

AKUSTICKÉ LISTY

České akustické společnosti
www.czakustika.cz

ročník 16, číslo 4

prosinec 2010

Obsah

Pozvánka na Valnou hromadu	3
Akustická analýza promluv dětí s vývojovou dysfázií Acoustic Analysis of Utterances from Children with Developmental Dysphasia <i>Martina Nejepsová, Jan Janda, Roman Čmejla a Jan Vokřál</i>	4
Popis spektrálních vlastností sibilantů /s/, /š/, /z/ a /ž/ na základě LSP parametrizace Description of the Spectral Properties of Czech Sibilants Using the Line Spectral Pairs Parametrisation <i>Adam Stráňík a Roman Čmejla</i>	9
Simple Loudspeaker-driven Acoustic Compressor Jednoduchý akustický kompresor buděný reproduktorem <i>Martin Šoltés a Milan Červenka</i>	15

ČESKÁ AKUSTICKÁ SPOLEČNOST

Rada České akustické společnosti svolává ve smyslu stanov

VALNOU HROMADU,

která se bude konat ve čtvrtek 20. ledna 2011 na Fakultě elektrotechnické ČVUT, Technická 2, Praha 6 – Dejvice.

Rámcový program:

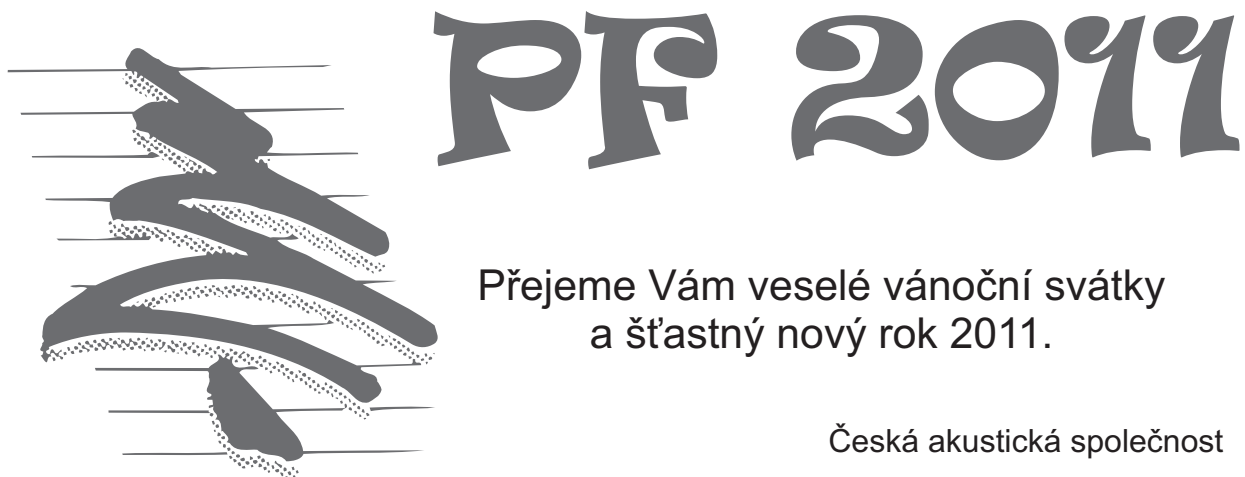
13.00–13.45 Jednání v odborných skupinách. Rozpis místností pro jednání v odborných skupinách bude vyvěšen ve vstupním prostoru fakulty a na dveřích sekretariátu, místnost č. T2:B2-47.

13.45–14.15 Prezentace.

14.15–16.00 Plenární zasedání, místnost č. T2:C2-82.

Důležité upozornění: Člen společnosti, který se nebude moci Valné hromady osobně zúčastnit, pověří jiného člena, aby jej zastupoval. Jeden člen společnosti může zastupovat nejvýše tři členy. Formulář pověření je součástí tohoto čísla Akustických listů.

* * *



Akustická analýza promluv dětí s vývojovou dysfázií

Martina Nejepsová^a, Jan Janda^a, Roman Čmejla^a a Jan Vokřál^b

^aČVUT–FEL, Technická 2, 166 27 Praha 6

^bFoniatrická klinika 1. LF UK a VFN v Praze, Žitná 24, 120 00 Praha 2

e-mail: nejepmar@fel.cvut.cz

The main goal of this article is to find parameters for the severity assessment of children with developmental dysphasia. This parameters will be used for an automatic classifier. Developed algorithm in the form of software applications should be helpful in the future to phoniatriest and clinical specialists to assess the current level of development of speech and articulation. Spectral moments of isolated sibilants and their length, rate and rhythm of speech in specific utterances are only some of suitable parameters for diagnosis of developmental dysphasia.

1. Úvod

K vývoji řeči dochází již v raném věku a během dospívání se řečový projev mění. Při ztrátě schopnosti mluveného projevu často dochází ke ztížení komunikace, a tím i k znesnadnění integrace mezi běžnou populací.

Nejčastějšími poruchami řeči u dětských pacientů, se kterými se foniatři a kliničtí logopedi setkávají, jsou opožděný či nerovnoměrný vývoj řeči, vývojová dysfázie, vývojová dysartrie, dyslálie (patlavost), breptavost, koktavost (zadrhávání). Vyskytují se i poruchy hlasu.

Pokud je vada nebo porucha řeči či hlasu včas a správně rozpoznána, je možné pomocí terapeutické péče zmírnit či úplně odstranit její projevy. I z tohoto důvodu jsou kladeny požadavky na objektivní hodnocení pacientů, které by bylo více nezávislé a napomohlo by při diagnostikování řečových vad.

2. Vývojová dysfázie

Vývojová dysfázie neboli specificky narušený vývoj řeči je porucha zpracování řečového signálu [1]. Přesný důvod a období vzniku této poruchy nejsou známy. Pravděpodobně k němu dochází v prenatálním období, při porodu či následně po něm. Projevuje se úplnou či částečnou ztrátou schopností naučit se verbálně komunikovat, ačkoliv podmínky pro rozvoj řeči jsou přiměřené.

Vývojová dysfázie je diagnostikována pomocí sledování promluv a porozumění pacientů, jejich grafických projevů, motoriky a orientace v čase a prostoru.

Mezi základní příznaky vývojové dysfázie patří věku neodpovídající slovní zásoba, komolení slov včetně gramatických chyb, přehazování slovosledu či vynechání některých slovních druhů v řečovém projevu, který bývá obtížně srozumitelný. Projevuje se výraznými rozdíly mezi verbálními a neverbálními schopnostmi, či narušením krátkodobé verbální paměti. Vývojová dysfázie se dá rozpoznat také v kresbě (především postav). Dalším projevem může být špatné časové nebo prostorové označení či nesprávné určení vztahů mezi rodinnými příslušníky.

3. Databáze

Pro účely posuzování řečových poruch ze zvukových záznamů promluv pacientů byl nejprve vytvořen metodický postup. Ve spolupráci s Foniatrickou klinikou 1. lékařské fakulty Univerzity Karlovy a Všeobecné fakultní nemocnice v Praze byl sestaven seznam logopedických jevů vhodných pro následnou analýzu. Databáze obsahuje izolované vokály a sibilanty, izolovaná slova, známou dětskou říkanku a spontánní popis sekvence obrázků (viz tabulka 1).

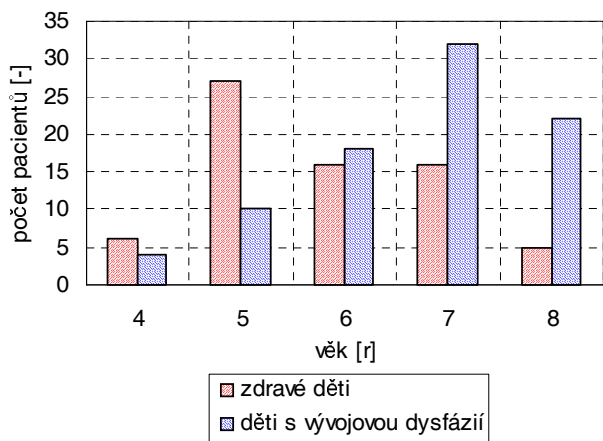
vokály (výdrž)	<i>A, E, I, O, U</i>	spontánní, opakované u pacientů mladších 7 let
označení obrázků	<i>máma, babička, čokoláda, sluníčko, popelnice, košile, silnice, Rákosníček, hamburger, velryba, ucho, ježek, ředkvička, fotbalista</i>	spontánní, opakované u pacientů s opožděným vývojem
říkanka	<i>En ten týky, dva špalíky, čert vyletěl z elektriky. Bez klobouku bos, natloukl si nos.</i>	spontánní
rychlé opakování	<i>PA-TA-KA BA-DA-GA</i>	u pacientů starších 7 let
sibilanty (výdrž)	<i>S, Š</i>	spontánní
popis rutinní činnosti pomocí obrázků	<i>ranní vstávání a následující činnosti před cestou do školky/školy</i>	spontánní projev

Tabulka 1: Seznam užitých logopedických jevů

Promluvy dětí s vývojovou dysfázií byly nahrávány na Foniatrické klinice 1. lékařské fakulty Univerzity Karlovy a Všeobecné fakultní nemocnice v Praze. Každé z dětí s touto poruchou řeči je ovlivněno různým stupněm závažnosti vývojové vady. Promluvy zdravých dětí [2] (jako referenční hodnoty) byly pořízeny v mateřských a základních školách v Praze. Nahrávání bylo prováděno pomocí

přenosného nahrávacího zařízení se směrovým mikrofonom v běžných místnostech.

V současné době databáze obsahuje promluvy od 86 zdravých dětí a od 81 dětí s vývojovou dysfázií. Zastoupení promluv v jednotlivých věkových kategoriích je na obrázku 1.



