

AKUSTICKÉ LISTY

České akustické společnosti
www.czakustika.cz

ročník 18, číslo 2–4

prosinec 2012

Obsah

Pozvánka na Valnou hromadu	3
Recenze knihy prof. Zdeňka Škvora Elektroakustika a akustika <i>Václav Syrový</i>	3
New book – Zdeněk Škvor: Electroacoustics and Acoustics <i>Michel Bruneau</i>	4
Porovnání vlastností a parametrů hlasu pěvečky trénovaných a netrénovaných žen Comparison of Voice Qualities and Acoustical Parameters between Vocally Trained and Untrained Females <i>Marek Frič a Klára Anna Kadlecová</i>	5
Měření reakčních dob u experimentů s akustickými podněty Reaction Time Measurements in Experiments with Acoustic Stimuli <i>Pavel Šturm a Jan Volín</i>	25
Studium zvukové pohltivosti pórovitých materiálů Study of Sound Absorption of Porous Materials <i>Martin Vašina a Lubomír Lapčík</i>	31

ČESKÁ AKUSTICKÁ SPOLEČNOST

Rada České akustické společnosti svolává ve smyslu stanov

VALNOU HROMADU,

kteřá se bude konat ve čtvrtek 24. ledna 2013 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.

Recenze knihy prof. Zdeňka Škvora Elektroakustika a akustika

V rámci mezinárodního veletrhu Svět techniky 2012 byla uvedena do prodeje kniha **Elektroakustika a akustika**, jejím autorem je *prof. Zdeněk Škvor*. Knihu vydalo nakladatelství ČVUT – Česká technika a oficiální prezentaci provedli: rektor ČVUT pan *prof. Václav Havlíček* a prorektor ČVUT pan *prof. Petr Moos* dne 17. května 2012 ve stánku ČVUT v Průmyslovém paláci na holešovickém výstavišti v Praze.

Kniha má 574 stran a seznamuje čtenáře v pěti kapitolách se základy elektroakustiky a akustiky, podobně jako její předchůdkyně Akustika a elektroakustika, která vyšla v roce 2001 v nakladatelství Academia. První dvě kapitoly jsou věnovány popisu akustických polí v plynech a pevných látkách, třetí a čtvrtá kapitola pojednávají o obvodových náhradách a analogických schématech a pátá kapitola popisuje elektroakustické měniče.

Výklad je veden tak, aby byl blízký studentům v bakalářských, magisterských a doktorských studijních programech a odborníkům a specialistům v uvedených disciplínách. Pro jednotlivé programy lze zvolit odpovídající obtížnost výkladu.

Publikace přináší nepostradatelné základní informace i pro další obory: zvukovou techniku, hudební akustiku, akustiku hudebních nástrojů, sdělovací techniku, radioelektroniku, fyziologickou akustiku, psychoakustiku, architekturní akustiku, ultrazvuk, akustiku hluku a vibrací, multimediální techniku a vzhledem k šíři a interdisciplinaritě jednotlivých podoborů lze uvést řadu disciplín dalších.

Kniha přináší též řadu nových původních řešení (obvodové náhrady Besselových vlnovodů a goniometrických vlnovodů, popis vzduchových mezer, modely vzduchových mezer, stabilitu jednočinného elektrostatického měniče, jednočinný elektrostatický měnič s nerovinnou pevnou elektrodou a další).

V závěru jednotlivých kapitol (zejména kap. 4. a 5.) jsou uvedeny časopisecké citace (mnohdy velmi aktuální), které mohou být využity v magisterských a doktorských programech.

V knize je zařazen Dodatek na nosiči CD jako prezentace, která může sloužit k opakování látky, při seminární výuce, v úvodu nebo závěru přednášky apod. Prezentace obsahuje 97 snímků, které v úvodu přinášejí stručný pohled do historie akustiky a dále některá nekonvenční řešení elektroakustických měničů – elektrostatický výškový tlakový reproduktor prof. Josefa Merhauta, válcový piezopolymerový výškový tlakový reproduktor, oceněný zlatou medailí na 46. světové výstavě inovací, výzkumu a nových technologií „Brussels EUREKA 97“, dále je zde zjednodušeně popsáno ozvučení Betlémské kaple (soustava s řízenou směrovostí, realizace Soning, a. s. Praha), piezoelektrický ultrazvukový vysílač se dvěma válcovými vlnovody atd.

Poznámka: V knize autor uvádí překlady některých názvů pocházející z řečtiny a z latiny, např. mikrofon, hydrofon, hodograf, evanescentní vlna, impeditor (neboť znalost základů klasických jazyků nelze předpokládat). Ojedinele je též uveden překlad z jiných jazyků.

Václav Syrový

New book – Zdeněk Škvor: *Electroacoustics and Acoustics*

A combination of textbook and monograph (574 pages), this publication is the work of an internationally well-known author, teacher and researcher from ČVUT Zdeněk Škvor. The main subject of the book is two-fold: electroacoustics and physical acoustics (as mentioned in the title). The central themes of the five chapters of the book cover acoustic propagation in fluids and in solids, mechanical and acoustical systems with lumped elements or distributed elements, and transducers. As the revised version of a previous book by the same author, this book seeks to present analyses which sometime depart interestingly from those presented by books treating these kinds of subjects, and which include much recent progress available in the literature with regard to electroacoustics. A CD-ROM is enclosed in the book; it contains nearly one hundred pages including a brief history, a presentation of results obtained and devices manufactured in ČVUT, among other information.

The first chapter is devoted to the general linear theory of acoustic propagation in fluids, containing the basic propagation equations in Cartesian, cylindrical, and spherical coordinate systems, and including a useful discussion on external sources (whether baffled or not). The second chapter deals with the linear theory of acoustic fields in isotropic solid media, with the problems presented and solved for linear propagation in infinite-space, half-space, and solid waveguides. The third chapter first presents translating and rotating mechanical systems, successively with lumped elements and distributed elements, followed by the thin membrane theory. In the fourth chapter, the acoustical systems with lumped elements or distributed elements, the symbolic and analogical methods, and the guided acoustic wave are presented and discussed. The fifth chapter is devoted to the field of transducers, focusing attention successively on electrodynamic transducers, electromagnetic transducers, piezoelectric materials and transducers, electrostatic transducers, and finally receiving transducers.

Despite the publications wide-ranging treatment of several subjects, coherence is maintained by cross-referencing between chapters and by complementarities of the material. The author reviews the complete spectrum from basic theories and models up to applications in electroacoustics and acoustic propagation (in fluid and solid media). The book contains several original and current discussions. Many sections are supported by interesting examples (applying the lessons learned) which most of the time involve well-focused fundamental applications.

Students in the field of acoustics will find this book particularly rewarding in which they can reach beyond the routine of “education” and get a taste of current modelling in acoustic propagation and electroacoustics. The book is intended to encourage such an approach. In targeting his book at a graduate and postgraduate level, the author has correctly identified a gap in the textbook literature.

The book is also an excellent starting point for engineers seeking to acquaint themselves with the fields of electroacoustics and acoustic propagation in fluid and solid media, as well as a valuable reference for practising scientists. Not only is it interesting reading; it is a useful reference for those working or planning to work in these fields.

To summarize, the book can be used productively as a reference in advanced graduate and postgraduate courses. It would be of important potential utility particularly to those researchers and engineers entering the classical fields in both physical acoustics and electroacoustics. As the highest priority is given to clarity, the text is sufficiently detailed to be reasonably self-contained, yet sufficiently selective so as to be easy to use.

Michel Bruneau
Professor emeritus, Laboratoire d’Acoustique de l’Université du Maine
(France)

Porovnání vlastností a parametrů hlasu pěvecky trénovaných a netrénovaných žen

Marek Frič a Klára Anna Kadlecová

Výzkumné centrum hudební akustiky (MARC)

Akademie múzických umění v Praze, Malostranské nám. 13, 118 00 Praha 1

e-mail: marekfric@centrum.cz, klara.kadlecova@email.cz

Voice education and training of special voice skills is the basis for an effective voice management of prospective professional voice users such as teachers. The aim of this study was to compare the vocally trained (in classical singing) and untrained group of females and to study the relationships among perceptual, acoustical (and electroglottographically derived closed quotient, CQ) properties as well as the answers of VHI and training questionnaires. Based on experimental conditions we monitor the changes after “little” voice loading. In this study methods for evaluation of acoustic parameters were developed in regard to their location in voice range profile. The results showed that perceptually dominant differences between trained and untrained group was in the perception of voice resonance. Total VHI scores did not distinguish between groups, but the differences were in functional and physical parts (worse for the untrained group) and in the emotional part (worse for the trained group). The boundaries of voice range profiles showed differences only in the higher part of singing utterances. Differences in acoustical parameters could be related to lower amount of vocal fold adduction in habitual speaking voice and to better resonance effect and lower perturbances in singing voice in the trained group. The method for evaluation of acoustical parameters considering their location in the voice range profile seems to be a useful tool for distinguishing the different vocal groups as well as for objective interpretation of perceived voice quality properties. For establishing the normative values of these parameters more investigations are needed.

