$$\ddot{\vec{I}}_c = \frac{1}{2} \ddot{P} \operatorname{conj}(\ddot{\vec{V}}), \qquad (12)$$

který vyjad uje pr m rnou (stacionární) hodnotu toku energie (pr m rný sm r a pr m rná amplituda) vztaflenou k dob jedné periody. Prom nnou (nestacionární) intenzitu lze definovat ve tvaru

$$\vec{I}(r,t) = \operatorname{Re}(\vec{p}) \operatorname{Re}(\vec{v}).$$
(13)

D sledným dosazením do vztahu 13 dostáváme

$$\vec{I}(r,t) = \sum_{i=1}^{N} -\frac{C_{i}^{2}}{\omega_{i}\rho_{i}} \frac{\vec{r}_{i}}{r_{i}^{4}} (-k_{i}r_{i}\cos^{2}(\beta_{i}) + \cos(\beta_{i})\sin(\beta_{i})) + \\ +\sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} -\frac{C_{n}C_{m}}{\omega_{m}\rho_{m}} \frac{\vec{r}_{m}}{r_{m}^{3}r_{n}} (-k_{m}r_{m}\cos(\beta_{n})\cos(\beta_{m}) + \cos(\beta_{n})\sin(\beta_{m}))$$
(14)

kde  $\beta_i = k_i r_i - (\omega_i t + \varphi_i)$  je pomocná prom nná zohled ující fázové zpofkl ní jednotlivých budi ,  $r_i$  je vzdálenost od *i-tého* zvukového zdroje,  $C_i$  je tlaková amplituda *i-tého* zvukového zdroje. Defini ních vztah (12 afl 14), lze pouflít pro nalezení vhodné konfigurace polohy akustických m ni . Pro zesílení ú ink akustických m ni lze vyuflít princip pozitivní

interference vln ní, kdy volíme umíst ní, kde chceme získat maximální zesílení tlakového pole.



Obr.5a Akustická intenzita.



Obr.5b Tlakové pole.

Pro nalezení polohy budi je nutné e-it soustavu nadbyte ných rovnic optimaliza ní metodou. Na Obr. 5a je uvedena akustická intenzita (sou in tlaku a rychlosti) pro 2 zdroje akustické energie a na Obr. 5b je uveden vývin tlakového pole. K ivky zobrazuji tok energie systémem. ervené k ivky zobrazují aktivní sloflku (reálná ást výrazu 12) komplexní akustické impedance, která je kolmá na plochy konstantní fáze (je kolmá na vlnoplochy), zelené k ivky zobrazují reaktivní sloflku (imaginární ást výrazu 12) komplexní akustické impedance, která popisuje pr m rovaný tok energie z míst maximální energie do míst minimální energie a modré k ivky zobrazují okamflitou intenzitu zvukového pole (rovnice 14). Fialové kruflnice zobrazují polohu zdroj a p lkruflnice zobrazují definici blízkého akustického pole.

#### 2.7 Aplikace

Na základ uvedených postup bylo úsp -n navrfleno technické e-ení problému odstra ování ne istot z trubkovnic vým níku ve spole nosti Tepláre Ko-ice a.s. ve výstupní ásti vstupního p eh íva e kotle PK3 a PK4, dále pak ve Zvolenské teplárenské, a.s. na výh evných plochách kotle K 02 (v prostoru 2. tahu) a ve spole nosti Praflské sluflby a.s. ó závod spalovna Male-ice v prostoru 3. tahu. Zku-enosti provozovatel akustických m ni potvrzují, fle lze vyuflít akustickou energie pro i-t ní trubkovnic vým ník a tato technologie p iná-í znatelný ekonomický efekt provozovatel m energetických za ízení. Pozitivní zku-enosti z provozu vedou uflivatele k dal-ím úvahám o pouflití p i i-t ní rota ních a trubkových oh íva vzduchu, trubkovnic EKA v II. tahu kotel. Ve spole nosti Praflské sluflby a.s. bylo rozhodnuto o instalaci uvedené technologie i-t ní na zbývající kotle provozu.



**Obr. 6** Trubkovnice p eh íváku Zvolenské teplárenské, a.s. po 8 týdnech provozu.

# 3. Vyuflití akustické energie pro zvý-ení toku sypkých hmot v zásobnících

V této ásti p edná-ky jsou shrnuty postupy vyuflití akustické energie pro zlep-ení toku sypkých hmot v zásobnících. Zaji-t ní bezproblémového toku sypkých materiál v zásobnících je nezbytným p edpokladem bezpe ného provozu t chto za ízení. V p ípad vzniku kleneb i mrtvých zón vzniká nebezpe í náhlých p esyp materiálu, p i nichfl vznikají dynamické rázové vlny, kdy hodnoty tlak na st nu zásobníku násobn p evy-ují statické hodnoty napjatosti a mohou negativn ovlivnit flivotnost konstrukce [8]. V p ípad zaklenbování zásobníku vznikají provozovatel m zna né ekonomické ztráty a jejich zprovozn ní vyfladuje nemalé úsilí. Jedním ze zp sob, jak zaru it bezproblémový chod zásobník, je moflnost pouflití akustické energie. Nicmén je nutné podotknout, fle tento zp sob i-t ní je vhodný pouze pro jistou t ídu sypkých materiál . Ve své podstat se jedná o interakci mezi materiály rozdílných materiálových charakteristik. Pro numerickou simulaci toku sypkých materiál jsou vyuflívány bud÷ metody modelující sypké materiály diskrétními áste kami kone ných rozm r, nebo je vyuflívána homogenizace heterogenního materiálu a modelována prost edky mechaniky kontinua.