Obrázek 1: Počet promluv ve věkových kategoriích

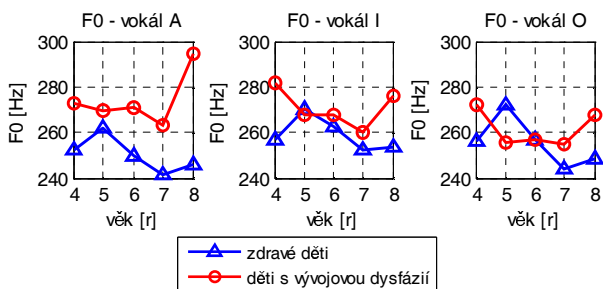
Pro posuzování parametrů není nutné rozdělit pacienty podle jejich pohlaví, protože rozdíl mezi mužským a ženským hlasem se projeví až v pozdějším věku – během dospívání.

4. Sledované charakteristiky

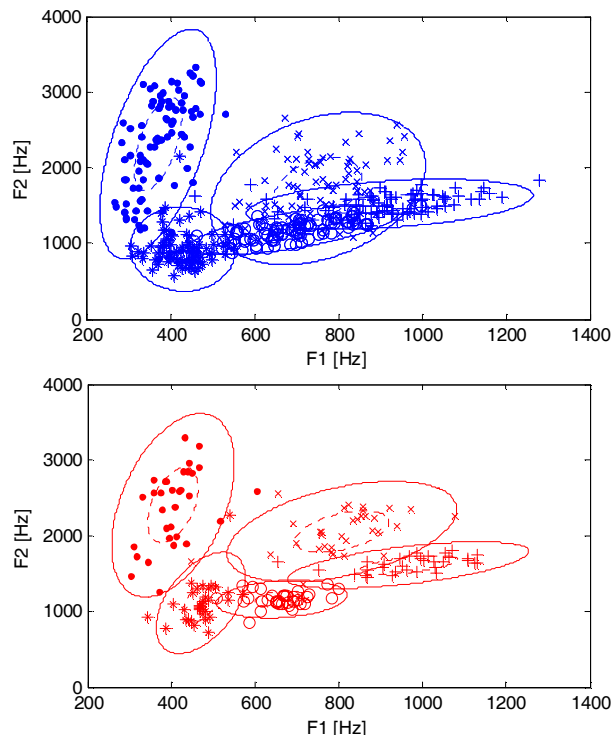
Zde jsou popsány metody, které byly použity k charakterizaci řeči a hlasu. Všechny analýzy byly prováděny u obou skupin promluv (zdravých dětí i dětí s vývojovou dysfázií) a vzájemně porovnávány. Jednotlivé výsledky analýz budou následně využity při klasifikaci a rozpoznávání dětí s vývojovou dysfázií od zdravých dětí, hodnocení věkových závislostí, sledování trendu poruchy řeči během terapie apod.

4.1. Analýza vokálů

Analýza vokálů byla prováděna na pořízených izolovaných vokálech v programu PRAAT [5] a ověřována v prostředí WAVESURFER [6]. U každého z vokálů byla sledována



Obrázek 2: Základní hlasivkový tón vokálů A, I a O



Obrázek 3: Vokální trojúhelník pro zdravé děti (nahore) a pro děti s vývojovou dysfázií (dole)

základní frekvence hlasu (F0), první (F1) a druhý (F2) formant. Trend F0 pro věkový interval 4–8 let je na obrázku 2. F1 a F2 bylo vykreslováno do tzv. vokálního trojúhelníku, který je na obrázku 3.

Z vokálních analýz vyplývá, že tyto parametry nejsou vhodné pro klasifikaci zdravých dětí a pacientů s vývojovou dysfázií. Ale podle výsledků z [2] jsou věkově závislé. Tato závislost by mohla být použita při sledování průběhu řečové poruchy během časových intervalů.

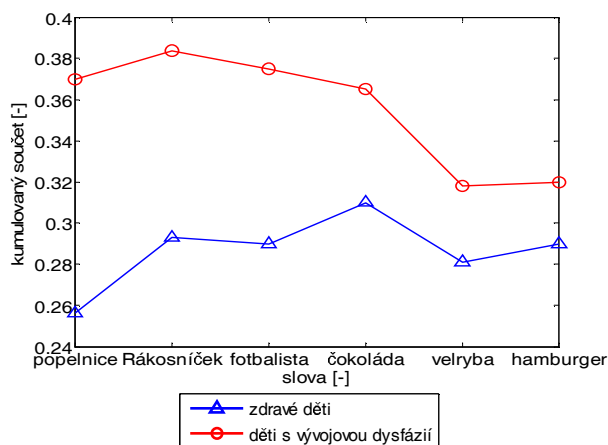
4.2. Analýza izolovaných slov

Vyhodnocováním analýzy izolovaných slov je sledováno DTW (Dynamic Time Warping). Sledování srozumitelnosti izolovaných slov je realizováno porovnáním identických promluv od zdravých dětí a od pacientů s vývojovou dysfázií. Tato metoda je podrobně popsána v [7] a výsledky jsou na obrázku 4. Zde můžeme pozorovat rozdíly ve výslovnosti zdravých dětí a dětí s vývojovou dysfázií. Čím větší počet slabik bude dané slovo obsahovat, tím bude obtížnější ho vyslovit pro pacienty s vývojovou dysfázií a tím bude odlišnost od zdravých dětí větší.

Parametry získané pomocí DTW jsou vhodné pro rozlišení zdravých dětí a pacientů s vývojovou dysfázií.

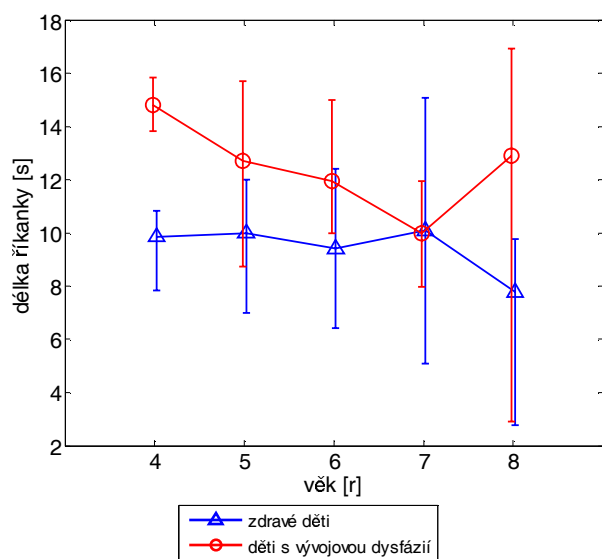
4.3. Analýza říkanky

Analýza pomocí dětem známé čtyřveršové říkanky slouží ke sledování tempa řeči během promluvy, stupně souladu



Obrázek 4: Kumulovaný součet pro uvedená slova

s veršem a rýmem. Obě skupiny promluv (promluvy zdravých dětí a dětí s vývojovou dysfázií) jsou porovnávány podle délky – doby trvání říkanky. Z obrázku 5 je zřejmé, že říkanka trvá dětem s vývojovou dysfázií déle než zdravým dětem.

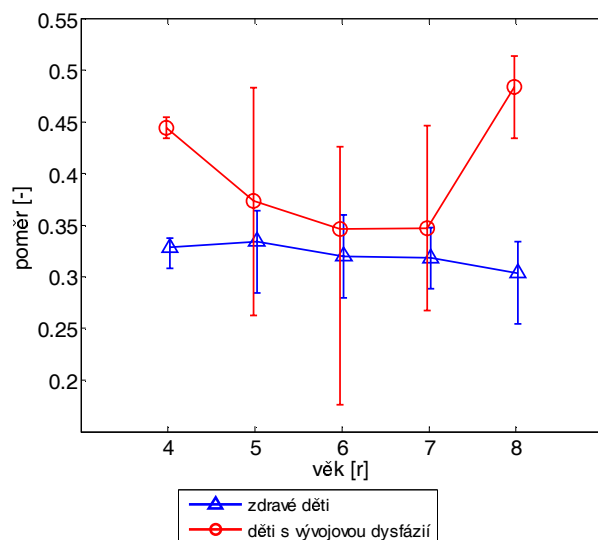


Obrázek 5: Délka říkanky

Dále je sledován poměr trvání pauz vůči celé promluvě, který je také vhodný pro klasifikaci promluv do dvou kategorií – zdravé děti a děti s vývojovou dysfázií (viz obrázek 6). Deficit krátkodobé paměti je zřejmě příčinou, proč si děti s vývojovou dysfázií hůře zapamatují a hůře recitují říkanky – mají větší počet a délku pauz.

4.4. Analýza sibilantů

Analýza sibilantů je prováděna na izolovaných sykavkách nahraných během pořizování databáze. Analýza je založena na rozdílech mezi zdravými dětmi a dětmi s vývojovou dysfázií.



Obrázek 6: Průměrný poměr pauza/celá říkanka pro věkové kategorie

Výpočet spektrálních parametrů byl prováděn v prostředí MATLAB [8] dle matematických vzorců pro výpočet spektrálních momentů. Spektrální těžiště, směrodatná odchylka, spektrální špičatost a spektrální zešíkmení jsou vhodné parametry pro klasifikaci poruchy řeči (viz obrázek 7).

Dalšími parametry vhodnými pro diferenciaci promluv jsou délka výdrže syčení jak pro hlásku /S/, tak i pro /Š/, které jsou znázorněny v obrázku 8 a obrázku 9. Pacienti s vývojovou dysfázií mají problém už jen s vyslovením samostatných /S/ a /Š/, natož s delší výdrží sykavky.

Dalším zajímavým ukazatelem je srovnání této analýzy izolovaných sykavek a analýzy sykavek extrahovaných ze slov „silnice“ a „košile“ v databázi.