1. Úvod

Změně hlasu následkem hlasového tréninku nebo edukace se v odborné literatuře věnuje významná pozornost. Většinou jsou studie zaměřeny na porovnání vlastností hlasu trénované a netrénované skupiny [1–8]. Neocenitelný význam mají studie, které porovnávají stejnou skupinu subjektů z hlediska krátkodobého tréninku (po krátkém zácviku specifických hlasových cvičení) [9, 10], a také svou povahou zásadní studie, které sledují vývoj konkrétní skupiny subjektů v průběhu dlouhodobého tréninku [11–13]. Z hlediska významnosti sledování efektu hlasového tréninku nebo rehabilitace jsou ale nejvýznamnější tzv. randomizované kontrolované studie [9].

Podle trénovaného způsobu použití hlasu lze studie rozdělit na sledování pěveckého rozvoje [4, 6, 8, 10, 11] (zejména klasického zpěvu) nebo mluvní výchovy [1, 2, 5, 9, 10, 13, 15–17] (hlavně u herců). Nemalá pozornost je věnována také edukaci, tréninku a problémům profesionálních uživatelů hlasu (učitelů, telefonistů) [1–10].

Jako zásadní se ukazuje použití akustické analýzy, elektroglografie, méně jsou publikovány výsledky percepčního hodnocení a dotazníkových průzkumů (kvality života), nebo pozorování jiných fyziologických změn následkem hlasového tréninku. Akustické studie ukazují změny parametrů dlouhodobého průměrovaného spektra (LTAS) [11, 12], perturbačních [7, 12, 13] a aerodynamických parametrů – maximálního fonačního času.

V oblasti edukace zpěvního hlasu se změna projevuje zvětšením rozsahů výšky hlasu, hlasitosti, resp. paramet-

trů hlasového pole [13–19], ale zejména posílením spektrální oblasti v pásmu pěveckého formantu [20–23] a změnou použití a vlastností vibrata [19]. Pro trénink mluvního hlasu bylo dokumentováno například snížení polohy a ladění formantů [14].

Cílem této studie je porovnání objektivních parametrů a percepčních vlastností hlasu, jakož i hledání vztahů mezi nimi u trénované a netrénované skupiny studentek pedagogické fakulty a popis vlivu pěveckého tréninku na hlas.

2. Materiál a metody

2.1. Subjekty a dotazníky

Výzkumu se dobrovolně zúčastnilo 16 studentek Pedagogické fakulty UK v Praze ve věku 21–30 let, které byly rozděleny do dvou skupin: 1) trénovaná skupina 7 studentek s edukací zpěvního hlasu (klasický operní styl) na úrovni konzervatoře; 2) skupina 9 netrénovaných studentek (nezpěvaček). Všechny studentky před nahrávkou podepsaly písemný souhlas s nahrávkou a zpracováním dat a vyplnily českou verzi dotazníku VHI (Index hlasového postižení) [24]. Stupeň hlasové trénovanosti byl určen pomocí vytvořeného dotazníku, kde studentky zapsaly stupeň, formu a délku studia zpěvu a mluvní výchovy. Váho- vaným způsobem byly sečteny počty roků jejich aktivní pěvecké výchovy na úrovních: základní umělecké školy (váha 0,3), sborového zpěvu (váha 0,2), individuální přípravy v dospělosti (váha 0,7) a individuální pěvecké výchovy na úrovni konzervatoře, resp. vysoké umělecké školy

(váha 1,0). Váhování bylo navrženo na základě předpokládaného vlivu konkrétního druhu tréninku na hlas dle zkušeností autorů.

2.2. Nahrávky

Nahrávky a akustické měření v reálném čase proběhlo v laboratoři experimentální psychoakustiky na AMU ve speciálně upravené místnosti s minimálním dozvukem. Pro nahrávání byla zvolena aparatura s kalibrovaným kondenzátorovým mikrofonom Sennheiser ME2, umístěným ve standardní vzdálenosti 30 cm od úst v šikmém směru. Současně byl zaznamenán elektroglotografický signál (EGG) pomocí zařízení Laryngograf EGG-D100.

Nahrávka hlasu byla pořízena dle metodiky [25], obsahovala záznam čtení standardního textu „Podzim na starém bělidle“ (habituálně a nahlas) a volání slova „máma“ do maximální hlasitosti; zpěvní hlas byl vyšetřen na slabiku „má“ dle metodiky vyšetření hlasového pole pomocí vztupných stupnic, crescenda a decrescenda a glissanda. Na závěr byla pořízena nahrávka lidové písně „Já do lesa nepojedu“ ve všech tóninách z řady D-, FIS-, A-dur, ve kterých byly studentky schopny zpívat ve svém zpěvním rozsahu.

2.3. Poslechové testy

Speciálně pro poslechové testy byly z původních nahrávek připraveny „stimulové nahrávky“. Pro mluvní hlas byly vybrány středové části původních nahrávek habituálního hlasu, konkrétně jedna úplná věta (délka cca 4 vteřiny). Pro hodnocení vlastností zpěvu byl vybrán první verš zpěvu lidové písně ze všech tónin, které subjekty zazpívaly. Z uvedených stimulových nahrávek byly provedeny předběžné poslechové testy za účelem výběru konkrétní testovací metody a hodnocených vlastností. Pro mluvní hlas byly stanoveny konečné poslechové testy: 1) **celkový dojem** použití hlasu, kategorizační test (v 5 kategoriích: špatný, téměř špatný, neutrální, dobrý a výborný); 2) seřadovací a škálovací test na stupnici 0–15 (Visual analog ranking and rating test, VARR), hodnocení **rezonance hlasu** (od nejhorší po nejlepší); 3) VARR test pro hodnocení na škále **světlý** ↔ **tmavý**; 4) VARR test pro hodnocení na škále **volný** ↔ **napjatý**. Pro zpěvní hlas byly vybrány dvě tóniny, jedna blízká střední zpěvní poloze hlasu všech žen – d'-dur a jedna o tercii výš s předpokladem technických problémů zpěvu netrénované skupiny – fis'-dur. Tuto tóninu nezvládly zazpívat 3 ze 7 netrénovaných. V uvedených tóninách byly hodnoceny vlastnosti: 5) **technika zpěvu**, kategorizační test; 6) VARR test, hodnocení stupně **rezonance hlasu**; 7) VARR test pro hodnocení na škále **světlý** ↔ **tmavý**. Oba autoři se účastnili všech poslechových testů, přibližně za týden se opakoval „retest“ všech vlastností pro zjištění opakovatelnosti hodnocení (kromě hodnocení zpěvu ve vyšší tónině).

2.4. Analýza signálů

Prvotní akustická analýza byla provedena v reálném čase, pomocí systému RealVoiceLab (podrobněji viz [26]). V postprocessingu byly analyzovány středové části (v minimální délce 9 s) prodloužené fonace vokálu „a“ pomocí programu Multi-Dimensional Voice Program (MDVP), KayPENTAX, Model 5105 [27].

Vybrané úseky poslechových testů a podrobnější segmentální analýza habituálního hlasu a zpěvu stupnic byly analyzovány separátně v postprocessingu, kde byla zvolena délka a posun analyzačního okna 40/20 ms pro mluvní hlas a 100/20 ms pro zpěvní hlas.

Kromě základních parametrů hlasového pole (základní frekvence (F0) převedená na půltóny midi stupnice, hladina akustického tlaku (SPL) a z nich odvozené parametry: dynamický, tónový rozsah a plocha hlasového pole) byly z jednotlivých akustických segmentů vypočteny další akustické parametry dle definic uvedených v příslušné literatuře: těžiště spektra [28], parametry vyváženosti spektra [29, 30]: SPR, ER, Alfa poměr; frekvenční poloha formantů F1, F2, F3, F4, F5, a MDVA parametry [27, 31] frekvenčních (Jita, Jitt, MAJ (Mean Absolute Jitter), RAP (Relative Average Perturbation), PPQ (Pitch Period Perturbation Quotient), vF0 (Coefficient of Fundamental Frequency Variation)), amplitudových perturbací (ShdB, Shim), VTI (Voice Turbulence Index) a SPI (Soft Phonation Index).

Z hodnot maximálního fonačního času a hodnoty Jitteru pro vokál „a“ pak byla z hodnot minimální hladiny akustického tlaku a maximální výšky hlasu z hlasového pole vypočtena hodnota parametru DSI (Dysphonia Severity Index) [32].