# 3.1 Experimentální model

Na základ reálné konstrukce (model sila viz Obr. 6), byl odvozen experimentální model e-ené struktury, na kterém byla testována moflnost vyuflití akustické energie pro zaji-t ní plynulého toku sypkých materiál.



Obr. 7a Experimentální model.



**Obr. 7b** Pr myslová aplikace v teplárn v Trmicích.

## 3.2 Akustické vlastnosti porézních látek

Pro optimální pracovní reflim akustického budi e pro zamezení tvorby kleneb v silech je nezbytné analyzovat fyzikální parametry substancí a na jejich základ optimalizovat budicí frekvenci za ízení tak, aby do-lo k souhlasu vlastní frekvence vzduchové kavity s vlastní frekvencí substance pro axiální tvary kmitu. Na základ pofladavku pr myslového partnera byl vyvinut výpo tový nástroj umofl ující vyhodnocení zm ených tlakových polí v d lené impedan ní trubici za ú elem predikce akustických vlastností porézních látek. Experimentáln získané poznatky lze vyuflít k optimalizaci energetických p enos v heterogenních prost edích, kde rychlost zvukové vlny dosahuje rozdílných hodnot. Nástroj byl odvozen na základ zjednodu-ené teorie -í ení vln v homogenním kontinuu [9]. Více úrov ová analýza m ených dat umofl uje získat informace nejen o koeficientech odrazivosti a propustnosti porézních látek, ale dopo ítává i frekven n závislé fyzikální vlastnosti analyzovaného vzorku pomocí metody transforma ních matic [10]. V neposlední ad je moflné ur ovat frekven n závislé akustické impedance na povrchu zkoumaného vzorku. Výstupy z navrfleného výpo tového systému lze vyuflít jako vstupní data pro více sofistikované objemové akusticko-strukturní MKP modely, kde je nezbytné modelovat akustické vlastnosti pohltivých materiál .





Obr.8a D lená impedan ní trubice.

Obr.8b Výpo tový model.

e-ení rovnice (6) lze za p edpokladu zanedbání vlivu ustáleného toku akustického media pro d lenou impedan ní trubici uvaflovat ve tvaru

$$p_{I}(x_{1},t) = (\ddot{C}_{1} e^{j\vartheta x_{1}} + \ddot{C}_{2} e^{-j\vartheta x_{1}}) e^{j\omega t}$$

$$p_{II}(x_{2},t) = (\ddot{C}_{3} e^{-j\vartheta x_{2}} + \ddot{C}_{4} e^{j\vartheta x_{2}}) e^{j\omega t}.$$
(15)

Dosazením zm ených tlakových charakteristik v míst mikrofon lze z (15) vyjád it komplexní konstanty  $\ddot{C}_1 - \ddot{C}_4$ .

#### 3.3. Metoda p enosových matic

Pro predikci fyzikálních vlastností analyzovaného vzorku byla pouflita metoda p enosových matic [11, 12]. Výchylku a vnit ní sílu v analyzované substanci lze odvodit ve tvaru

$$\xi(x,t) = (\ddot{C}_5 e^{-j\mathscr{G}x} + \ddot{C}_6 e^{j\mathscr{G}x}) e^{j\omega t},$$
(16)

$$F(x,t) = ESj \mathcal{G}(-\ddot{C}_5 e^{-j\mathcal{G}x} + \ddot{C}_6 e^{j\mathcal{G}x}) e^{j\omega t}.$$
(17)

Kde *E* je modul prufinosti a *S* je plocha pr ezu. Uvaflujeme-li lokální sou adnicový systém dle Obr.8b, lze z podmínky silové a rychlostní konsistence na hranicích vzorku získat po eliminaci neznámých komplexních konstant  $\ddot{C}_5$ ,  $\ddot{C}_6$  transforma ní matici pro p enos tlakových a rychlostních charakteristik z místa 0 do místa L

$$\begin{bmatrix} p(L,t) \\ v(L,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5(e^{-j\mathscr{G}L} + e^{j\mathscr{G}L}) & \frac{-E\mathscr{G}}{2\omega}(e^{-j\mathscr{G}L} - e^{j\mathscr{G}L}) \\ \frac{-\omega}{2E\mathscr{G}}(e^{-j\mathscr{G}L} - e^{j\mathscr{G}L}) & 0.5(e^{-j\mathscr{G}L} + e^{j\mathscr{G}L}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(0,t) \\ v(0,t) \end{bmatrix}.$$
(18)