4.5. Analýza spontánního projevu

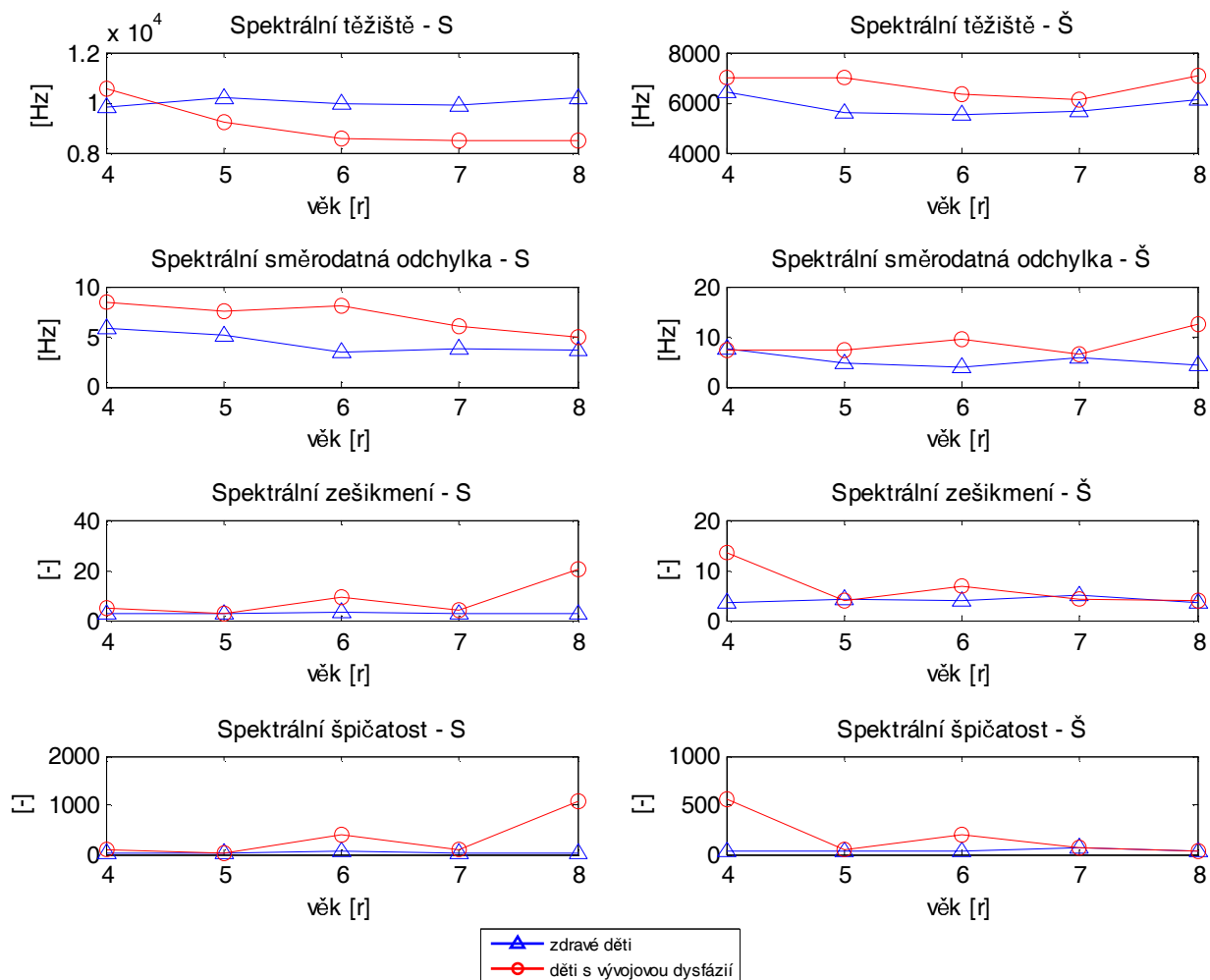
Jak je uvedeno v tabulce 1, byl spontánní projev získáván pomocí popisu sekvence devíti obrázků. Na obrázcích je zobrazena rutinní činnost znázorňující ranní aktivity (od procesu vstávání až po odchod do školy).

V tomto případě můžeme posuzovat míru rozmanitosti projevu. Pacienti s těžkou vývojovou dysfázií jsou většinou schopni popsat činnost pouze pomocí sloves. Jednoduché věty, které obsahují jak předmět, tak i přísudek, jsou průměrným popisem pacientů s lehkou vývojovou dysfázií. Popsat spontánně obrázek rozvíjenými větami jsou schopni ve většině případů pouze zdravé děti.

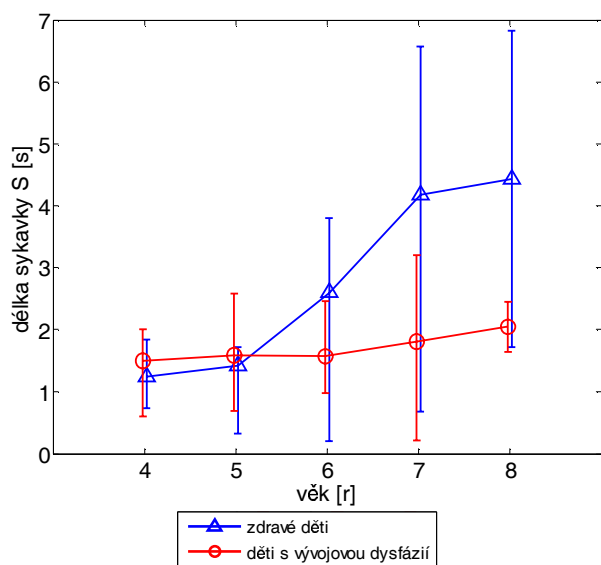
Další vhodné parametry pro hodnocení spontánní promluvy kromě počtu slov, který je na obrázku 10, je například poměr řeč/pauza.

5. Závěr

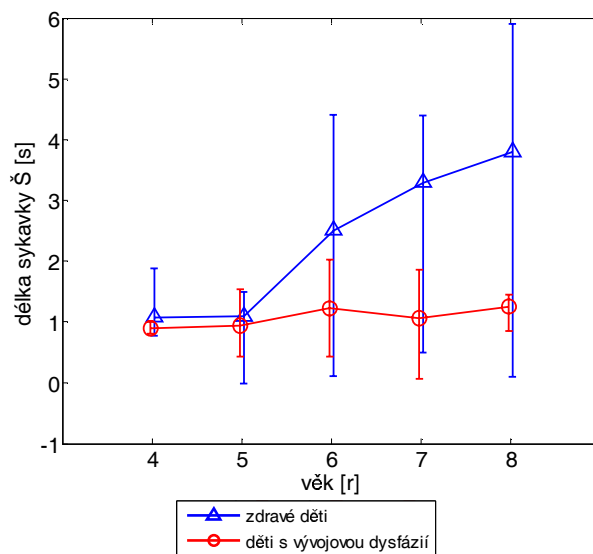
V článku jsou prezentovány první experimenty s hledáním řečových parametrů vhodných pro rozlišení zdravých dětí



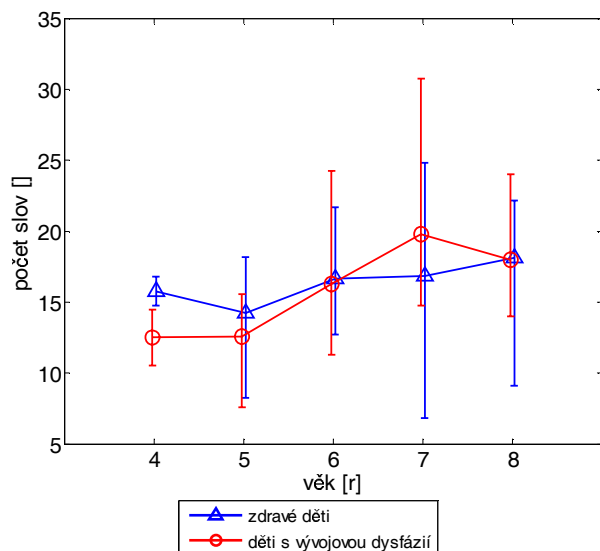
Obrázek 7: Spektrální charakteristiky sibilant /S/ a /Š/



Obrázek 8: Průměrná délka sibilanty /S/



Obrázek 9: Průměrná délka sibilanty /Š/



Obrázek 10: Průměrný počet slov ve spontánním projevu

a dětí trpících vývojovou dysfázií. Jako nejperspektivnější parametry, s ohledem na budoucí realizaci klasifikátoru, se v současné fázi výzkumu jeví především metoda založená na výpočtu kumulované vzdálenosti pomocí DTW. Vhodnými se dále jeví spektrální parametry, délka hlásek, tempo řeči a její změny v průběhu projevu, počet slov a poměr řeč/pauza u spontánního projevu. Význam věkově závislých parametrů F0, F1 a F2 pro klasifikaci není zcela jednoznačný.

V další etapě výzkumu bude systematicky rozšiřována databáze pacientů v různých věkových kategoriích, zejména 3–4 a 9–12 let. Rovněž bude pokračováno v hledání a hodnocení dalších parametrů. Statisticky, s ohledem na budoucí klasifikaci, bude vyhodnocen význam věkově závislých parametrů. V současnosti již proběhly první testy subjektivního hodnocení věku dvěma logopedkami a třemi laiky. Ve spolupráci s foniatry a klinickými logopedy bude dále pokračováno v provádění fonologických analýz a labelování.

Poděkování

Tento výzkum byl podporován z grantu GAČR 102/08/H008 „Analýza a modelování biomedicínských a řečových signálů“, SGS10/180/OKH3/20/13 „Hodnocení poruch hlasu a řeči“ a výzkumného záměru MSM6840770012 „Transdisciplinární výzkum v oblasti biomedicínského inženýrství II“.

Reference

- [1] Škodová, E., Jedlička, I. a kolektiv: *Klinická logopedie – 2. aktualizované vydání*, PORTÁL, Praha, 2007.
- [2] Janda, J.: Studie věkově závislých akustických parametrů v dětské řeči. *Studie k odborné rozpravě*, ČVUT FEL, 2010.
- [3] Schötz, S.: Perception, Analysis and Synthesis of Speaker Age. *Doctoral Thesis*, Lund University, 2006.
- [4] Potamianos, A.: A review of the acoustic and linguistic properties of children's speech. *Multimedia Signal Processing*, 2007.
- [5] Praat: doing phonetics by computer (Version 5.1.05) [Computer program], <http://www.praat.org/>
- [6] Wavesurfer: doing phonetics by computer [Computer program], <http://www.speech.kth.se/wavesurfer/>
- [7] Zlatník, P., Čmejla, R.: Disordered Speech Assessment Using Different Speech Parameterizations. In *19th International Congress on Acoustics*. Madrid: Sociedad Española de Acústica, 2007, s. 1–4.
- [8] Matlab: mathematic application (Version R2009b) [Computer program], <http://www.mathworks.com/>

Popis spektrálních vlastností sibilantů /s/, /š/, /z/ a /ž/ na základě LSP parametrizace

Adam Stráník a Roman Čmejla

ČVUT–FEL, Technická 2, 166 27 Praha 6
e-mail: [stranada;cmejla]@fel.cvut.cz

This paper deals with quantitative description of a power spectrum of Czech sibilants /s/, /š/, /z/, /ž/ using Line Spectral Pairs (LSP) parametrisation. A brief introduction to LSP and several experiments with signal description by LSP and signal periodicity was performed. According to the parametrisation, two classifiers were developed – the first classifier that does not use signal periodicity description is able to classify 95.2 % of microsegments from the input database correctly, the second classifier using signal periodicity description increases the amount of correctly classified microsegments up to 96.8 %.