Analýza elektroglotografického signálu byla provedena v postprocessingu pomocí standardizovaného programu Speech Studio verze 4.1.0 dodávaného k zařízení Laryngograf. Uvedený program analyzuje jednotlivé periody EGG signálu a v jejich rámci vypočte EGG koeficient zavření hlasivek, resp. kontaktní koeficient hlasivek (CQEGG) na základě určení 30% úrovně jednotlivých period EGG signálu [33]. Z uvedených parametrů bylo možno také následně vypočítat parametry Jita, Jitt, ShdB, Shim, MAJ pro EGG signál (dále v textu označeny předponou „L-“).

2.5. Statistické vyhodnocení výsledků

Naměřené hodnoty akustických a EGG parametrů všech segmentů byly nejdříve statisticky vyhodnoceny pomocí Kolmogorov-Smirnova testu na jejich normální rozložení. Protože všechny parametry splňovaly podmínku normálního rozložení na hladině statistické významnosti $p < 0,01$ (i pro habituální hlas i pro zpěv stupnic), mohl být následně použit porovnávací t -test průměrných hodnot parametrů mezi trénovanou a netrénovanou skupinou. Pro hledání vztahů akustických a EGG dat s hodnoceními VHI dotazníku, hlasovou trénovaností a výsledky poslechových testů byla použita korelační analýza.

Průměrné hodnoty parametrů akustické analýzy a elektrolotografie byly korelovány s dotazníkovými daty dvěma způsoby: 1) pro celkové průměrné hodnoty všech naměřených segmentů a 2) pro průměrné hodnoty parametrů odpovídající konkrétní pozici v hlasovém poli. U druhého způsobu byly vybrány pouze segmenty nahrávek blízké ke konkrétní pozici v hlasovém poli, kde vzdálenost od sledované pozice byla maximálně 2 půltóny (rozdíl ve výšce hlasu) a 2 dB (rozdíl hladiny akustického tlaku). Uvedeným způsobem byly ohodnoceny všechny pozice hlasového pole s krokem 1 půltón a 1 dB.

3. Výsledky

3.1. Porovnání dat mezi skupinami

Dotazníkový průzkum Výsledek porovnání koeficientů hlasové trénovanosti pomocí *t*-testu (viz tabulka 1) vykazoval statisticky významný rozdíl mezi trénovanou (prům. koef. trénovanosti 9,3) a netrénovanou skupinou (prům. koef. 0,8). Tento rozdíl byl způsoben délkou zpěvní hlasové edukace, mluvní hlasová výchova byla stejná u všech subjektů (1 semestr). Proto bylo možné rozdělit subjekty na skupinu bez klasického zpěvního vzdělání – nezpěvačky, a skupinu s klasickou pěveckou přípravou – různého stupně. Následně bylo provedeno statistické porovnání všech měřených parametrů mezi uvedenými skupinami.

Porovnání celkových skóre VHI dotazníků nevykazovalo signifikantní rozdíl, tedy postižení hlasu u obou skupin bylo podobné. Jedna studentka v netrénované skupině ale výrazně převyšovala VHI hodnoty ostatních studentek,

Porovnání	Věk	Koef. trén.	DSI	VHI10	Tmavost hab.	Napětí hab.
Prům. Trén.	25,43	9,33	3,24	10,43	5,15	6,17
Std Trén.	3,21	4,97	1,70	7,00	2,64	2,68
Prům. Nezp.	23,00	0,78	2,86	4,50	4,85	4,65
Std Nezp.	2,14	0,44	0,93	2,00	3,42	2,54
<i>t</i> -test	ns	0,05	ns	0,05	ns	ns

Porovnání	Rezon. hab.	Celk. hodn. hab.	Techn. d1	Rezon. d1	Tmavost d1
Prům. Trén.	6,90	3,46	10,57	10,79	5,58
Std Trén.	2,08	1,20	2,24	2,10	0,60
Prům. Nezp.	3,68	2,72	4,43	4,21	3,68
Std Nezp.	2,70	1,30	1,99	1,89	3,66
<i>t</i> -test	0,05	ns	0,05	0,05	ns

Tabulka 1: Porovnání věku, dotazníkových dat a průměrných hodnocení percepčních vlastností hlasu mezi trénovanou a netrénovanou skupinou studentek. V tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty, standardní odchylky (std) a výsledek *t*-testu (ns – není signifikantní rozdíl, 0,05 – statisticky významný rozdíl ($p < 0,05$))

Korelace	Nap. hab	Celk. hab	Tech. d'	Tech. fis'	Rez. hab.	Rez. d'	Rez. fis'	Tmav. hab	Tmav. d'	Tmav. fis'
Nap. hab.	X									
Celk. hab.		X			0,53			0,52		
Tech. d'			X	0,83*	0,57	0,66	0,73			0,8*
Tech. fis'				0,83*	X		0,92*	0,93*		0,9*
Rez. hab.					0,53	0,57	X	0,58		
Rez. d'						0,66	0,92*	0,58	X	0,77*
Rez. fis'							0,73	0,93*		0,77*
Tmav. hab.									X	
Tmav. d'										X
Tmav. fis'										

Tabulka 2: Korelace průměrných výsledků subjektivního hodnocení mluvního habituálního hlasu a zpěvu písně. Všechny uvedené korelace jsou statisticky významné $p < 0,05$, * označuje $p < 0,01$

a protože byl její hlas mírně až středně chraptivý (jako jedině ze všech), byla z další analýzy vyloučena.

Podrobnější porovnání dotazníkových dat VHI pro jednotlivé otázky ukázalo statisticky významné rozdíly mezi skupinami pro otázky: P1, F3 a F7, kde nezpěvačky dosahovaly vyšší skóre (měly horší fyzický a funkční stav hlasu), naopak trénované zpěvačky dosahovaly vyšší skóre v otázkách E4 a E9, tedy v emoční části (zpěvačky byly citlivější na svůj hlas). Zkrácený VHI dotazník na 10 otázek dle [24] (VHI10) dokázal odlišit zpěvačky od nezpěvaček, kde paradoxně měly vyšší skóre trénované zpěvačky.

Poslechové testy U vlastností celkový dojem habituálního hlasu, technická kvalita zpěvu, rezonance mluvy i zpěvu byla korelace testu a retestu i korelace hodnocení mezi hodnotiteli statisticky významná na hladině $p < 0,05$, proto jsme pro další analýzu použili průměrné hodnoty všech hodnocení uvedených vlastností. Při hodnocení vlastností tmavost (mluvní i zpěvní) a habituální napětí hlasu nebyly odpovědi jednoho hodnotícího konzistentní v prvním testu, proto se do další analýzy počítalo jenom s průměry jeho retestu a obou hodnocení druhého hodnotícího, které vzájemně korelovaly na hladině $p < 0,05$. Hodnocení zpěvu ve vyšší tónině nebylo podrobeno retestu, protože již korelace prvního testu obou hodnotitelů korelovaly na požadované hladině $p < 0,05$. Průměrné hodnoty všech konzistentních hodnocení sledovaných vlastností byly následně použity pro korelační analýzu s průměry naměřených parametrů v další části.

Korelace mezi subjektivními vlastnostmi (viz tabulka 2) ukazují, že celkový dojem habituálního hlasu kladně kore-

luje s rezonancí a tmavostí pouze habituálního hlasu. Rezonance mluvního hlasu je spjatá také s rezonancí zpěvního hlasu a technickou kvalitou zpěvu v d'dur tónině, habituální tmavost byla v negativní korelaci s napětím mluvního hlasu. U zpěvu písně v tónině d'dur korelovala jenom technická kvalita s rezonancí (zpěvu i habituálního hlasu) a rezonance s tmavostí zpěvního hlasu. Zajímavé je vyhodnocení korelací každé z obdobných vlastností pro habituální hlas a obě tóniny zpěvu. Ukazuje se, že technika zpěvu podobně koreluje v obou tóninách zpěvu, ale nespojuje s celkovým hodnocením habituálního hlasu. To, že rezonance habituálního hlasu nekoreluje s rezonancí vyšší tóniny, naznačuje, že vyšší tónina je svou rezonancí příliš vzdálená od habituálního hlasu. Protože vzájemně nekorelovaly žádná z habituálních a zpěvních tmavostí, zdá se, že tmavost hlasu se nejvíce mění v závislosti na typu použití a výšce hlasu při zpěvu.

Na základě *t*-testu porovnání hodnocení percepčních vlastností mezi skupinami, bylo možné od sebe odlišit trénovanou a netrénovanou skupinu v poslechu hlavně dle vlastností rezonance (mluvní i zpěvní) a techniky zpěvu (viz obrázek 1). Percepční hodnocení vlastností celkový dojem, tmavost a napětí u habituálního hlasu a tmavost u zpěvu písně nevykazovala rozdíly mezi skupinami.

Hlasové pole Porovnání hlasových polí ukázalo, že trénované zpěvačky mají statisticky významně vyšší nejčastěji se vyskytující (modus) hladiny akustického tlaku pro habituální mluvní hlas než nezpěvačky. Pro zpěvní úkoly sumárně vyšly statisticky významně větší dynamický rozsah a maximální dosažená SPL pro trénovanou skupinu.