Uvaflujeme-li obecný tvar transforma ní matice, lze v d sledky reciprocity a symetrie transforma ní matice po dosazení hodnot tlak a rychlostí na hranicích vzorku (data získaná z m ení) vyjád it prvky transforma ní matice ve tvaru

$$t_{11} = t_{22} = \frac{p(L,t)v(L,t) - p(0,t)v(0,t)}{p(0,t)v(L,t) + p(L,t)v(0,t)}$$
  

$$t_{12} = \frac{p(L,t)^2 - p(0,t)^2}{p(0,t)v(L,t) + p(L,t)v(0,t)}$$
(19)  

$$t_{21} = \frac{v(L,t)^2 - v(0,t)^2}{p(0,t)v(L,t) + p(L,t)v(0,t)}$$

Z rovnosti vztahu

$$\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5(e^{-j\mathcal{G}L} + e^{j\mathcal{G}L}) & \frac{-E\mathcal{G}}{2\omega}(e^{-j\mathcal{G}L} - e^{j\mathcal{G}L}) \\ \frac{-\omega}{2E\mathcal{G}}(e^{-j\mathcal{G}L} - e^{j\mathcal{G}L}) & 0.5(e^{-j\mathcal{G}L} + e^{j\mathcal{G}L}) \end{bmatrix},$$
(20)

lze ze soustavy nelineárních rovnic dopo ítat frekven n závislé charakteristiky modulu prufinosti E(f) a komplexního vlnového ísla  $\mathcal{G}(f)$ , pop ípad frekven n závislý koeficient m rného akustického odporu [13].

#### 3.4 P enos energie

Na rozhraní dvou prost edí lze vyjád it koeficient prostupu energie v pom ru energie nesené v dopadající vln ku energii obsaflené v pr chozí vln ve tvaru

$$\beta = \frac{dE_1}{dE_3} = \frac{(\ddot{C}_1 e^{-j\vartheta_1 x}) \frac{S_1 c_1}{\rho_1 c_1^2} dt}{(\ddot{C}_3 e^{-j\vartheta_2 x}) \frac{S_2 c_2}{\rho_2 c_2^2} dt} = (\frac{2\rho_2 c_2^2 \vartheta_2}{\rho_2 c_2^2 \vartheta_2 + \rho_1 c_1^2 \vartheta_1}) \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \frac{S_2}{S_1}.$$
 (21)

Ze vztahu (21) je patrné, fle mnoflství p enesené energie je funkcí fyzikálních a geometrických parametr . P enos energie na rozhraní prost edí vzduch ó sypký materiál je pom rn nízký [14]. Proto je pro

vyuflití akustické energie pro odstra ování kleneb v zásobnících nezbytné dosáhnout souladu vlastní frekvence vzduchové kavity s vlastní frekvencí substance pro axiální tvary kmitu.

# 3.5 Výpo tový nástroj

Na základ uvedené zjednodu-ené teorie -í ení zvukových vln byl sestaven interaktivní výpo tový nástroj umofl ující uflivateli snadnou modifikovatelnost vstupních parametr matematického modelu. Nástroj se skládá z více jak 50 funkcí, jefl jsou volány z grafického prost edí v závislosti na pofladavku uflivatele.



Obr.9 Uflivatelské prost edí programu SiMO.

V závislosti na geometrické konfiguraci, mí e zapln ní zásobníku a charakteru sypké hmoty, programový nástroj vyhodnocuje vhodné budicí frekven ní rozsahy generátoru akustické energie a jeho umíst ní.







**Obr.10b** Pr b h akustického tlaku 50mm nad výstupním otvorem pro M=76kg, E=10e6MPa, =1600kgm<sup>-3</sup>, <sub>subst</sub>=<0.001-0.6>.

Odlad ný simula ní nástroj byl s úsp chem pouflit p i návrhu technického e-ení v teplárn v Trmicích a dal-í aplikace jsou ve stavu projektové p ípravy.

## 4. Tvorba a produkce lidského hlasu

Obor biomechaniku hlasu, zabývající se generováním zvuku hlasivkami a -í ením zvukových vln vokálním traktem lov ka je v dním oborem, který se v sou asné dob velmi dynamicky rozvíjí. Analýza generace zvuku hlasivkami a jeho -í ení vokálním traktem, lebe ními kostmi, m kkými tkán mi lidské hlavy afl k percepci zvuku p íslu-nými mozkovými centry p edstavuje velmi sloflitý komplexní problém. Defekt n kterého z prvk p enosového systému má za následek poruchy vnímání zvuku lov kem a tím i vlastního hlasového projevu. Proto je nutné v novat náleflitou pozornost analýze reálných cest -í ení zvuku. Výpo tové modely a zejména numerické simulace fonace v asové oblasti mohou být vyuflívány p i studiu generace hlasu, k modelování vlivu vrozených vad v oblasti vokálního traktu lov ka nebo k simulacím poopera ních stav po odstran ní nádor .

Vznik hlasu je komplexní biomechanický proces, který zahrnuje adu faktor , od vlivu proudícího vzduchu z plic, kmitání hrani ních tkání afl po rezonance dutiny vokálního traktu. Hlasivky, které jsou samobuzen rozkmitávány proudem vzduchu z plic, generují základní tón, jehofl frekvence odpovídá frekvenci kmitání hlasivek [15]. V prostorech nad hlasivkami (vokálním traktu) pak rezonan ní d je m ní spektrum základního tónu, zejména jeho vy—í harmonické sloflky. Akustické rezonance vokálního traktu vytvá ejí takzvané formanty, které jsou definovány jako vrcholy ve spektru hlasu. Poloha formant ve frekven ním spektru definuje samohlásky a zp sobuje rozdíly v zabarvení hlasu. Formanty jsou ur eny velikostí a tvarem dutiny vokálního traktu, které mohou být v pr b hu fonace m n ny, nap íklad zm nou polohy jazyka nebo zm nou otev ení úst [16].