1. Úvod

Sibilanty /s/, /š/, /z/, /ž/ jsou v běžné mluvě velmi často používané a kvůli jejich výrazným šumovým vlastnostem také často subjektivně hodnocené posluchačem. Pokud někdo tyto hlásky vyslovuje špatně, může být výsledný vjem velmi negativní. Proto lidé často chodí k logopedovi ve snaze zlepšit jejich výslovnost.

Z literatury (např. [1]) a vlastních experimentů vyplývá, že při tvorbě hlásek /s/ a /z/ jsou ve spektru zastoupeny vyšší frekvence a hlavní energie je soustředěna v užším frekvenčním pásmu než při tvorbě hlásek /š/ a /ž/. Dále je známo [1], že při tvorbě /z/ a /ž/ jsou v činnosti hlasivky, zatímco při tvorbě /s/ a /š/ nejsou. Tato fakta vypovídají o tom, že spektra těchto hlásek budou značně rozdílná. K popisu spektrálních vlastností sibilantů, jako jsou hlavní lalok energie a jeho šířka, je použita parametrizace známá pod názvem Line Spectral Pairs (LPS), resp. Line Spectral Frequencies (LSF).

2. Princip tvorby sibilantů

Sibilanty jsou frikativní hlásky, při jejichž tvorbě dochází ke zúžení části hlasového traktu, na kterém dochází ke tření vzduchu proudícího z plic, a tím pádem i k charakteristickému šumu. Mezi tyto hlásky patří prealveolární (předodásňové) /s/, /z/ a postalveolární (zadodásňové) /š/, /ž/ [1].

Při tvorbě hlásek /s/ a /z/ zúžení vzniká těsným přitisknutím podélných okrajů jazyka k horní dásni. Štěrbina zůstává mezi hřbetem špičky jazyka a přední částí alveol. Retní štěrbina bývá poměrně úzká. Při tvorbě hlásky /z/ jsou zapojeny hlasivky, zatímco při tvorbě hlásky /s/ hlasivky zapojeny nejsou.

Při tvorbě hlásky /š/ a /ž/ je zúžení vytvořeno přitisknutím okrajů jazyka po stranách k horní dásni, hlavní zúžení je ovšem oproti /s/ a /z/ posunuté více dozadu, tzn. dále od zubů. Štěrbina zůstává mezi hřbetem přední části jazyka a zadní části alveolárního výstupku. Hrot jazyka bývá také často skloněn dolů [1].

3. Databáze

Databáze byla pořízena v odhlučněné místnosti magnetofonem Edirol R-09HR se zapojeným mikrofonem Beyerdynamic Opus 55.09 MK II SC. Na magnetofonu byla nastavena vzorkovací frekvence $f_s=44,1$ kHz a rozlišení 16 bitů na vzorek. Zesílení mikrofonního vstupu bylo nastaveno na hodnotu 60, bylo zapnuto fantomové napájení mikrofonu a vypnuty veškeré omezovače a filtrování vstupního signálu.

Mikrofon byl umístěn na levé straně obličeje, cca 2 až 3 cm od koutku úst. Během nahrávání byla prováděna poslechová kontrola, zda výdechový proud nenaráží přímo na mikrofon.¹

Bylo pořízeno celkem 39 nahrávek, z toho 36 mužů a 3 ženy. Věkové rozmezí nahrávaných osob je $30 \pm 8,7$ let. Každá osoba měla postupně provést prodlouženou realizaci hlásky /s/, /š/, /z/, /ž/, každou cca 2 sekundy. Mezi jednotlivými hláskami byla cca 2 sekundy pauza. Dále byly v následujícím pořadí nahrány plynulé přechody mezi hláskami: /s/ → /š/ → /s/, /z/ → /ž/ → /z/, /s/ → /z/ → /s/, /š/ → /ž/ → /š/. Každá hláska v sérii měla být prováděna alespoň 2 sekundy, pauza mezi jednotlivými sériemi byla opět cca 2 sekundy.

4. Výpočet a vlastnosti LSP

Popis hlasového signálu pomocí LSP je založen na válcovém modelu hlasového traktu – trakt je možné modelovat sadou válců stejné délky, ale různého průměru, které jsou do sebe zasunuté. Pokud bude těmito válci proudit vzduch, bude docházet k různým rezonancím v závislosti na tom, zda bude tento model na konci otevřený nebo uzavřený (otevření a uzavření hlasivek, úst atp.), přičemž počet rezonančních frekvencí závisí na počtu válců, kterými je hlasový trakt modelován, tedy na řádu modelu. Takový model je často popisován pomocí lineární prediktivní analýzy (Linear Predictive Coding – LPC). Pozice a šířky re-

¹Narážení výdechového proudu na mikrofon má za následek nárůst energie na nižších frekvencích.

zonančních frekvencí je možné popsat právě pomocí LSF, které přímo souvisí s LSP.

LSP je polynom k -tého řádu, jehož komplexní kořeny Θ_k jsou LSF. Pokud tyto kořeny seřadíme, dostaneme páry čísel (sudý a lichý kořen) – frekvencí, které popisují umístění a šířku rezonančních frekvencí hlasového traktu.

4.1. Výpočet LPC

Vlastnosti LPC vychází z toho, že je možné aproximovat n -tý vzorek signálu x jako lineární kombinaci M předchozích vzorků

$$\hat{x}[n] = \sum_{m=1}^M a_m x[n-m], \quad (1)$$

kde $\hat{x}[n]$ je odhad n -tého vzorku a a_m je váha daného předchozího vzorku. Výpočet vah a_m je popsán např. v [2], výsledný LPC model je popsán polynomem

$$A(z) = 1 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_M z^M, \quad (2)$$

což je LPC model M -tého řádu.

4.2. Výpočet LSP

Pokud zavedeme dva polynomy $P(z)$ a $Q(z)$ řádu $(M+1)$, které jsou antisymetrické² a mají k polynomu $A(z)$ vztah

$$A(z) = \frac{P(z) + Q(z)}{2}, \quad (3)$$

získáme LSP polynomy $P(z)$ a $Q(z)$. Koeficienty těchto polynomů lze získat ze vztahů

$$P(z) = A(z) - z^{-(M+1)} A(z^{-1}), \quad (4)$$

$$Q(z) = A(z) + z^{-(M+1)} A(z^{-1}). \quad (5)$$

4.3. Výpočet LSF

Lze dokázat ([3] nebo [4]), že komplexní kořeny Θ_k LSP polynomů, tedy LSF, leží v z rovině na jednotkové kružnici a jsou navzájem proložené.

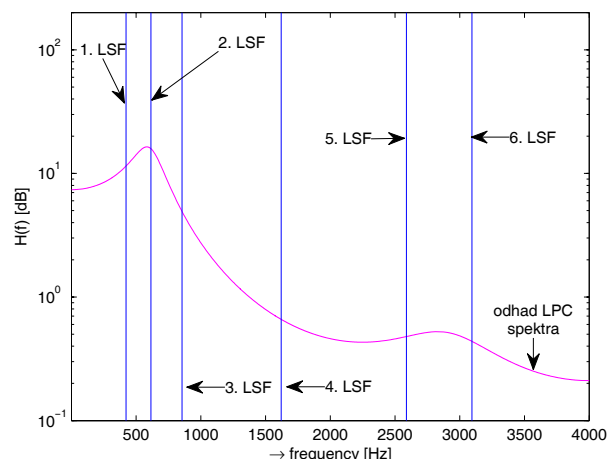
Samotné frekvence ω_k lze vypočítat z komplexních kořenů Θ_k LSP polynomů následovně

$$\omega_k = \tan^{-1} \left(\frac{\Re(\Theta_k)}{\Im(\Theta_k)} \right). \quad (6)$$

Dále lze dokázat ([3] nebo [4]), že vzhledem k tomu, že polynomy jsou navzájem antisymetrické, odpovídá polynom $P(z)$ modelu otevřeného hlasového traktu a polynom $Q(z)$ modelu uzavřeného hlasového traktu. Pro další matematická odvození a zpětné přepočty mezi LPC a LSP viz [3] nebo [4]. Vylepšený výpočet LSP viz [5].

LSF jsou obvykle v LPC spektru zobrazeny svislými čarami, viz obr. 1.

²Polynom $A^\#(z)$ je antisymetrický k polynomu $A(z)$, jestliže $A^\#(z) = -A(z)$.



Obrázek 1: Ukázka odhadu spektra pomocí LPC modelu 6. řádu pro hlásku /a/ s vyznačenými LSF

4.4. Parametrizace založené na LSF

Pro popis spektrálních vlastností signálu byly zavedeny následující dva parametry:

Diference LSF $\rightarrow$ dLSF $_{a,b}$

Parametr dLSF $_{a,b}$ je dán vztahem

$$\text{dLSF}_{a,b} = \omega_i - \omega_{i-1}, \quad (7)$$

kde ω je frekvence vypočtená ze vztahu (6) a i je přirozené kladné sudé číslo nejvýše rovné řádu LSP polynomů a kde $a = i - 1$, $b = i$.

Tento parametr jednoduchým způsobem popisuje, jak významný je nárůst energie ve frekvenční oblasti mezi LSF – čím je dLSF $_{a,b}$ menší, tím významnější je nárůst mezi a -tou a b -tou LSF a naopak, pokud je difference příliš vysoká, může se jednat o lokální minimum energie.