Porovnání průměrných obrysových křivek hlasových polí jednotlivých skupin je uvedeno na obrázku 2. Porovnání pěveckých úkolů ukazuje statisticky významné rozdíly v minimálních a maximálních hladinách akustického tlaku obecně ve vyšší polovině hlasového pole. Nebyly zjištěny významné rozdíly mezi skupinami v ploše zpěvního hlasového pole. Ale při nahrávkách lidových písní v různých tóninách se ukázalo, že zpěvačky jsou schopné zpívat ve více tóninách než nezpěvačky. Při zpěvu písně trénované zpěvačky dosahovaly vyšší maxima výšky i hlasitosti, stejně tak větší tónový i dynamický rozsah a plocha jejich zpěvního hlasového pole byla signifikantně větší než u netrénovaných.

Rozdíly v LTAS Výsledky porovnání průměrovaných spekter (LTAS) jsou zobrazeny na obrázku 3. Pro habituální mluvní hlas jsou statisticky významně rozdílné hladiny LTAS spekter mezi skupinami v pásmech cca 1–5 kHz, u zpěvu je rozdíl závislý na dynamice zpěvu. Pro nejtišší dynamiku byl statistický rozdíl prakticky v celé šíři spektra, pro střední a hlasitou dynamiku hlasu se rozdíl koncentruje v zásadě do dvou oblastí: 0,5–1,5 kHz (oblast vokálních formantů) a 2–5 kHz (oblast pěveckého formantu).

Porovnání MDVP parametrů prodloužené fonace vokálu „a“ před zátěží a po ní Celková nahrávka a vyšetření hlasového pole v našem experimentu trvala průměrně 25 minut u každé vyšetřované osoby. S ohledem na to jsme předpokládali, že tento proces může simulovat určitou hlasovou zátěž, co do délky a hlasového výkonu, porovnatelnou pro všechny subjekty.

Porovnání (*t*-test) výsledků MDVP parametrů prodloužené fonace vokálu „a“ před zátěží a po ní ukázalo, že po zátěži se statisticky významně ($p < 0,05$) zmenšují hodnoty parametrů: amplitudových perturbací (ShdB, Shim, APQ, sAPQ) a poměru harmonických a neharmonických složek (NHR) pro celkovou skupinu subjektů. U zpěvaček se po zátěži signifikantně neměnil žádný z měřených parametrů, ve skupině netrénovaných se ale zvýšila poloha hlasu, a snížily hodnoty vAm (koeficient amplitudové variability) a NHR. Dodatečné porovnání hladiny akustického tlaku z vyšetření prodloužené fonace však ukázalo, že nezpěvačky po hlasové zátěži také významně zvýšily SPL (hlasitost) vokálu „a“ (v průměru o 4 dB).

Porovnání hodnot parametrů mezi skupinami odhalilo, že při fonaci vokálu „a“ na začátku nahrávky (před zátěží) měly zpěvačky vyšší jenom hodnoty základní frekvence (výšky hlasu), po hlasové zátěži ale byly všechny parametry porovnatelné s nezpěvačkami.

Porovnání průměrných hodnot měřených parametrů analýzy segmentů a jejich rozložení vzhledem k pozici v hlasovém poli Statistické porovnání naměřených parametrů mezi skupinami pro **habituální hlas**, jejich průměrných hodnot pro jednotlivé subjekty i s ohledem na rozložení v hlasovém poli, je uvedeno v tabulce 3. Průměrné hodnoty parametrů rozdíl 1. a 2. harmonické ($dHa1Ha2$), sklon spektra v pásmu 0,4–4 kHz (THItilt4k4), hladina první harmonické (H1), hladina pěveckého formantu (LFSH), zesílení 3. formantu (A3) u trénované skupiny byly statisticky významně vyšší a u parametru CQEGG nižší než u nezpěvaček. Rozložení v rámci hlasového pole ukazuje největší statistický rozdíl pro parametr CQEGG (viz obr. 4-A), kde v 47,3 % překrývající se hlasových polí byly jeho hodnoty statisticky významně větší pro netrénované subjekty. Schematické zobrazení porovnání parametrů vzhledem na pozici v hlasovém poli je uvedeno na obrázku 4. Další významný parametr byl $dHa1Ha2$ (viz obr. 4-C), kde v 24,4 % plochy byly jeho hodnoty statisticky významně vyšší pro trénované zpěvačky. Průměrné hodnoty sklonu spektra v pásmu 0,4–4 kHz (THItilt4k4) byly signifikantně větší pro trénovanou skupinu, ale v rámci rozložení v hlasovém poli (viz obr. 4-D) měly vyšší hodnoty trénované zpěvačky jenom v 14,6 % plochy. Naproti tomu celkové průměrné hodnoty parametru zesílení 2. formantu (A2) nebyly signifikantně rozdílné mezi skupinami, ale v rámci rozložení v hlasovém poli v 19 % překrývající se plochy měly vyšší hodnoty netrénované studentky. Paradoxně pro parametr zesílení 3. formantu (A3) celkové průměrné hodnoty vykazovaly

signifikantní rozdíl mezi skupinami, ale jenom 1,5 % plochy hlasového pole vykazovalo vyšší hodnoty pro trénovanou skupinu.

Statistické porovnání naměřených parametrů mezi skupinami pro **zpěvní hlasové pole** ukazuje (viz tabulka 3), že průměrné hodnoty vykazovaly statisticky významný rozdíl mezi skupinami v parametrech A4 (v 18,7 %), LFSH (12 %), SPR (10,2 %), SPL, A2 (9,9 %), H1, FSH (10,1 %), A5 (7 %), COG_{harm}, COG_{amp}, Alfa, kde dosahovaly trénované zpěvačky vyšší průměrné hodnoty, a v parametrech SPI (9,4 %), ER (11,3 %), VTI, Shim (6,6 %), MAJ (9,1 %), PPQ (8,8 %), A1 (8,5 %), CQEGG (7 %), Jitt (7,7 %), vF0 (7,3 %), kde byly průměrné hodnoty vyšší pro nezpěvačky (v závorkách je uveden % podíl plochy překrývajících se hlasových polí se statisticky významně vyššími hodnotami; parametry bez závorek vykazovaly jenom vyšší průměrné hodnoty, ale ne vzhledem k pozici v hlasovém poli).

Porovnání rozptylu dat (standardních odchylek) naměřených parametrů mezi skupinami ukázalo, že trénované zpěvačky mají větší rozptyl u parametrů SPL, VTI, H1, naopak u nezpěvaček byl zjištěn větší rozptyl u MAJ, dHa1Ha2, F2, F4, F5 a FSH.

I když u zpěvu nejsou tak procentuálně výrazné plochy statisticky rozdílných hodnot s ohledem na pozici v hlasovém poli, jako tomu bylo u habituálního hlasu, lze na základě grafického porovnání odhadnout polohy hlasu s charakteristickými rozdíly. Oblast zpěvního hlasového pole pro forte křivku vykazuje téměř v celém frekvenčním rozsahu vyšší hodnoty hladiny pěveckého formantu pro trénované zpěvačky, přičemž hodnoty CQEGG byly porovnatelné (viz obr. 5-I). Naopak ve vyšší poloze (cca v okolí a nad c' – v americké literatuře C4) a střední dynamice zpěvu byly naměřeny vyšší hodnoty perturbačních složek (Jitt a Shimm) pro nezpěvačky (viz obr. 5-F,G). Pro hodnocení parametru CQEGG (na obrázku 5-I) je patrná více nespojitá a menší žlutá a zelená plocha na rozdíl od obrázků 5-A–I, protože program Speech Studio nebyl schopný určit hodnoty CQEGG zejména pro vysoké polohy nad c" (C5) v *pp* dynamice. Uvedený jev souvisí s výraznou změnou intenzity signálu – tedy dominancí šumu pozadí, případně vymizením signálu při insuficienci hlasivek, ve vyšším – falzetovém (nekrytém hlavovém) rejstříku u nezpěvaček.

3.2. Vztahy mezi měřeními a externími parametry

Korelace mezi parametry hlasového pole a externími parametry (DSI, dotazníkovými daty VHI a trénovaností a percepčními daty) jsou uvedeny v tabulce 4. Výsledky ukázaly u mluvního hlasu významnou korelaci jenom mezi DSI a dynamickým rozsahem. U zpěvního hlasového pole (na slabiku „ma“) korelovaly DSI s max. a min. hlasitostí (SPL), tónovým a dynamickým rozsahem a plochou VRP. Koeficient trénovanosti koreloval s max. SPL a dynamickým rozsahem.

Celkové skóre VHI nekorelovalo s žádným parametrem hlasového pole, ale ukázaly se korelace se skóre jeho fyzické části (VHI_P) – korelovalo s SPL a DR celkového řečového hlasového pole, a subskóre emoční části (VHI_E) – korelovalo s pultónovým (TR) a dynamickým (DR) rozsahem zpěvního pole.