Pochopení interakce mezi proud ním vzduchu, kmitáním hrani ních tkání vokálního traktu a jejich vliv na akustické charakteristiky hlasu vyfladují podrobnou znalost aerodynamiky, akustiky a materiálových vlastností tkání. Získání podrobn j-ích informací o proud ní vzduchu v hlasivkách i jejich materiálových charakteristik m ením je vzhledem k nedostupnosti hlasivek pom rn komplikované. S ohledem na rychlou degradaci vzork nelze spoléhat ani na zji-t ní pot ebných informací *in vitro*. Jediná cesta jak získat pofladované informace jsou nep ímá akustická m ení i zobrazovací metody (video stroboskopie, video kymografie, vysokorychlostní video endoskopie, dynamické RTG nebo magnetická resonance i po íta ová tomografie). Vhodným nástrojem pro porozum ní základních princip tvorby hlasu se jeví pouflití obecných fyzikálních

princip. Kvalitu hlasového projevu lze popsat pomocí matematických model, které umofl ují vytvá et mnoho modelových situací. P esnost sestavených model závisí na aktuální teoretické úrovni v-eobecných znalostí v jednotlivých oblastech mechaniky a na omezeních výpo etní techniky. Výpo etní a modelovací techniky dosáhly v sou asné dob úrovn, která umofl uje pímou transformace matematických model ve skute né fyzické modely, nap íklad pomocí íslicov ízených stroj. Matematické modely tedy mohou být ov ovány experimentáln na realistický fyzikální modelech v laborato ích. Tato verifikace pom rn výpo etních model je obzvlá-t d leflitá v p ípad, kdvfl se v matematickém modelu zanedbávají n které z vliv i fyzikálních parametr.

## 4.1 Vliv piriformních sin a valecul na kvalitu hlasového projevu

Neustále se zvy-ující kvalita zobrazovacích technik umoflnuje sestavovat biomechanické modely stále více se blíflící realit, cofl umoflnuje studovat i d íve opomíjené jevy. Jednou z diskutovaných otázek je, jakou roli hrají piriformní síny (PS) a valeculy (VA) v produkci hlasu.

Obecn bylo p ijímáno, fle tyto šparalelníč kavity vokálního traktu zp sobují antiresonan ní jevy ve výstupním hlasovém spektru (výrazný propad energie vyza ovaný z úst kolem frekven ního rozsahu 4-5 kHz) [17,18]. Takfle jejich vliv p i tvorb hlasu by byl spí-e negativní, jdoucí proti snaze dosáhnout maximálních hodnot výstupních tlakových polí s co nejmen-í námahou [19].



**Obr.11a** Snímek vokálního traktu lov ka z po íta ového tomografu.



**Obr.11b** Rekonstrukce vokálního traktu lov ka ze snímk CT.

Podrobn j–í analýzy v–ak prokázaly, fle krom antirezonance se v daném frekven ním rozsahu objeví nové rezonan ní vrcholy [20]. Simula ními výpo ty bylo prov eno, fle tyto rezonan ní vrcholy spadají do frekven ního intervalu 3 ó 5 kHz tedy do rozsahu, kde je lidské ucho nejcitliv j–í, a mohou p ispívat ke vzniku tzv. õ e nickéhoö i õp veckéhoö formantu [21].

Lze se tedy domnívat, fle tyto šparalelníõ prostory výrazn ovliv ují kvalitu hlasu. Pomocí zobrazovacích technik bylo nezvratn prokázáno, fle po hlasovém cvi ení (rehabilitace hlasu) dochází ke geometrické rekonfiguraci vokálního traktu lov ka [22].



Obr.12 Vokální trakt lov ka p ed, v pr b hu a po hlasové terapii.

Z akustických m ení vyplývá, fle v d sledku hlasového cvi ení dochází k p erozd lení energie v hlasovém spektru a zm n doby dozvuku.



**Obr.13a** Spektrogram výstupního tlakového pole p ed hlasovou terapii (10cm p ed ústy).



**Obr.13b** Spektrogram výstupního tlakového pole po hlasové terapii (10cm p ed ústy).

S ohledem na velmi podrobný geometrický popis akustických kavit lze vytvá et 3D MKP modely efektivn simulující fonaci ve frekven ním spektru afl do 20 kHz. Pomáhají porozum t relativn –irokým individuálním rozdíl m v kvalit hlasu a lze pomocí nich získat pot ebné informace o vzniku õ e nického a p veckéhoõ formantu [23].

## 4.2 Zjednodu-ený výpo tový model

Provád t geometrické modifikace vokálního traktu na úrovni 3D MKP modelu je s ohledem na asovou náro nost výpo tu simulace fonace pom rn problematické. Proto byl pro analýzu vlivu (PS) a (VA) navrflen zjednodu-ený výpo tový model, který v-ak zachovává v-echny podstatné fona ní charakteristiky 3D MKP modelu. Model byl odvozen na základ redukcí matic hmotnosti a tuhosti výchozího modelu. S ohledem na výpo tové asy, byl dramaticky sníflen po et stup volnosti. V modelu byl zahrnut dominantní mechanismus disipace energie vyza ováním akustické energie do volného prost edí [24, 25].