Průměr LSF $\rightarrow$ mLSF $_{a,b}$

Parametr mLSF $_{a,b}$ je dán vztahem

$$\text{mLSF}_{a,b} = \frac{1}{2} (\omega_{i-1} + \omega_i), \quad (8)$$

kde ω je frekvence vypočtená ze vztahu (6) a i je přirozené kladné sudé číslo nejvýše rovné řádu LSP polynomů a kde $a = i - 1$, $b = i$.

Tento parametr zhruba odpovídá pozici lokálního maxima případně minima energie mezi LSP – o minimum se jedná, pokud je difference mezi LSP příliš velká.

5. Parametrizace

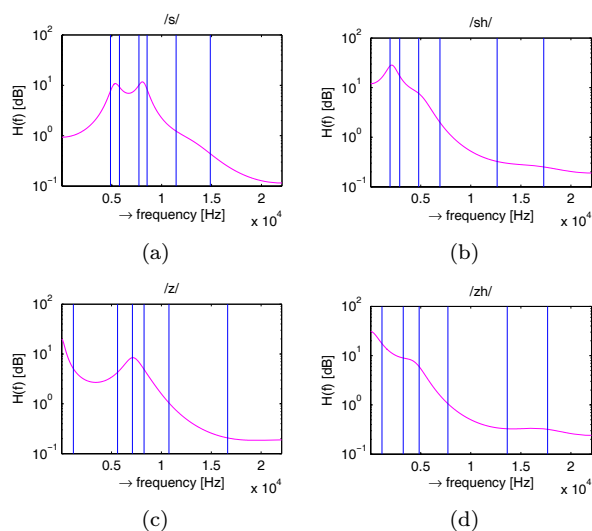
Signály byly analyzované LPC modelem 6. řádu. Takto nízký řád pro analýzu sibilantů plně postačuje, poskytuje dostatečně vyhlazený odhad LPC spektra. LPC model byl

počítán v mikrosegmentech délky 20 ms, mikrosegmenty se překrývaly z 50 %.

Na obr. 2 je zobrazeno typické LPC spektrum 6. řádu s vyznačenými LSF pro sibilanty /s/, /š/, /z/, /ž/. Porovnání jasně ukazuje, že sibilanty /s/ a /z/ (obr. 2(a) a 2(c)) mají ve spektru zastoupené vyšší frekvence než sibilanty /š/ a /ž/ (obr. 2(b) a 2(d)). Běžně se vyskytuje výrazné a významně užší lokální maximum energie v oblasti nad 5 kHz. Dále je patrné, že vzhledem k zapojení hlasivek při tvorbě hlásek /z/ a /ž/ (obr. 2(c) a 2(d)) jsou ve spektru více zastoupené i nižší frekvence.

Časový vývoj mLSF a dLSF v jednom souboru je zobrazen na obr. 3. Z obrázku je patrné, že při tichu jsou mLSF (obr. 3(a)) ve spektru rovnoměrně rozprostřené, zatímco při tvorbě sibilantů dochází k jejich přemístění okolo maxim energie ve spektru. Podobně je z obr. 3(b) patrné přiblížení nebo oddálení LSF okolo maxim energie.

Na obr. 4 a 5 jsou zobrazeny distribuce hodnot parametrů dLSF_{a,b}, resp. mLSF_{a,b} v jednotlivých hláskách. Nejvýznamnější rozdíly mezi jednotlivými hláskami jsou pro parametr dLSF_{1,2} (obr. 4(a)), mLSF_{1,2} (obr. 5(a)) a mLSF_{3,4} (obr. 5(b)).

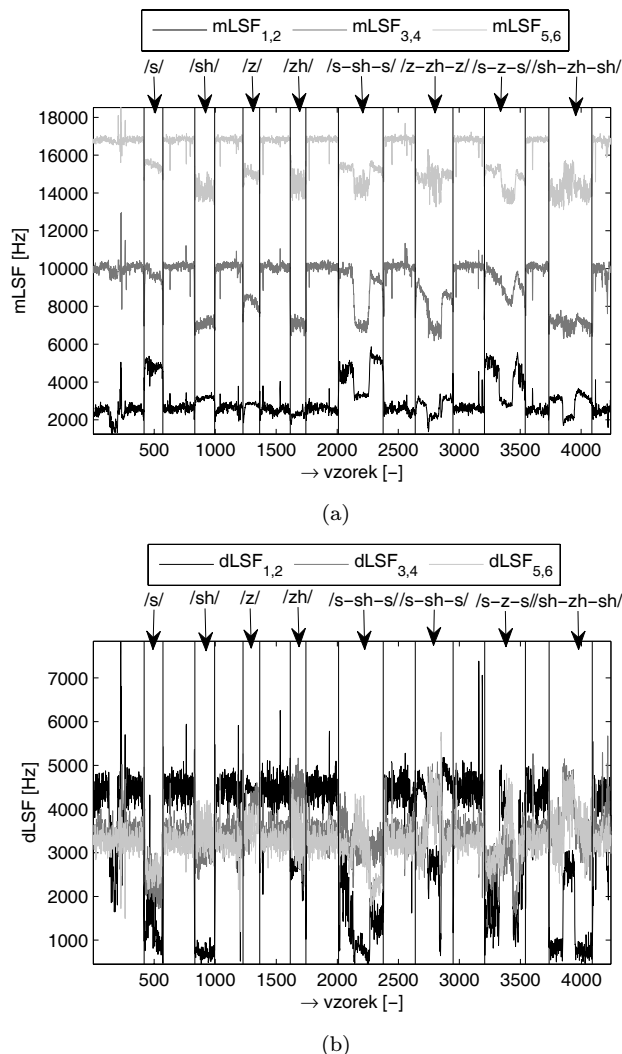


Obrázek 2: Ukázka LPC spektra s vyznačenými LSF u hlásky (a) /s/, (b) /š/, (c) /z/, (d) /ž/

5.1. Vstupní parametry experimentů

Pro hledání nejvhodnějšího klasifikátoru byly z každé nahrávky vyjmuty prodloužené realizace hlásek /s/, /š/, /z/ a /ž/ a pauzy mezi jednotlivými realizacemi. Ačkoliv jsou tyto úseky označeny jako /ticho/, jsou v nich zaznamenány nádechy a různé další zvuky spojené s nahráváním.

Tyto úseky byly poté rozděleny na mikrosegmenty délky 20 ms. Překryv jednotlivých mikrosegmentů byl 10 ms.



Obrázek 3: Časové průběhy (a) mLSF, (b) dLSF pro vstupní nahrávku

5.2. Zavedení popisu znělosti signálu

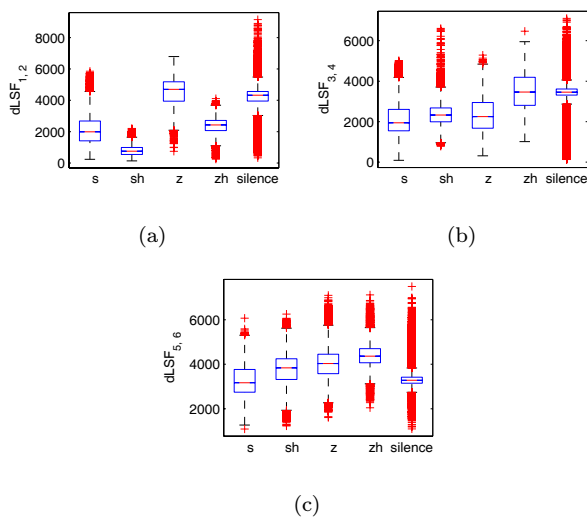
Vzhledem k rozdílné znělosti hlásek /s/, /š/ a /z/, /ž/ byl do vektoru parametrizace signálu přidán parametr, který jistým způsobem popisuje míru periodicity (tedy znělosti) signálu, a sice parametr Signal Periodicity Strenght (SPS), který je dán vztahem

$$SPS = \begin{cases} 0 & \text{pokud } AMF > 300\text{Hz}, \\ ACR(AMF) & \text{pokud } AMF \leq 300\text{Hz}. \end{cases} \quad (9)$$

AMF je pozice maxima autokorelační funkce v Hz, ACR(AMF) je hodnota autokorelační funkce v maximu. AMF lze spočítat ze vztahu

$$AMF = \frac{f_s}{k_{\max}}, \quad (10)$$

kde f_s je vzorkovací frekvence signálu a $k_{\max}$ je index maxima autokorelační funkce.



Obrázek 4: Distribuce parametru $dLSF_{a,b}$ pro jednotlivé hlásky: (a) $dLSF_{1,2}$, (b) $dLSF_{3,4}$, (c) $dLSF_{5,6}$

Před výpočtem autokorelační funkce byl signál filtrován dolní propustí reprezentovanou FIR filtrem 20. řádu se zlomovým kmitočtem na 3 kHz a až poté segmentován.

Index maxima autokorelační funkce $k_{\max}$ je získán jako pozice maxima signálu v úseku po nejmenším minimu signálu. Tento postup je zvolen především s ohledem na fakt, že autokorelační funkce u hlásek /z/ a /ž/ obsahuje kromě řady lokálních „vysokofrekvenčních“ maxim i ptich periodu, viz obr. 6(a).

Distribuce parametru SPS mezi jednotlivými hláskami je zobrazena na obr. 6(b). Zde je dobře patrný rozdíl ve znělosti hlásek – hlásky /s/ a /š/ dosahují významně nižších hodnot než hlásky /z/ a /ž/.