Korelace mezi průměry subjektivních hodnocení ukazují, že celkový dojem mluvního hlasu koreloval s TR a maximem SPL řečového hlas. pole. Rezonance mluvního hlasu korelovala s TR, min., max. a prům. SPL habituálního hlasu a minimem SPL zpěvu. Tmavost mluvního hlasu negativně korelovala s průměrnou minimální a maximální výškou habituálního hlasu, napětí v kladném smyslu s výškou hlasu, maximální hlasitostí a plochou hlas. pole habituálního hlasu. Zpěvní technika kladně korelovala s výškou habituálního hlasu, průměrnou SPL, maximální výškou celkového řečového projevu a maximální SPL u zpěvu. Pěvecká rezonance korelovala jenom s maximální SPL zpěvu.

Korelační analýza mezi měřeními akustickými a EGG parametry – jak pro habituální hlas, tak i zpěv stupnic – a koeficientem trénovanosti a hodnocením percepčních vlastností je komplexně uvedena v tabulce 5. Ukazuje se, že vychází různé korelace mezi percepčními vlastnostmi a průměry parametrů pro mluvní a jiné pro zpěvní hlas. S největší pravděpodobností je to způsobeno tím, že zpěvní hlas dosahoval podstatně většího frekvenčního i dynamického rozsahu než habituální řečový projev. Jediný parametr, který podobně koreloval pro mluvní i zpěvní hlas s rezonancí, byla hladina pěveckého formantu (LFSH).

Dále je uveden hlavně popis výsledků pro habituální hlas, protože jeho rozložení parametrů vzhledem k menší ploše na hlasovém poli a většímu překrývání pro sledované subjekty, splňuje normální rozdělení parametrů. U habituálního hlasu jsme dále neregistrovali, že by subjekty měnily způsob použití hlasu (hlasový rejstřík) v různých částech hlasového pole habituálního hlasu. Naproti tomu, pro zpěvní hlas se výrazně projevila změna použití hlasu ve spojitosti se změnou hlasových rejstříků.

Korelace objektivních parametrů a subjektivních vlastností ukazují, že u habituálního hlasu s **tréninkem** narůstá (parametry jsou seřazeny dle významnosti): sklon spektra v pásmu 0,4–4 kHz (snižuje se pokles spektra, tedy jsou zesíleny vyšší spektrální složky), rozdíl prvních dvou harmonických, zesílení 5. formantu a klesá poloha 6. formantu a koeficient uzavření hlasivek.

S výraznější **rezonancí** mluvního hlasu narůstá: SPL, hladina první harmonické, hladina pěveckého formantu, celkový sklon spektra (zvyšují se hladiny vyšších spektrálních složek), zesílení 3. a 6. formantu a těžiště celkového spektra; a naopak s rezonancí se snižují: VTI, koeficient uzavření hlasivek, poloha 2. až 5. formantu a periodická perturbace hlasu (RAP).

Se zvyšující se **tmavostí** mluvního hlasu byly zjištěny pouze negativní korelace s: těžištěm spektra v pásmu

0–2,5 kHz a harmonického spektra, polohou druhého a prvního formantu a průměrnou výškou hlasu.

Napětí mluvního hlasu bylo přímo úměrné: výšce hlasu, těžišti spektra (celkového, v pásmu 0–2,5 kHz i harmonického), sklonu celkového spektra, Alfa, poloze 1. formantu, hladině pěveckého formantu, SPR a v negativní korelaci s: Jitterem a ER.

Lepší **technika zpěvu** se na habituálním hlasu projevila zvýšením: zesílení 3. formantu, hladiny první harmonické, zesílení pěveckého formantu, průměrné výšky a hladiny akustického tlaku a celkového sklonu spektra; naopak, snížením: CQEGG, Jita, VTI, Jitter a polohy 4. formantu. Hodnocení rezonance zpěvu měla na korelace v parametrech habituálního hlasu podobný efekt jako rezonance habituálního hlasu, zpěvní tmavost však u habituálního hlasu korelovala jenom záporně s polohou 3. a 1. formantu.

Z uvedených korelací u zpěvního hlasu se ukazuje výrazný nárůst počtu souvisejících parametrů s percepčními vlastnostmi zpěvního hlasu (obou tónin), zejména u zpěvní rezonance. Kromě korelace parametrů souvisejících s nárůstem hladin spektrálních oblastí v okolí pěveckého formantu, celkové SPL a hladiny první harmonické, se zvýraznila záporná korelace se všemi sledovanými parametry periodické a amplitudové perturbace hlasu (v d'dur tónině), tedy jinými slovy vjem rezonance byl posílen s klesajícími hodnotami hlasové nepravidelnosti.

Podobným způsobem, jakým byly porovnávány hodnoty parametrů, je možné kromě hledání korelací mezi průměry měřených parametrů a externích proměnných, hledat tyto korelace i s ohledem na pozici v hlasovém poli.

Na obrázku 6-A je zobrazena korelace mezi průměry parametru Singing Power Ratio (SPR) a hodnocením rezonance zpěvu v tónině d'dur, na obr. 6-B je pak zobrazena korelace s ohledem na pozici v hlasovém poli. Na obrázcích 6 je zelenou barvou vyznačena celková překrývající se plocha všech hlasových polí, červená barva indikuje pozice v hlasovém poli, kde průměrné hodnoty parametru SPR z jejich malého okolí (± 2 půltóny a ± 2 dB) vykazovaly statisticky významnou ($p < 0,05$) kladnou korelaci s hodnocením rezonance zpěvu, modrá značí negativní korelaci.

Korelace parametru SPR s hodnocením zpěvní rezonance v tónině d'dur s ohledem na normalizovanou pozici v hlasovém poli (viz obr. 6-C–E) ukázala, že normalizace vzhledem k průměrné výšce habituálního hlasu zhoršila četnost pozitivní korelace o cca 3,8 %, normalizace vzhledem k průměrné SPL vylepšila pozitivní korelaci o cca 5,2 % a normalizace vzhledem k průměrné výšce i SPL nejlépe zvýšila pozitivní korelaci vzhledem k rozložení parametru v hlasovém poli o cca 6,2 % překrývající se plochy hlasových polí.

4. Diskuze

Dotazníkový průzkum a percepční testy na základě porovnání vlastností koeficientu trénovanosti, rezonance hlasu v habituálním, ale i zpěvním hlasu a techniky zpěvu podobně ukázaly, že námi sledované skupiny lze rozdělit na

dvě odlišné skupiny – trénované a netrénované studentky. Rozdíl v trénovanosti hlasu byl zejména v pěveckém tréninku, všechny trénované zpěvačky se výhradně věnovaly klasickému zpěvu. Výsledky celkového VHI skóre neukázaly obecné rozdíly mezi skupinami – proto uzavíráme, že obě skupiny měly subjektivně porovnatelné subjektivní problémy s hlasem (kromě jedné, vyloučené z další analýzy). Rozdíly skóre ve fyzické, funkční a emoční části VHI ale naznačují, že netrénovaná skupina má větší problémy s hlasem z funkčního a fyzického hlediska, naopak trénovaná skupina pocituje problémy zejména emoční. VHI 10 byla výrazně citlivější na odhalení trénované skupiny zpěvaček.

Vedlejším produktem dotazníku hlasové trénovanosti bylo ale spíše osobní zjištění, že i když měly všechny studentky 1 semestr teorie o používání hlasu, vesměs považovaly praktickou přípravu tréninku používání mluvního hlasu za nedostatečnou. Toto zjištění bohužel odpovídá i celosvětovým trendům nedostatečné hlasové přípravy budoucích profesionálních uživatelů hlasu [3] a mělo by být motivací pro fakulty vzdělávající skupiny budoucích profesionálních uživatelů hlasu pro praktické začleňování edukace hlasové a mluvní techniky do jejich studijních programů.

Parametry hlasového pole ukázaly v zásadě rozdílné maximální i minimální hodnoty SPL obrysových křivek hlasového pole vyšší pro zpěvačky a také větší dynamický rozsah pro zpěvní úkoly. Jinými slovy zpěvačky dosahovaly v zásadě vyšších hladin akustického tlaku jak pro tiché, tak hlasité pěvecké úkoly, a větší dynamiku u zpěvu písně (což je v souladu s [13, 19]). Zajímavé je ale zvýšení minimální hlasitosti zpěvního hlasového pole pro trénovanou skupinu, které nesouhlasí s [17], kde byl ale dlouhodobě popsán pokles minimálních hladin hlasového pole s tréninkem u skupiny zpěváků. V uvedené studii však nebyla data porovnávána s nezpěváky. Rozdíl v ploše hlasového pole a tónovém rozsahu – zejména pro zvýšení nejvyšší dosažené výšky (jak ukazuje [17, 19]) – se nepotvrdil. Funkčně se však ukázalo, že i když při vokálních úkolech (zpěv stupnice na „ma“) byly i nezpěvačky schopné dosáhnout frekvenčně velký rozsah, při zpěvu lidové písně již nedokázaly zpívat ve vyšších polohách. Uvedená skutečnost ukazuje, že trénovaná skupina dosahuje větší „funkční“ zpěvní hlasové pole (jak tónový, tak i dynamický rozsah) při reálném zpěvu oproti nezpěvačkám než při samotném vokálním projevu.