**Obr. 14** Redukce 3D objemového modelu do zjednodu–eného modelu vokálního traktu lov ka,  $p_i$  a  $m_i$  ozna ují akustické tlaky a hmoty jednotlivých kavit vokálního traktu.

#### 4.3 Lad ní zjednodu-eného modelu

V zjednodu-eném výpo tovém modelu byl dramaticky sníflen po et stup volnosti, proto bylo p istoupeno k lad ní modelu pomocí globální vícekriteriální optimaliza ní metody s pofladavkem shody Q-rezonan ních vrcholu a P-antirezonan ních vrchol ve frekven ním spektru

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^{Q} \left( f_{i,res-demand} - f_{i,res} \right)^2 + \sum_{i=1}^{P} \left( f_{i,antires-demand} - f_{i,antires} \right)^2 .$$
(22)

Globální optimaliza ní metoda produkuje adu p ípustných e-ení, proto byly poufity dodate né vazbové rovnice tak, aby nedo-lo k výrazné zm n nalezených parametr soustavy

$$m_i = const., \ i = 1, \dots, 11; \sum_{i=1}^{11} (k_{i,new} - k_{i,orig})^2 \Rightarrow minimum$$
 (23)



**Obr. 15**.P enosové funkce tlakových polí ve vzdálenosti 10 cm p ed rovinou úst pro 3D MKP model ( ervená k ivka) a pro zjednodu-ený model (modrá k ivka).

# 4.4 Analytické odvození polohy antirezonancí ve frekven ním spektru hlasu

Verifikovaný zjednodu-ený model vokálního traktu byl poufit pro ov ení vlivu geometrické konfigurace (PS) a (VA) na fona ní charakteristiky lidského hlasu. Pro kvantitativní ohodnocení vlivu geometrické zm ny vokálního traktu na generované tlakové pole byla poufita metoda harmonické analýzy. Za p edpokladu harmonického buzení lze analyticky odvodit velikosti amplitud kmitu jednotlivých stup volnosti ve tvaru

$$\mathbf{r} = (\mathbf{K}_{\mathbf{r}} - \omega^2 \mathbf{M}_{\mathbf{r}} + j \omega \mathbf{B}_{\mathbf{r}})^{-1} \mathbf{p}_0 = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{p}_0.$$
(24)

D sledným odvozením získáme

$$r_i = \frac{q_i(\omega)}{\det(\mathbf{A})} h(\omega) .$$
(25)

Rezonan ní (formantové) frekvence ve výstupním tlakovém poli jsou dána podmínkou det( $\mathbf{A}(\omega)$ ) = 0 a antirezonan ní frekvence spl ují podmínku  $q_7(\omega) = 0$ . D sledným odvozením s vyuflitím symbolického e-i e lze získat analytické výrazy definující polohu antirezonan ních vrchol . Pro úplný model s nesymetrickými objemy (PS) a (VA) dostáváme

$$q_{7}(\omega) = k_{2}k_{3}k_{4}k_{5}k_{6}k_{7}(k_{8}-\omega^{2}m_{8})(k_{9}-\omega^{2}m_{9})(k_{10}-\omega^{2}m_{10})(k_{11}-\omega^{2}m_{11})$$
(26)

Z výrazu (26) je patrné, fle po et antirezonan ních vrchol je poplatný po tu šparalelníchõ kavit vokálního traktu. V p ípad symetrických objem, i odstran ní šparalelníchõ kavity dochází ke sníflení po tu antirezonan ních vrchol ve výstupním frekven ním spektru vokálního traktu.

#### 4.5 Numerická simulace fonace

Rezonan ní a antirezonan ní jevy jsou ve frekven ních spektrech tlakových polí vn a uvnit vokálního traktu lov ka rozdílné, jak je patrné na Obr.16 z kterého mohou být u in ny tyto záv ry:

Hodnoty úrovn tlakových polí je obecn nifl-í vn vokálního traktu, krom hodnot v antirezonan ních frekvencích. Po et antireonan ních frekvencí je men-í ve výstupním tlakovém signálu nefl v tlakových polích uvnit vokálního traktu. V p ípad buzení systému antirezona ními frekvencemi výstupního signálu není tém fládná energie emitována vn vokální trakt, ale dochází k její absorpci v šparalelníchõ kavitách, kde zp sobuje jejich výrazné kmity. Jedná se v podstat o Hemholtz v resonátor [7], který pracuje jako frekven n selektivní tlumi a úlofli-t energie. S ohledem na uvedené, vystává otázka, zda lze pouflít šparalelníõ objemy vokálního traktu k zlep-ení hlasové kvality. Proto byly pro fyziologicky p ípustné zm nu objem (PS) vy-et ovány frekven ní charakteristiky výstupního tlakového pole.



**Obr.16** Porovnání rezonan ních a antirezonan ních hladin akustických tlak uvnit a vn vokálního traktu lov ka pro výstupní tlakové pole  $p_7$  a pro tlakové pole v místech (PS)  $p_8, p_9$  pro budící sinusový signál o amplitud 1 Pa vztafleno k 20 µPa.