6. Výsledky

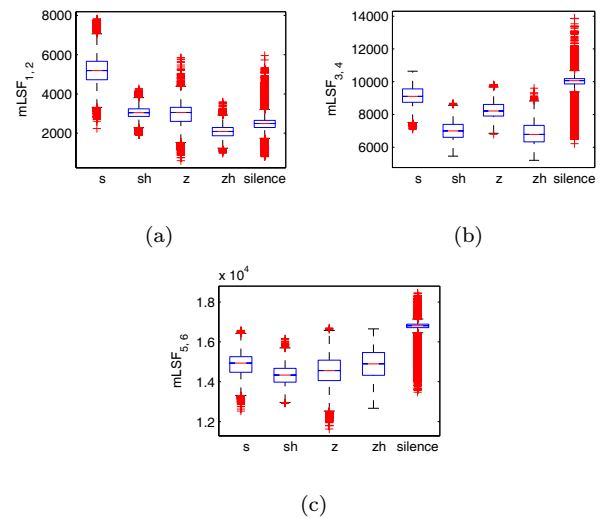
Parametrizovaný signál byl zpracován programem WEKA [6] ve snaze nalézt vhodný klasifikátor. Požadavky na klasifikátor byly především úspěšnost klasifikace a jednoduchost klasifikátoru. Počty mikrosegmentů pro jednotlivé klasifikační třídy jsou uvedeny v tab. 1.

třída	/s/	/š/	/z/	/ž/	/ticho/
počet	7 514	8 394	7 584	7 641	57 228

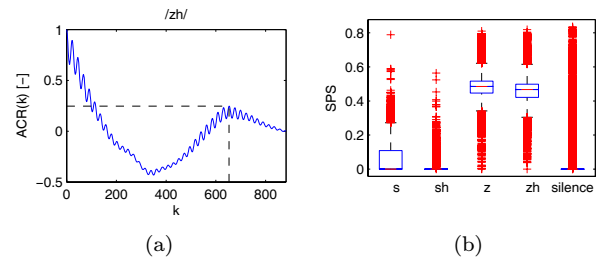
Tabulka 1: Počty mikrosegmentů pro jednotlivé třídy

Výsledky jsou pro přehlednost rozděleny na dvě části – v první části je popsán klasifikátor, který neobsahuje parametr SPS, a klasifikátor popsán ve druhé části tento parametr obsahuje. V obou případech byl použit klasifikátor založený na algoritmu C4.5 [7], který je reprezentován rozhodovacím stromem. Nastavení parametrů algoritmu je v obou případech stejné.³

³Minimální počet instancí na list, zda se má strom prořezávat apod., více v [7].



Obrázek 5: Distribuce parametru $mLSF_{a,b}$ pro jednotlivé hlásky: (a) $mLSF_{1,2}$, (b) $mLSF_{3,4}$, (c) $mLSF_{5,6}$



Obrázek 6: (a) ukázka typické autokorelační funkce pro hlásku /ž/ s vyznačenou hodnotou AMF (svisle přerušovaně) a ACR(AMF) (vodorovně přerušovaně), (b) distribuce hodnot ACR(AMF) u jednotlivých hlásek

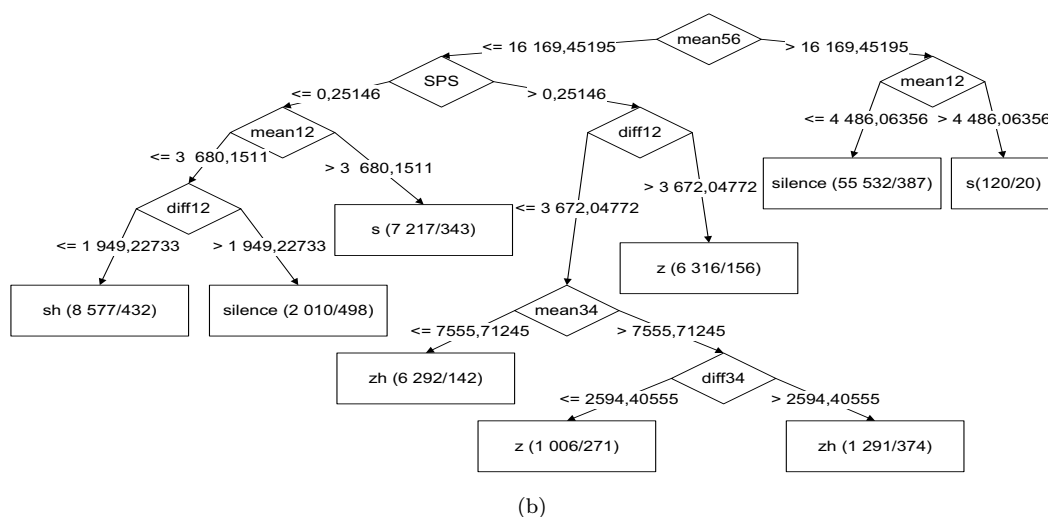
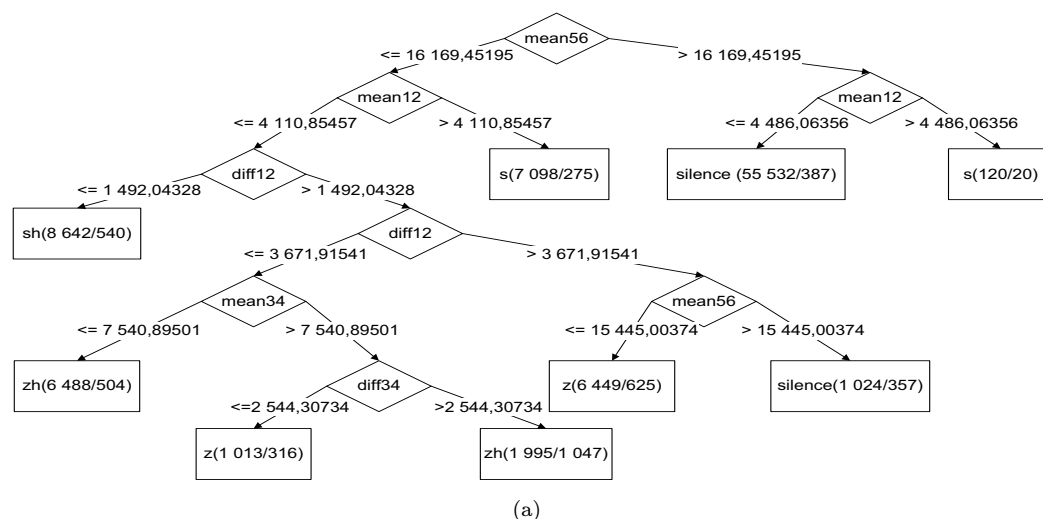
6.1. Klasifikátor bez znalosti SPS

Nalezený klasifikátor reprezentovaný stromem na obr. 7(a) zařadí správně 95,2% analyzovaných mikrosegmentů. Z obrázku je patrné, že strom je kompaktní, v nejhorším případě je nutných pouze šest porovnání.

Z konfúzní matice klasifikátoru (tab. 2) je možné odečíst, jak výsledný klasifikátor nejčastěji zaměňuje klasifikaci (tzn. snižuje přesnost) jednotlivých mikrosegmentů signálu. Podle předpokladu dochází nejčastěji k záměně /s/ → /z/, /š/ → /ž/ a /ž/ → /š/. Dále je poměrně častá záměna /z/ → /ž/, která ovšem nesouvisí se znělostí segmentu.

/s/	/š/	/z/	/ž/	/ticho/	← klasifikováno
6 808	12	459	104	131	/s/
12	8 092	16	274	0	/š/
181	6	6 494	341	562	/z/
0	385	149	6 865	242	/ž/
71	159	383	732	55 876	/ticho/

Tabulka 2: Konfúzní matice klasifikátoru bez znalosti SPS



Obrázek 7: Vizualizace rozhodovacího stromu klasifikátoru (a) bez znalosti, (b) se znalostí SPS. Údaj v listech stromu popisuje, s jakou přesností daný list klasifikuje. Údaj je ve tvaru „třída (celkem instancí / špatně klasifikovaných instancí)“. $mean56$ – $mLSF_{5,6}$, $mean12$ – $mLSF_{1,2}$, $diff12$ – $dLSF_{1,2}$, $silence$ – /ticho/, zh – /ž/, z – /z/, sh – /š/, s – /s/

6.2. Klasifikátor se znalostí SPS

Po zavedení příznaku znělosti se úspěšnost klasifikátoru zvýšila na 96,8 % a z konfúzní matice v tab. 3 lze vyčíst, že došlo ke zlepšení klasifikace mezi znělými a neznělými hláskami. Zvýšila se ovšem chybovost klasifikace do třídy

/s/	/š/	/z/	/ž/	/ticho/	← klasifikováno
6 902	3	236	49	324	/s/
201	8 138	4	22	29	/š/
28	1	6 939	321	295	/z/
5	160	172	7 022	282	/ž/
170	276	93	79	56 610	/ticho/

Tabulka 3: Konfúzní matice klasifikátoru se znalostí SPS

/ticho/. Rozhodovací strom klasifikátoru je na obr. 7(b). Z obrázku je patrné, že strom je „jednodušší“ než v před-

chozím případě – v nejhorším případě je nutných pouze pět porovnání.

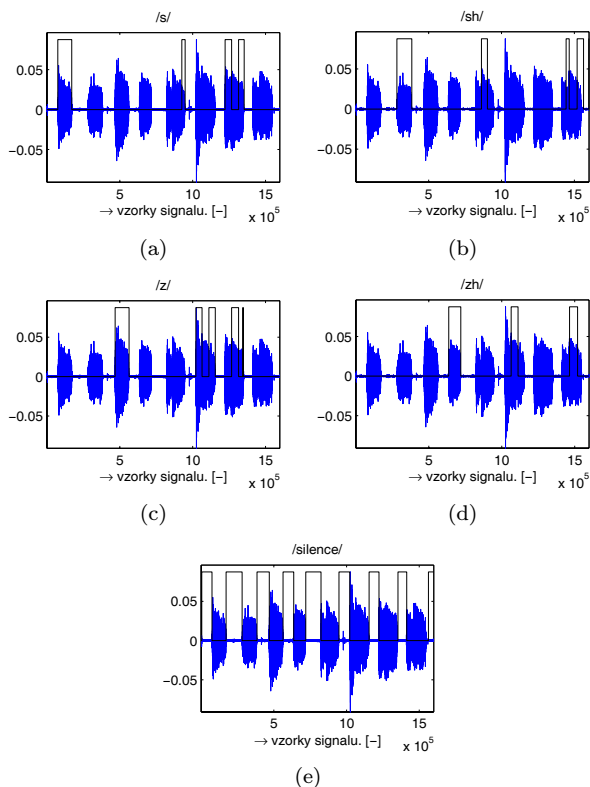
6.3. Porovnání klasifikátorů

V tab. 4 je shrnuta úspěšnost klasifikace obou klasifikátorů. Z porovnání vyplývá, že se zavedením popisu periodicity mikrosegmentu výrazně vzrostla úspěšnost klasifikace do tříd /z/ a /ž/, zároveň ovšem nepatrně vzrostla chybovost určení třídy /s/ – třída /s/ je častěji klasifikována do jiné třídy.