Rozdíly LTA spekter ukazují zvýšení hladiny oblasti pěveckého, resp. řečnického formantu pro mluvní hlas a také oblasti vokálních formantů pro zpěvní hlas pro trénovanou skupinu, což již bylo prokázáno např. v [11, 12, 21–23, 34, 35].

V rámci studie byly pořízeny nahrávky prodloužené fonace vokálu „a“ na začátku nahrávání a následně po poslední pěvecké úloze, s průměrným časovým odstupem cca 25 minut. Protože se v rámci celé nahrávky prováděly hlasové úkony relativně náročné i pro hlasově trénované osoby, předpokládali jsme, že takto uspořádaný experi-

ment může suplovat zátěžový test hlasu (běžně se provádí hlasité čtení po dobu cca 15 až 45 minut). Výsledky MDV analýzy vokálů „a“ před zátěží a po ní byly statisticky porovnány a ukazují, že námi vytvořené zátěžové podmínky ovlivnily zejména hlas netrénované skupiny. Snížení perturbací a amplitudových parametrů a poměru neharmonického šumu po zátěži spíše implikují, že kvalita prodloužené fonace se zlepšila. Protože se však zároveň zvýšila i akustická hladina fonace a výška vokálu „a“, není možné přímo určit, zda se perturbační parametry změnily v návaznosti pouze na změnu výšky a hlasitosti [36], nebo spíše jako následek zátěže, resp. spíše „rozehrátí“ hlasu [37].

Porovnání naměřených parametrů pro habituální hlas ukázalo, že netrénované studentky mají statisticky významně vyšší průměrné hodnoty CQEGG, naopak nižší sklon třetinooktávového spektra v pásmu 0,4–4 kHz, a nižší hodnoty naměřené nejčastěji se vyskytující hladiny SPL (z hlasového pole) v porovnání s trénovanými zpěvačkami. Uvedený výsledek implikuje vyšší míru addukce hlasivek [38, 39] netrénované studentky při nižším průměrném akustickém výkonu, tedy pravděpodobně jejich hlas vykazoval i při habituálním hlase vyšší míru hyperkineze („tlačení na hlas“). Vyšší hodnoty sklonu spektra (menší pokles spektra) při nižších hodnotách CQEGG trénovaných zpěvaček je možné interpretovat jako vyšší efektivitu zesílení hlasu pravděpodobně na podkladě rezonančních vlastností nastavení vokálního traktu.

Porovnání dat s ohledem na rozložení v hlasovém poli lépe ukazuje oblasti se statistickými rozdíly. Většina statisticky významných rozdílů se nachází v centrální části překrývajících se habituálních hlasových polí, ale pro některé parametry se ukazují rozdíly zásadně v okrajových částech. Uvedený způsob vyhodnocení parametrů umožňuje identifikovat rozdíly mezi skupinami, které při porovnání průměrů nevykazují rozdíly (např. parametr A2). Takto identifikované oblasti indikují parametry výrazně ovlivněné zejména pozicí v hlasovém poli, a proto jsou vhodné na zaměření pozornosti a hledání příčin těchto specifických rozdílů.

Rozdíly ve zpěvním hlase se projeví zejména v průměrných hodnotách parametrů: hladina pěveckého formantu (resp. oblasti mezi 2–4 kHz, tedy i s tím spjatými parametry SPR a ER), kde jednoznačně měly vyšší hladiny trénované zpěvačky. Uvedené zjištění je spojováno v [6, 8] s percepcí zvonivosti („ringing“). Poloha maxima akustické energie v pásmu 2–4 kHz byla vyšší pro zpěvačky, což pravděpodobně souvisí s nárůstem a klastrováním vyšších formantů do jednoho – pěveckého formantu u zpěvaček, ale je možné také vysvětlení na základě souvislosti s hlasovou klasifikací [40], protože většina trénovaných zpěvaček se klasifikovala jako soprán. Hodnoty průměrů CQEGG byly vyšší pro netrénovanou skupinu, což jsou podobné výsledky jako v [41] při porovnání zpěvu muzikálových a klasických zpěvaček. Výsledky také naznačují větší addukci hlasivek [39], nebo používání více neškolného – hrudního/modálního rejstříku při zpěvu než „smíchávání rejstříků“ typického pro klasické zpěváky (zabra-

ňující percepčně výrazným přechodům (zlomům) do vyšších rejstříků [42]). Porovnání variability naměřených dat ukazuje, že u parametrů MAJ, dHa1Ha2, F2, F4, F5 a FSH mají větší rozptyl hodnot netrénované subjekty. Z uvedeného je možno předpokládat, že naopak zpěvačky ve svém dynamickém a tónovém rozsahu udržují tyto parametry více stabilní. Stabilita druhého, pěveckého, čtvrtého a pátého formantu může být základem pro udržení stabilnější barvy (ve smyslu tmavě světlého vyvážení hlasu). Rovnoměrnější hodnoty rozdílů hladin první a druhé harmonické pravděpodobně souvisí s udržováním jednoho vibračního hlasového rejstříku, resp. malou variabilitou koeficientu uzavření hlasivek, protože rozdíl hladin prvních dvou harmonických složek a koeficient uzavření hlasivek jsou vzájemně závislé [43], čímž klasicky trénované zpěvačky pravděpodobně zabráňovaly výrazným hlasovým zlomům mezi rejstříky.

Porovnání dat zpěvního hlasu s ohledem na pozici v hlasovém poli však ukazují podstatně menší procentuální zastoupení statistických rozdílů mezi parametry než pro habituální hlas. Uvedená skutečnost pravděpodobně souvisí s výrazně větší plochou překrývajícího se zpěvního hlasového pole. Například zesílení 4. formantu vyšlo jak procentuálně s ohledem na rozložení v hlasovém poli, tak i při porovnání celkových průměrných hodnot jako nejvíce rozdílný parametr mezi skupinami při zpěvu stupnic. Naproti tomu u mluvního hlasu nevykazoval významné rozdíly ani v porovnání průměrných hodnot, ani s ohledem na hlasové pole.

Tato diskrepance výsledků naznačuje komplikovanější vztahy mezi měřenými parametry zejména s ohledem na výšku, hlasitost, resp. použití hlasového rejstříku hlasu u zpěvního hlasu. Na druhé straně, již na základě námi zjištěných dat se ukazuje, že při zpěvu ve forte, trénované zpěvačky dosahují v průměru vyšších hladin pěveckého formantu při porovnatelných hladinách SPL a statisticky podobných hodnotách CQEGG. Uvedené výsledky potvrzují předpoklad klasické zpěvní techniky, že zesilování charakteristických spektrálních oblastí (pěveckého formantu) je prováděno hlavně na základě využití rezonančních vlastností vokálního traktu než na základě zvýšené tenze (a addukce) na úrovni hlasivek [41].

Nová metoda porovnání parametrů s ohledem na pozici v hlasovém poli také umožňuje nový pohled na změnu vlastností hlasu se změnou výšky a hlasitosti. Námi zjištěná data porovnání trénovaných zpěvaček a nezpěvaček rozděluje hlasové pole minimálně na dvě odlišné oblasti. V oblasti vysoké dynamiky, téměř v celém tónovém rozsahu hlasu, vyazuje trénovaná skupina vyšší hladiny pěveckého formantu, naopak jiná oblast (střední dynamiky pro nezpěvačky a malé dynamiky pro zpěvačky) naznačuje opačný poměr, tedy vyšší hladiny pěveckých formantů u nezpěvaček. Tato oblast u nezpěvaček se taky ukazuje typická vyššími perturbacemi hlasu, vyššími hodnotami CQEGG a sklonu spektra, proto předpokládáme, že je více „tlačená“. Uvedené výsledky také naznačují obecně jiné použití hlasových rejstříků, resp. způsob a polohu

přechodu rejstříků u trénovaných zpěvaček na rozdíl od nezpěvaček. Uvedenou skutečnost je ale nutno ještě detailněji prozkoumat. Podobným způsobem bude pravděpodobně možné stanovení i dalších nových hypotéz ohledně použití a barvy/kvality hlasu mezi různými skupinami.

Korelační analýza externích parametrů (dotazníků a percepčních testů) a parametrů hlasových polí ukazuje, že fyzická VHI dotazníků a DSI souvisí u mluvního projevu zejména s dynamickým rozsahem. Skóre emoční části VHI dotazníku souvisela s dynamickým a tónovým rozsahem zpěvního hlasu hlavně u zpěvaček. Kvalitní mluvní hlasy dosahovaly velký tónový rozsah a vyšší maximum SPL v celkovém řečovém projevu, tedy při maximálním volání.