Z Obr.17b vyplývá, fle pro švhodnouõ volbu velikosti objemu (PS) dochází ke zvý-ení energie v oblasti kolem tvrtého formantu a ke šklastrováníõ rezonan ních frekvencí, cofl vede k jevu známému jako š e nickýõ i šp veckýõ formant.





**Obr.17a** Spektrogram hladiny akustického tlakového pole 10cm p ed ústy pro m n ný objem (PS), pro budící sinusový signál o amplitud 1 Pa vztafleno k 20 µPa.

**Obr.17b** Spektrogram hladiny akustické tlaku pole 10cm p ed ústy pro nominální a šoptimálníõ objem (PS). (Zv t-ení o 18%)

Poznatky získané na zjednodu-eném modelu vokálního traktu byly prov eny na plném 3D MKP modelu. Z numericky vypo tených p enosových funkcí mezi hlasivkou a ezem vzdáleným 10cm od úst je vid t, fle pro švhodnouõ velikost (PS) dojde k výraznému zesílení rezonan ního vrcholu v pofladovaném frekven ním rozsahu.



**Obr.18a** 3D MKP model vokálního traktu lov ka. Nominální velikost (PS).



**Obr.18b** Spektrogram hladiny akustického tlakového pole 10cm p ed ústy pro nominální a šoptimálníõ objem (PS) 3D MKP modelu, pro budící sinusový signál o amplitud 1 Pa vztafleno k 20 μPa.

Na Obr.18b je patrné, fle švhodnouõ volbou velikosti objemu (PS) lze docílit výrazné zvý-ení hladiny akustického tlaku a sdruflení rezonan ních vrchol ve frekven ním rozsahu kde je lidské ucho nejcitliv j-í. V tomto frekven ním intervalu dochází ke kumulaci akustické energie a vzniku tzv. š e nickéhoõ formantu. Výsledky ukazují, fle (PS) dutiny mohou hrát d leflitou úlohu p i tvorb šzvu néhoõ hlasu.

Za hlavní dosaflené v decké p ínosy v problematice biomechaniky hlasu lze povaflovat p ísp vek k osv tlení problematiky vzniku šp veckého formantuõ, prokázání vlivu piriformních sin na kvalitu hlasového projevu, vliv nedomykavosti uzáv ru m kkého patra na fona ní charakteristiky lidského hlasu, vliv rehabilitace hlasu pro zm nu hlasové kvality, p ísp vek k vlivu polohy antirezonan ních frekvencí v hlasovém frekven ním spektru, vytvo ení metodiky poskytující ucelený systematický p ístup tvorby matematických model pro numerické simulace fonace v asové oblasti.

## 5. Vývoj um lé hlasivky

Pro hlasové profesionály (u itelé, herci, zp váci) jsou problémy s hlasem zna n limitujícím faktorem. Jedním z moflných d vod hlasových problém je únavové po-kození hlasivkových tkání v pr b hu fonace, kdy dochází k opakovaným rázovým d j m p i kontaktu hlasivek. Návrh

modelu lidských hlasivek, který by umoflnoval simulovat patologické stavy je nezbytným p edpokladem pro návrh um lé hlasivky. Návrh um lé hlasivky je velmi komplikovaný problém, zahrnující celou adu v dních disciplín. Je nezbytné získat poznatky o vzniku samobuzených kmitu hlasivky proudem vzduchu z plic, nalézt vhodný materiálový popis hlasivkových tkání a predikovat hodnoty impaktních napjatostí v pr b hu fonace.

Mechanické zat flování hlasivky je zp sobeno kombinací aerodynamických, inerciálních a rázových sil. Hodnoty napjatostí a zrychlení vzniklých v d sledku náraz hlasivky v pr b hu fonace m fle zp sobit po-kození tkán. S ohledem na problematickou geometrickou a materiálovou konfiguraci hlasivkových tkání, bvl sestaven pln parametrický 3D objemový výpo tový model lidského hrtanu na bázi metody MKP. Model respektuje fona ní postavení hlasivek, umoflnuje snadno modifikovat jejich geometrickou konfiguraci. V modelu je dále zahrnuta moflnost podélného p edp tí hlasivkových tkání. Jednotlivé vrstvy hlasivkových tkání isou popsány nelineárními materiálovými charakteristikami. S ohledem na charakter pouflití modelu, kdy je nutné testovat celou adu geometrických a materiálových konfigurací je model tlakovými charakteristikami p edem napo ítanými zat flován ze zjednodu-eného aero-elastického modelu, kde je korektn e-ena interakce proudu vzduchu s poddajnou tkání hrtanu.

## 5.1 Geometrická konfigurace modelu lidských hlasivek

Geometrická konfigurace modelu lidského hrtanu byla odvozena ze snímk po ízených po íta ovou tomografií. Tyto snímky byly konvertovány do 3D objemového modelu. V prost edí jazyka MATLAB byl sestaven interaktivní výpo tový nástroj umofl ující korekci, vyhlazení a konverzi objemového modelu do MKP popisu e-ené struktury. Sestavený model respektuje t ívrstvou strukturu hlasivky [27].