Výsledek klasifikace jednoho vstupního souboru klasifikátorem se znalostí periodicity segmentu je na obr. 8.

7. Závěr

Byla ověřena možnost klasifikace prodloužené realizace silantů /s/, /š/, /z/, /ž/ na základě popisu jejich spek-



Obrázek 8: Ukázka klasifikace jednotlivých hlásek se znalostí SPS na vstupním signálu po odstranění „překmitů“, (a) /s/, (b) /š/, (c) /z/, (d) /ž/, (e) /ticho/. Signál je ve tvaru /ticho/ – /s/ – /ticho/ – /š/ – /ticho/ – /z/ – /ticho/ – /ž/ – /ticho/ – /s → š → s/ – /ticho/ – /z → ž → z/ – /ticho/ – /s → z → s/ – /ticho/ – /š → ž → š/ – /ticho/

trálních vlastností. K popisu spektrálních vlastností byla použita parametrizace signálu pomocí LSF, resp. dvou odvozených parametrů, dSLF (7) a mLSF (8), a dále byl použit parametr SPS 9.

Na základě této parametrizace signálu byl nalezen klasifikátor, který je schopný rozhodnout, zda mikrosegment obsahuje realizaci prodloužené hlásky /s/, /š/, /z/, /ž/ nebo ticho (resp. ani jednu ze zmíněných hlásek). Klasifikátor je založen na algoritmu C4.5 [7], jehož výstupem je rozhodovací strom.

Klasifikátor bez znalosti SPS reprezentovaný stromem na obr. 7(a) určí správně 95,2 % mikrosegmentů ze vstupní databáze nahrávek. Ke zlepšení přesnosti přispělo zavedení popisu periodicity segmentu parametrem SPS, rozhodovací strom takového klasifikátoru je na obr. 7(b), úspěšnost se zvýšila na 96,8 %.

Poděkování

Tato práce je podporována **GACR102/08/H008 Analýza a modelování biomedicínských a řečových signálů**, **SGS10/180/OHK3/2T/13 Hodnocení poruch hlasu a řeči** a **MSM6840770012 Transdisciplinární výzkum v oblasti biomedicínského inženýrství II**.

	třída	TP	FP	přesnost
bez SPS	/s/	0,906	0,003	0,963
	/š/	0,964	0,007	0,935
	/z/	0,856	0,012	0,866
	/ž/	0,898	0,018	0,825
	/ticho/	0,976	0,030	0,984
s SPS	/s/	0,919	0,005	0,945
	/š/	0,970	0,006	0,949
	/z/	0,915	0,006	0,932
	/ž/	0,919	0,006	0,937
	/ticho/	0,989	0,030	0,984

Tabulka 4: Porovnání přesností klasifikátoru bez znalosti parametru SPS a se znalostí parametru SPS. TP – (*true positive rate*) poměr správně klasifikovaných instancí dané třídy ku všem instancím klasifikovaným do dané třídy, FP – (*false positive rate*) poměr špatně klasifikovaných instancí dané třídy ku všem instancím dané třídy, přesnost – přesnost klasifikace do dané třídy.

Reference

- [1] PALKOVÁ, Z.: *Fonetika a fonologie češtiny*, 1994, 367 s.
- [2] PSUTKA, J. et al.: *Mluvíme s počítačem česky*, Praha: Academia, 2006, 752 s.
- [3] MCLOUGHLIN, I. V.: LineSpectral pairs, *Signal processing*, 2008, 88, s. 448–467. Dostupný také z WWW: <www.sciencedirect.com>.
- [4] BÄCKSTRÖM, T., MAGI, C.: Properties of line spectrum pair polynomials: A review, *Signal processing*, 2006, 88, s. 3286–3298. Dostupný také z WWW: <www.sciencedirect.com>.
- [5] YUAN, Z.: *The Weighted Sum of the Line Spectrum Pair for Noisy Speech*, Helsinki, 2003, 52 s. Diplomová práce, Helsinki University of Technology.
- [6] HALL, M. et al.: The WEKA Data Mining Software: An Update; SIGKDD Explorations, 2009, Volume 11, Issue 1.
- [7] KOTSIANTIS, S. B.: Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques, *Informatica*, 31(2007), s. 249–268.

Simple Loudspeaker-driven Acoustic Compressor

Martin Šoltés a Milan Červenka

Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering,
Technická 2, 166 27 Prague 6, Czech Republic
e-mail: soltemar@fel.cvut.cz

Práce popisuje experimentální štúdiu jednoduchého akustického kompresoru budeného reproduktorem. Najprv je ukázané, že vďaka komplikovanej vnútornej geometrii tlakového reproduktoru je akustický rezonančný systém, ktorý vznikne pripojením reproduktoru k trubici vhodnej dĺžky, rozladený (disonantný). To môže byť ďalej zvýraznené použitím vhodného tvaru dutiny pripojenej trubice. Rozladenie vyšších módov umožňuje vytvorenie stojatej vlny veľkej amplitúdy bez prítomnosti rázovej vlny. Ďalej je ukázané, že doplnením rezonančného systému o jazýčkový ventil a nasávací otvor je možné zkonštruovať jednoduchý akustický kompresor.

1. Introduction

High-amplitude standing waves in closed tubes (resonators) have been studied extensively by many researchers. It has been observed, and is now a well known fact, that when resonators of cylindrical shape are excited at their resonant frequency, acoustic energy is transferred from the fundamental to higher harmonics due to the non-linear properties of fluid. This leads to distortion of the wave profile and eventually to shock formation. Because dissipation of acoustic energy is directly proportional to the square of the frequency, shock formation sets the upper limit for maximum acoustic pressure in such a tube – the effect known as acoustic saturation. This effect is undesirable for any practical purposes, hence several techniques for achieving high amplitude, shock-free oscillations have been proposed. The most well-known method is RMS (Resonant Macrosonic Synthesis) which utilizes appropriately designed tubes of non-uniform cross-sections. These so-called dissonant resonators (term introduced by Ilinskii et al. [1]), have higher resonant modes at frequencies that are not integer multiples of the fundamental resonance as opposed to a consonant resonator (resonator with uniform cross-section), where frequencies of modes are frequency-coincident with the harmonics of a standing wave inside the resonator. Transfer of acoustic energy into higher harmonics in a dissonant resonator is therefore greatly reduced, as is acoustic saturation and high amplitude shock-free waves are possible. Other techniques involve using multiple Helmholtz resonators tuned close to the second harmonics frequency arranged along the tube [2] or use of feedback to dampen the second harmonics where the resonator is driven at two frequencies – fundamental resonance and second harmonics whose phase and gain are controlled by a feedback mechanism [3]. Once high amplitude waves are established in the resonator, it is possible to construct the acoustic compressor.

One of the possible ways of constructing an acoustic compressor (which we adopt here) is to install a suction port in the resonator wall where the standing wave has its pressure node and a delivery port (with valve in our

case) in the resonator wall where the standing wave has its anti-node. With rising acoustic pressure amplitude, at pressure anti-node a dc component emerges resulting in the rise of static pressure level inside the resonator at pressure anti-node above the ambient atmospheric pressure level. This creates a static pressure gradient inside the resonator, causing air flow between suction and delivery port. However the value of air mass flow-rate is very small [2]. By installing a delivery valve, much higher values of mass flow-rate could be achieved. A reed-type valve is commonly used, thanks to its ability to operate at high frequencies. The valve opens when acoustic pressure inside the resonant cavity rises above the atmospheric pressure and closes when acoustic pressure falls below the atmospheric pressure resulting in one-way air flow.

In most of the experiments conducted so far, the usual way of introducing sound wave into the resonator was performed by moving (shaking) the whole resonator (sealed at both ends) along its axis or by a vibrating piston installed in one of the resonator ends. In this study we adopt a different approach – we excite a cavity with a loudspeaker driver attached to one of the tube ends. Use of a loudspeaker driver is advantageous as it is less expensive compared to linear motors or shakers used in the above-mentioned cases. More interestingly, it helps to attain a high-amplitude shock-free acoustic field. First we show that simply by attaching a loudspeaker driver to the tube, a dissonant resonator is created and shock-free high amplitude waves could be achieved. Next, we investigate the possibility of creating a simple acoustic compressor by installing a suction port in the resonator wall and a delivery valve at the resonator end.

2. Experiment

2.1. High amplitude shock-free sound waves

In our first experiment, we have used BMS-4591 loudspeaker driver unit (with $8\ \Omega$ nominal impedance) attached to one end of the tube while the other end was sealed. The electric signal is provided by the INSTEK

GFG-8020H function generator and MACKIE M-1400 amplifier. Power-handling capacity of the BMS driver is 150 W RMS above 400 Hz (due to manufacturer's specification). Two different tubes were used; one with cylindrical

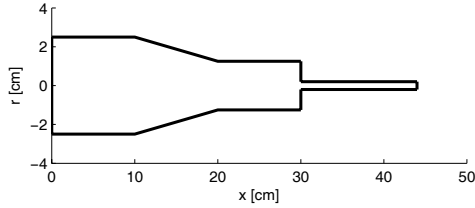


Figure 1: Resonator cavity with variable cross-section

cal constant cross-sectioned cavity (in the remaining text we refer to an acoustic system consisting of a loudspeaker driver attached to the cylindrical cavity as Res. 1) to see what effect the loudspeaker driver has on the cylindrical resonator. As studies [4], [5] have shown that in a resonator with a variable cross-section very high acoustic pressures could be achieved, another tube we have used had a variable cross-section cavity (we use the name Res. 2 for the acoustic system consisting of a loudspeaker driver attached to the varying cross-section cavity). The cylindrical cavity has length of 30 cm and diameter of 5 cm, the shape of the variable cross-section cavity (Fig. 1) is described by the formula (all dimensions are in cm)

$$r(x) = \begin{cases} 2.5 & 0 \leq x \leq 10, \\ 3.75 - 0.125x & 10 \leq x \leq 20, \\ 1.25 & 20 \leq x \leq 30, \\ 0.2 & 30 < x \leq 43. \end{cases}$$