Korelace percepčních vlastností s průměrnými hodnotami měřených parametrů ukázala množství vzájemných vztahů. Zajímavé bylo, že **celkový dojem** u mluvního hlasu nekoreloval s žádným z měřených parametrů habituálního hlasu. Proto předpokládáme, že hodnocení celkového dojmu mluvního hlasu je komplikované, pravděpodobně souvisí více s vlastnostmi řeči než hlasu (jako dikce, tempo-rytmus a fonetické vlastnosti), charakterizovanými specifickými změnami v závislosti na čase. Dalším možným vysvětlením je, že vícedimenzionální vlastnost – celkový dojem, je vyhodnocována sumárně a za stejně kvalitní je možné považovat různé kombinace vnímaných vlastností, tedy i měřených parametrů.

Pro obecnější interpretaci vnímaných vlastností pomocí měřených parametrů jsme použili porovnání podobných a rozdílných výsledků korelací mezi vnímanými vlastnostmi a naměřenými hodnotami parametrů pro mluvní a zpěvní hlas. Výsledky je možné shrnout následovně:

Koeficient trénovanosti podobně koreloval při zpěvu i při habituálním hlase jenom se zesílením 4. formantu, což může být pěvecký nebo také řečnický formant [34,40]. U mluvního hlasu dále trénovanost kladně korelovala s rozdílem hladin první a druhé harmonické složky, sklonem spektra v pásmu 0,4–4 kHz, záporně s CQEGG a polohou 6. formantu.

Při zpěvu v obou tóninách hlasová trénovanost kladně korelovala zejména s parametry, které hodnotí zesílení oblasti pěveckého formantu, dále s hladinou první harmonické a polohou 4. formantu. Uvedené výsledky naznačují, že pěvecký trénink má pravděpodobně jiný dopad na mluvní a jiný na zpěvní hlas.

Tmavost je sumárně projevila v mluvním i zpěvním hlase ve snížení frekvenční polohy 1. a 2. formantu, u mluvního hlasu souvisela i s výškou hlasu a těžištěm spektra (harmonického a s těžištěm v pásmu 0–2,5 kHz). Uvedené výsledky podporují zjištění [44] a naznačují souvislost pozice vokálních formantů s hlasovou kategorizací (zjištěno u mužů [45]). Jiné možné vysvětlení také je, že zpěv netrénovaných zpěvaček podobně jako u muzikálových zpěvaček je typický vyššími polohami vokálních formantů [46] (jejich zpěv byl více podobný mluvnímu hlasu než zpěv operních trénovaných zpěvaček), respektive, že netrénovaná skupina zpívala spíše „otevřeně“ (resp. „nekrytě“)

na rozdíl od „krytého“ zpěvu klasických zpěvaček, jak bylo popsáno v [47].

Rezonance se podobně projevovala u mluvního hlasu a zpěvu hlavně v zesílení hladiny pěveckého formantu (podobně jako [48]), dále ve zvýšení celkové hladiny akustického tlaku, v silnější hladině první harmonické (odpovídá [43,47]), ve zvýšené poloze těžiště celkového spektra a snížením VTI. Zajímavé je, že rezonance byla v zásadě spjatá s potlačením perturbačních vlastností jenom u zpěvu v d'dur tónině, což může být následek volnosti trénovaného hlasu v nižší poloze při „rezonovaném“ zpěvu. Dále se protichůdně rezonance projevovala mezi mluvním a zpěvním hlasem (jenom v d'dur tónině) v zesílení 3. formantu, kde bylo preferováno nižší zesílení u zpěvu.

Technika zpěvu podobně korelovala u zpěvních i u mluvních průměrů kladně s SPL a hladinami první harmonické a pěveckého formantu, záporně jenom s VTI. Tedy jak bylo uvedeno výše, technika zpěvu v zásadě souvisí s parametry typickými pro rezonovaný hlas.

Napětí se společně projevilo ve zvýšení Alfa poměru, polohy F1, polohy těžiště spektra, což souhlasí se zjištěním [49,50], kde se hodnoty Alfa poměru postupně zvyšovaly s delší hlasovou zátěží.

V rámci studie byly vyvinuté nové metody porovnání naměřených parametrů a jejich korelace s ohledem na pozici v hlasovém poli, ale také možnost normalizace hlasových polí s ohledem na průměrnou výšku a/nebo SPL. Předběžné výsledky ukazují, že plocha významné korelace parametrů, a v některých případech i charakter této korelace, se dle způsobu normalizace (výšky a/nebo hlasitosti) mění pro jednotlivé parametry. Proto bude nutné pro interpretaci těchto změn pokračovat ve výzkumu. Uvedený vliv naznačuje, že některé parametry závisí na relativní výšce hlasu vzhledem k průměrné poloze hlasu a/nebo průměrné hladině akustického tlaku při habituálním hlase. Je možné předpokládat i vliv jiných relativních parametrů (např. polohy 1. formantu na percepci rezonance hlasu).

5. Závěr

Ve studii byly porovnány akustické, elektroglotografické, percepční a dotazníkové parametry mezi skupinou klasicky trénovaných zpěvaček a nezpěvaček (bez zjevných hlasových potíží).

Index hlasového postižení se neukázal v celkovém skóre jako faktor odlišující trénované zpěvačky od netrénovaných, ale jeho jednotlivé subskóre naznačují zhoršení funkčního a fyzického stavu hlasu u nezpěvaček, zatímco u zpěvaček se ukázala jako dominantně postižená (citlivější) emoční část VHI dotazníku.

Porovnání parametrů „zpěvního“ hlasového pole ukázalo, že zpěvačky dokázaly tvořit hlas s vyšší hlasitostí a větším dynamickým rozsahem, ve vyšší polovině hlasového pole byl pozorován výrazný rozdíl v obrysech hlasového pole. Mluvní hlas nevykazuje výraznější dynamické rozdíly kromě nejčastější hladiny akustického tlaku, větší pro trénovanou skupinu. Tónový rozsah celkového hlasového

pole se neprojevil jako významný parametr. Pokud ale bylo měření hlasového pole spojeno se zpěvem lidové písně, ukázalo se, že nezpěvačky nejsou schopny zpívat ve vyšších polohách, na rozdíl od trénovaných zpěvaček. Proto předpokládáme, že je vhodné odlišovat vokální a funkční zpěvní hlasové pole.

Statistické rozdíly pro habituální hlas mezi zpěvačkami a nezpěvačkami byly v průměrných hodnotách zjištěny u parametrů, které je možno interpretovat jako rozdíl v efektivitě zesílení hlasu při nižší addukci hlasivek. Při zpěvu stupnic byly zjištěny rozdíly u parametrů, které naznačují lepší zesílení a pěveckou rezonanci u zpěvaček, naproti tomu v zásadě horší perturbace v hlase nezpěvaček a celkově odlišné tmavě světlé vyvážení hlasu mezi skupinami.

Porovnání parametrů s ohledem na rozložení v hlasovém poli podrobněji ukazuje části hlasového pole, kde jsou měřené parametry statisticky rozdílné. Na základě prevalence rozdílu uzavíráme, že v zásadě forte dynamika zpěvu stupnic vykazuje právě rezonanční rozdíly – zesílení pěveckého formantu mezi trénovanými zpěvačkami a nezpěvačkami. Mezzoforte dynamika vyšší poloviny tónového rozsahu hlasu odhalila zásadní rozdíl v perturbačních parametrech. Uvedené rozdíly pravděpodobně souvisí s hlasovými rejstříky a jejich rozdílným použitím u uvedených skupin a také s rozdílnou schopností tvořit hlas čistě (bez chrapotu nebo dyšnosti) v závislosti na požadované výšce a hlasitosti.

Hlasové pole s měřením akustických parametrů se ukazuje jako vhodná metoda vyšetření hlasu, která může pomoci hodnotit rozdíly objektivních parametrů mezi porovnávanými skupinami, lépe interpretovat vztahy s percepčními vlastnostmi hlasu, jakož i odhadnout stupeň hlasové trénovanosti.

Interpretace vnímaných vlastností pomocí korelace s akustickými parametry ukázala, že tmavost hlasu souvisí s polohou vokálních formantů a u habituálního hlasu i s těžištěm spektra a výškou hlasu. Rezonance hlasu, trénovanost a technika zpěvu je spjatá s posílením jak základní harmonické složky, tak oblasti pěveckého, resp. řečnického formantu.

6. Poděkování

Realizováno za podpory: MŠMT České republiky v rámci řešení projektu 1M0531 a projektu Ministerstva kultury ČR DF12P01OVV012. Speciální poděkování patří Mgr. Michaele Králové, která zprostředkovala studentky pro nahrávání a zpracovala dotazníky VHI v rámci své diplomové práce na Pedagogické fakultě UK v Praze.