**Obr. 19a** MKP model lidského **Obr. 19b** Struktura hlasivkových hrtanu. tkání.

## 5.2 Numerická simulace kmit hlasivek

S ohledem na parametrizaci modelu lze zm nou hodnoty p edp tí hlasivkových tkání, dosáhnout shody základní frekvence kmitání hlasivky se zm enými daty získanými p i fonaci pacienta. Implementace kontaktních element umoflnuje vyhodnocovat hodnoty napjatostí nejen na povrchu tkání, ale i v t le hlasivky. Ambicí výpo tového modelu, je s ohledem na data po ízená p i vy-et ování pacient usuzovat z charakteru kmit hlasivek na p íslu-ný typ patologie. Dal-ím cílem modelu je otestovat navrflené materiálové charakteristiky jednotlivých tkání s ohledem na vznik samobuzených kmit .



Obr. 20 Maximální deformace hlasivkových tkání v pr b hu fonace.

Záv ry plynoucí ze simula ních výpo t jsou verifikovány na fyzických modelech.



Obr. 21 Forma pro õodlitíö hlasivkových tkání.

Vývoj modelu a shromáfld ní poznatku pro vybuzení kmit hlasivek, by m l vyústit v návrh materiálové struktury s prom nnou tuhostí tak, aby co nejlépe vyhovoval pofladavk m klinické praxe pro návrh konstrukce um lé

hlasivky. Prvotní experimentální výsledky na fyzických modelech prokazují uspokojivé charakteristiky odpovídající klinické praxi.

# 6. Záv r

V p edkládané p edná-ce je ve stru nosti prezentovaná ást výzkumných a vývojových aktivit zam ených na aplikace technické akustiky, na kterých se významnou m rou uchaze podílel za posledních 10 let na Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Fakulty strojní

VUT v Praze. Postupy prezentované v prvé ásti p edná-ky byly s úsp chem vyufity pro e-ení problém technické praxe. Na základ pozitivních reakcí provozovatel energetických za ízení, jsou p ipravována dal-í aplikace této metodiky na reálných pr myslových objektech. Tyto postupy bylo moflné aplikovat na základ výzkumu metod technické akustiky rozvinuté p i e-ení komplexního stále otev eného v deckého problému objasn ní tvorby a lé by lidského hlasu. P i tomto výzkumu byly mimo jiné vyvinuty metody optimalizace tvorby a uflití matematických model interakce akusticko-strukturních soustav v ryze technických, ale i biologických prost edích.

Výstupy z problematiky základního výzkumu tvorby a produkce lidského hlasu byly vytvo eny v rámci grantových projekt : IAA2076401 šMatematické modelování kmit lidských hlasivekõ, GA106/04/1025 šModelování vibroakustických systém se zam ením na vokální trakt GA101/08/1155 šPo íta ové fvzikální modelování lov kaõ a vibroakustických vlastností vokálního traktu lov ka s ohledem na optimalizaci hlasové kvalityõ, a GAP101/12/1306 **š**Biomechanické modelování tvorby lidského hlasu - cesta k um lým hlasivkámõ, které vznikly ve spolupráci s adou spolupracovník z Ústavu termomechaniky AV R, v.v.i, z Ústavu makromolekulární chemie AV R, v.v.i, z První léka ské fakulty Univerzity Karlovy v Praze a z Ústavu biofyziky, P írodov decké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci a které získaly adu zahrani ních ohlas .

## Literatura

- [1] Thomas, W.P., Boiler Cleaner, U.S. Patent 2,351,163, Detroit
- [2] Forster, M. A.: Process for clearing surfaces fouled by deposits resulting from combustion of carbon-bearing substances, US Patent No. 4396434, (1983).
- [3] Brepta R., P st L., Turek F.: Mechanické kmitání. Sobotáles, Praha (1994).
- [4] Wald F. a kol.: Výpo et poflární odolnosti stavebních konstrukcí, VUT v Praze, Praha (2005), 336 s., ISBN 80-0103157-8
- [5] Merhaut J.:Teoretické základy elektroakustiky. Academia, Praha (1985).
- [6] Angot A.: Uflitá matematika pro elektrotechnické inflenýry. SNTL, Praha (1971).
- [7] Fahy, F. J.: Sound Intensity. Elsevier, (1989).
- [8] Jenike A. W., Storage and flow of solids., Bulletin No. 123, Utah Engineering Experiment Stationm Utah, (1964).
- [9] K. Attenborough, õAcoustical characteristics of porous materials,ö Phys. Rep. 82, 197-227 (1982).
- [10] R. A. Scott, õThe absorption of sound in a homogeneous porous medium,ö Proc. Phys. Soc. London 58, 358-368 (1945).
- [11] B. H. Song and J. Stuart Bolton, õTransfer matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials,ö (1999).
- [12] C. M. Lee, Y. Xu, õ A modified transfer matrix method for prediction of transmission loss of multilayer acoustic materials,ö Journal of sound and vibration326, 290-301 (2009).
- [13] Z. Tao, D. W. Herrin and A. S. Seybert, õ Measuring bulk properties of sound-absorbing materials using the two-source method,ö (2003).
- [14] Brepta R., Prokopec M.: <sup>TA</sup> ení nap ových vln a rázy v t lesech. Academia. Praha (1972).
- [15] Titze, I. R. (2000). *Principles of voice production (second printing)*. Iowa City, IA: National Center for Voice and Speech.
- [16] Titze, I. R. & Story, B. H. (1997). Acoustic interactions of the voice source with the lower vocal tract. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101, 2234-2243.
- [17] Takemoto, H., Adachi, S., Kitamura, T., Mokhtari, P., & Honda, K. (2006). Acoustic roles of the laryngeal cavity in vocal tract resonance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120, 2228-2238.
- [18] Dang, J. & Honda, K. (1997). Acoustic characteristics of the piriform fossa in models and humans. *Journal of the Acoustical*

Society of America, 101, 456-465.