This geometry, as it was found beforehand by means of numerical analysis of Websters equation, causes disonance of the higher modes and increase of acoustic pressure amplitude in the narrower side. The geometry is simple enough for inexpensive manufacturing. Thanks to the rather com-

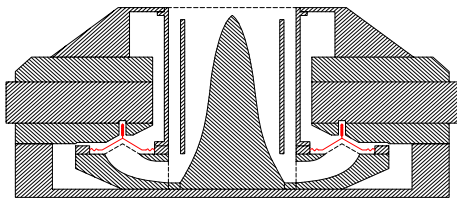


Figure 2: Cross-sectional view of the BMS driver

plicated internal geometry of the loudspeaker driver unit (which is essentially formed by a resonator with varying cross-section, see Fig. 2) and the diaphragm characteristics, the input acoustic impedance of the loudspeaker driver unit is frequency-dependent (Fig. 3). Acoustic impedance was measured using two identical BMS-4591 loudspeaker drivers (one acting as a source, another one as a load) attached to the sides of cylindrical resonator of

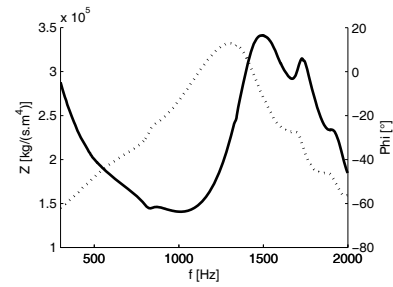


Figure 3: Acoustic impedance measured at loudspeaker driver mouth (magnitude is represented by solid line, phase is represented by dotted line)

known acoustic impedance. Input acoustic impedance of cylindrical tube is given by [6]

$$Z_c = \frac{\rho_0 c_0}{S_0} i \sin(kl), \quad (1)$$

where ρ_0 is density of the medium, c_0 is sound velocity, S_0 is cross-section area of the tube, k is wave number and l is length of the tube.

Input acoustic impedance of the BMS-4591 loudspeaker driver is then given by [6]

$$Z_{ac} = \frac{Z_c}{\frac{p_1}{p_2} - 1 + \frac{\sin(kl)}{\cot(\frac{kl}{2})}}, \quad (2)$$

where p_1 is acoustic pressure measured at one end of the tube – at the mouth of the source loudspeaker, p_2 is acoustic pressure measured at other end of the tube – at the mouth of the load loudspeaker.

When such a type of loudspeaker driver is attached to the cylindrical (or any other shape) cavity, absorption and reflection of incident wave is frequency-dependent thanks to its frequency-dependent acoustic impedance. This in

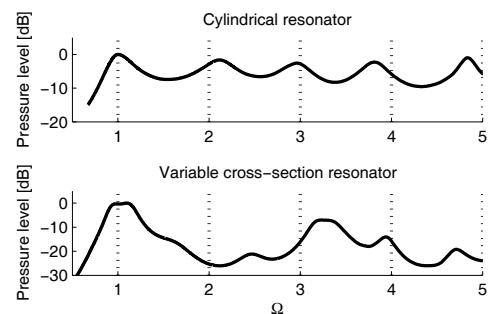


Figure 4: Amplitude-frequency response of Res. 1 and Res. 2 measured at the sealed end. Dotted are integer multiples of fundamental resonance frequency. $\Omega = f/f_1$, where f_1 is fundamental resonance frequency. This frequency response holds for wide range of applied voltages (voltages from 0.3 V up to 20 V were tested)

effect creates a dissonant resonator. In Fig. 4, amplitude-frequency response measurement of both resonating acoustic systems is shown. In both cases the acoustic pressure is measured at the sealed end with 1/8" G.R.A.S. 40DP microphone. Fundamental resonance frequency (the lowest maximum in amplitude-frequency response) is 446 Hz for Res. 1 and 562 Hz for Res. 2. It could be observed in frequency response measurement Fig 4 that Res. 1 (with cylindrical resonant cavity) is not consonant. It is also apparent from Fig 4 that in the case of Res. 2 the second harmonics of fundamental frequency falls directly in the minimum in the frequency response and we can expect it to be highly damped. In Fig. 5 pressure waveforms and pressure amplitude spectra measured in both resonators under driving voltage 15 V at their respective fundamental frequencies are presented. In both resonators, waveforms are shock-free even when relatively high p-p pressures are measured. What is also apparent is that much higher pressure amplitudes could be achieved in the resonator with a varying cross-section (110 kPa in Res. 2 vs. 12 kPa in Res. 1). In their amplitude pressure spectra, we see that higher harmonics are all more than 15 dB lower than the fundamental one in both cases. It is evident that high amplitude shock-free waveforms are possible and no other mechanism of damping higher harmonics is necessary.

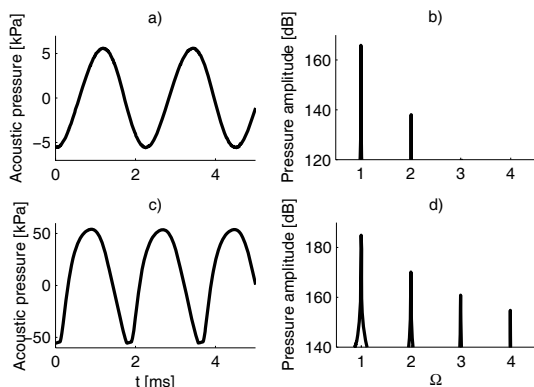


Figure 5: Pressure waveform (a) and pressure amplitude spectra (b) measured in the Res. 1 under driving voltage 15 V at its fundamental frequency 446 Hz. Pressure waveform (c) and pressure amplitude spectra (d) measured in the Res. 2 under driving voltage 15 V at its fundamental frequency 562 Hz. Again, measurement was taken at the sealed end (pressure anti-node)

2.2. Acoustic compressor

In the next experiment, we have replaced the seal at the smaller end of Res. 2 with a delivery valve. Also we have installed a suction port (two holes of 2 mm diameter placed at the opposite sides of the resonator wall) near the pressure node (10 cm from the wider end of Res. 2). The valve configuration can be seen in Fig. 6. The delivery

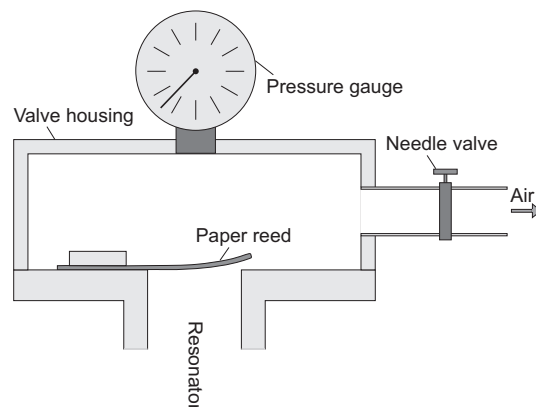


Figure 6: Valve housing configuration

valve is a reed type, made of paper. Dimensions of the paper reed are 15×6 mm. Air mass-flow rate versus delivery pressure at 12 V input voltage was measured (Fig. 7). Pressure was controlled by the needle valve (Fig. 6). A rotameter (placed after the needle valve) was used for measuring air mass-flow. Contrary to what was found by Masuda and Kawashima [2], we have not registered any relation between mass flow rate or delivery pressure and the geometric properties of valve housing or delivery duct length.

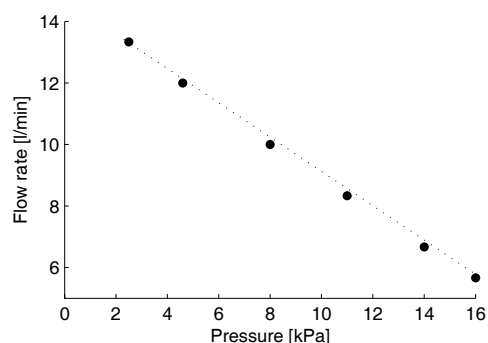


Figure 7: Mass-flow rate vs. delivery pressure measured at 12 V input voltage

3. Conclusion

Shock-free high amplitude pressure waveforms can be obtained in cylindrical resonators when excited with a loudspeaker driver with frequency-dependent acoustic input impedance. When a resonator with a varying cross-section of proper shape is used, pressure waveforms measured at the smaller end are much higher and still shock-free. With such high acoustic pressure achieved (110 kPa p-p at approx. 30 W of input power in our case), it is possible to construct an acoustic compressor. The maximum air mass-flow rate we have been able to achieve reaches 15 l/min at 30 W of input power. It is very likely that by further optimizing the resonator shape, reed dimensions and reed material type, better results could be obtained. Placing a

suction port with valve in pressure anti-node is another possible improvement.

Acknowledgements

This work was supported by the CTU grant project SGS10/265/OHK3/3T/13.

References

- [1] Il'inskii, Y., Lipkens, B., Lucas, T., Doren Van, T. W., Zabolotskaya, E.: Non-linear standing waves in an acoustical resonator, *Journal of the Acoustical Society of America*, 104 (1998), s. 2664–2674.
- [2] Masuda, M., Kawashima, S.: A study on effects of the valves of acoustic compressors on their delivery flow rate, *International congress on acoustics Madrid*, Spain, 2007, ISBN: 84-87985-12-2.
- [3] Huang, X. Y., Nguyen, N. T., Jiao, Z. J.: Nonlinear standing waves in a resonator with feedback control, *Journal of the Acoustical Society of America*, 122 (2007), s. 38–41.
- [4] Lawrenson, C., Lipkens, B., Lucas, T. S., Perkins, D. K., Doren Van, T. W.: Measurements of macrosonic standing waves in oscillating closed cavities, *Journal of the Acoustical Society of America*, 104 (1998), s. 623–636.
- [5] Gaitan, D. F., Atchley, A. A.: Finite amplitude standing waves in harmonic and anharmonic tubes, *Journal of the Acoustical Society of America*, 93 (1993), s. 2489–2495.
- [6] Škvor, Z.: *Akustika a elektro-akustika*, Praha: Academia, 2001. ISBN 80-200-0461-0