- [19] Fujita, S. & Honda, K. (2005). An experimental study of acoustic characteristics of hypopharyngeal cavities using vocal tract solid models. *Acoustical Science and Technology*, 26, 353-357.
- [20] Vampola, T., Horá ek, J., Laukkanen, A.-M., & ™ec, J. G. (2013). Human vocal tract resonances and the corresponding mode shapes investigated by three-dimensional finite-element modelling based on CT measurement. Logopedics Phoniatrics Vocology, online: 1610, DOI: 10.3109/14015439.2013.775333..
- [21] Sundberg, J. (1974). Articulatory interpretation of the "singing formant". *Journal of the Acoustical Society of America*, 55, 838-844.
- [22] Vampola, T., Laukkanen, A.-M., Horá ek, J., & <sup>T</sup>¥ec, J. G. (2011). Vocal tract changes caused by phonation into a tube: A case study using computer tomography and finite element modeling. *Journal of the Acoustical Society of America*, *129*, 310-315.
- [23] Nawka, T., Anders, L. C., Cebulla, M., & Zurakowski, D. (1997). The speaker's formant in male voices. *Journal of Voice*, 11, 422-428.
- [24] Vampola, T., Horá ek, J., & ™ec, J. G. (2008a). FE modeling of human vocal tract acoustics. Part I: Production of Czech vowels. *Acta Acustica United With Acustica*, 94, 433-447.
- [25] Vampola, T., Horá ek, J., Vok ál, J., & erný, L. (2008b). FE modeling of human vocal tract acoustics. Part II: Influence of velopharyngeal insufficiency on phonation of vowels. Acta Acustica United With Acustica, 94, 448-460.
- [26] Vampola, T., Laukkanen, A.-M., Horá ek, J., & ™ec, J. G. (2011). Finite element modelling of vocal tract changes after voice therapy. *Applied and Computational Mechanics*, 5, 77-88.
- [27] Hirano, M.: Phonosurgery, basic and clinical investigations. In: The 76th Annular Convention of the Oto-Rhino-Laryngological Society of Japan, 1975.

## Doc., Dr., Ing. Tomá-Vampola

Tomá–Vampola (\*1961, v Praze) absolvoval VUT v Praze Fakultu strojní v oboru Aplikovaná mechanika v roce 1985 obhajobou diplomové práce na téma š e-ení rota n symetrické úlohy pomocí MKPõ. V letech 1985-1989 pracoval jako v decký pracovník v Ústavu pro výzkum motorových vozidel v Praze. Od roku 1989 do 2006 p sobil jako odborný asistent na Odboru mechaniky t les Ústavu mechaniky VUT v Praze, Fakulty strojní. V roce 1996 obhájil diserta ní práci šEfektivní algoritmus sestavení pohybových rovnic soustavy mnoha t les s uvaflováním poddajnostíõ, která v témfle roce získala ocen ní v sout fli Prof. Babu-ky v oboru po íta ové mechaniky. V roce 2006 obhájil habilita ní práci šModelování akustických vlastností vokálního traktu lov kaõ v oboru Aplikovaná mechanika. Od roku 2006 p sobí jako docent na Oboru mechaniky a mechatroniky Ústavu mechaniky biomechaniky a mechatroniky VUT v Praze Fakulty strojní. St flejními oblastmi jeho odborné práce jsou: Dynamika a kinematika soustav mnoha poddajných t les, propojení experimentální modální analýzy s výpo tovým modelem, lad ní výpo tového modelu s ohledem na m ená data, technická akustika, kmitání mechanických systém a biomechanické po íta ové i fyzikální modely produkce hlasu.

Za posledních 10 let je autorem i spoluautorem 7 lánk v impaktovaných asopisech, 4 mezinárodních patent , 2 národních patent , 25 p ísp vk na zahrani ních konferencích a 59 p ísp vk na domácích konferencích. Dále je autorem i spoluautorem 23 realizací typu software, funk ní vzorek, prototyp. Má 22 mezinárodních citací na WoS a  $H_{index}=3$ . Za posledních 10 let se významn podílel na celé ad v deckovýzkumných a pr myslových projektech. Mimo jiné na 10 grantových projektech a 3 výzkumných centrech. Dále je e-itelem díl ích úkol v Centru kompetence automobilového pr myslu Josefa Boflka, a v Centru kompetence - Strojírenská výrobní technika. Byl e-itelem EC ze 7. rámcového programu šActive Control for Flexible 2020 Aircraftõ. Významn se podílel na vývoji horizontálního obráb cího centra Trijoint 900H ocen ného cenou eská hlava 2003 ó Invence.

Je -kolitelem 4 doktorand , 1 úsp -n obhájil a je vedoucí ady bakalá ských a magisterských diplomových prací. Významn se podílí na výuce jak v bakalá ském, tak i magisterském a doktorském programu na Fakult strojní.