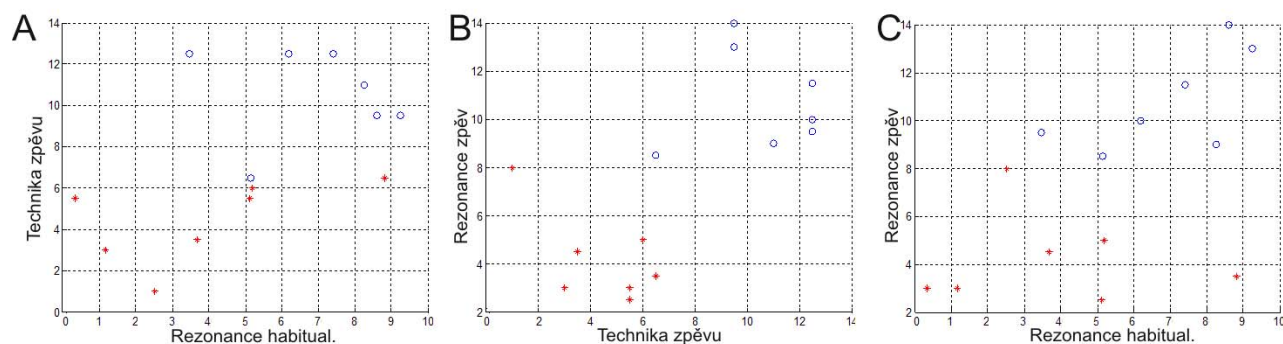
Reference

- [1] Frostová J.: Příspěvek k vývoji hlasu učitelů v kontextu pedagogické profese, *Škola a zdraví pro 21. století*, 3, p. 67–79, 2008.

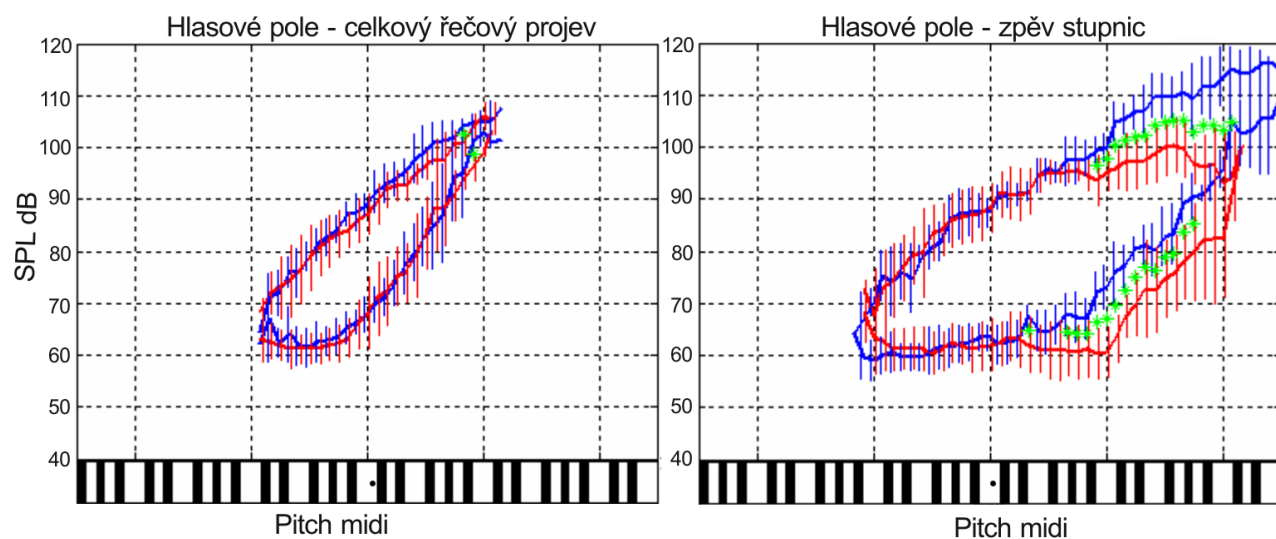
- [2] Frostová J.: Změny kvality hlasu učitelů měřené DSI v kontextu profesní přípravy, *Škola a zdraví pro 21. století*, p. 185–195, 2011.
- [3] Hazlett D. E., Duffy O. M., Moorhead S. A.: Review of the impact of voice training on the vocal quality of professional voice users: implications for vocal health and recommendations for further research, *Journal of Voice*, 25(2), p. 181–91, 2011.
- [4] Ilomäki I., Laukkanen A. M., Leppänen K., Vilkman E.: Effects of voice training and voice hygiene education on acoustic and perceptual speech parameters and self-reported vocal well-being in female teachers, *Logoped Phoniatr Vocol*, 33(2), p. 83–92, 2008.
- [5] Ilomäki I., Leppänen K., Kleemola L., Tyrmi J., Laukkanen A. M., Vilkman E.: Relationships between self-evaluations of voice and working conditions, background factors, and phoniatric findings in female teachers, *Logoped Phoniatr Vocol*, 34(1), p. 20–31, 2009.
- [6] Lehto L., Rantala L., Vilkman E., Alku P., Backstrom T.: Experiences of a short vocal training course for call-centre customer service advisors, *Folia Phoniatr Logop*, 55(4), p. 163–176, 2003.
- [7] Niebudek-Bogusz E., Fiszer M., Kotylo P., Sliwinska-Kowalska M.: Diagnostic value of voice acoustic analysis in assessment of occupational voice pathologies in teachers, *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 31(3), p. 100–106, 2006.
- [8] Niebudek-Bogusz E., Kotylo P., Sliwinska-Kowalska M.: Evaluation of voice acoustic parameters related to the vocal-loading test in professionally active teachers with dysphonia, *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 20(1), p. 25–30, 2007.
- [9] Timmermans B., Coveliers Y., Meeus W., Vandenaabee F., Van Looy L., Wuyts F.: The effect of a short voice training program in future teachers, *Journal of Voice*, 25(4), p. e191–e198, 2011.
- [10] Wingate J. M., Brown W. S., Shrivastav R., Davenport P., Sapienza C. M.: Treatment outcomes for professional voice users, *Journal of Voice*, 21(4), p. 433–449, 2007.
- [11] Pinczower R., Oates J.: Vocal projection in actors: the long-term average spectral features that distinguish comfortable acting voice from voicing with maximal projection in male actors, *Journal of Voice*, 19(3), p. 440–453, 2005.
- [12] Master S., De B. N., Chiari B. M., Laukkanen A. M.: Acoustic and perceptual analyses of Brazilian

- male actors' and nonactors' voices: long-term average spectrum and the "actor's formant", *Journal of Voice*, **22**(2), p. 146–154, 2008.
- [13] Siupsinskiene N., Lycke H.: Effects of vocal training on singing and speaking voice characteristics in vocally healthy adults and children based on choral and nonchoral data, *Journal of Voice*, **25**(4), p. e177–e189, 2011.
- [14] Walzak P., McCabe P., Madill C., Sheard C.: Acoustic changes in student actors' voices after 12 months of training, *Journal of Voice*, **22**(3), p. 300–313, 2008.
- [15] Awan S. N.: Superimposition of speaking voice characteristics and phonetograms in untrained and trained vocal groups, *Journal of Voice*, **7**(1), p. 30–37, 1993.
- [16] Kovacic G., Budanovac A.: Acoustic characteristics of adolescent actors' and non-actors' voices, *Folia Phoniatr Logop*, **54**(3), p. 125–132, 2002.
- [17] LeBorgne W. D., Weinrich B. D.: Phonetogram changes for trained singers over a nine-month period of vocal training, *Journal of Voice*, **16**(1), p. 37–43, 2002.
- [18] Mendes A. P., Brown W. S., Jr., Rothman H. B., Sapienza C.: Effects of singing training on the speaking voice of voice majors, *Journal of Voice*, **18**(1), p. 83–89, 2004.
- [19] Mendes A. P., Rothman H. B., Sapienza C., Brown W. S., Jr.: Effects of vocal training on the acoustic parameters of the singing voice, *Journal of Voice*, **17**(4), p. 529–543, 2003.
- [20] Brown W. S., Jr., Rothman H. B., Sapienza C. M.: Perceptual and acoustic study of professionally trained versus untrained voices, *Journal of Voice*, **14**(3), p. 301–309, 2000.
- [21] Omori K., Kacker A., Carroll L. M., Riley W. D., Blaugrund S. M.: Singing power ratio: quantitative evaluation of singing voice quality, *Journal of Voice*, **10**(3), p. 228–235, 1996.
- [22] Watts C., Barnes-Burroughs K., Estis J., Blanton D.: The singing power ratio as an objective measure of singing voice quality in untrained talented and non-talented singers, *Journal of Voice*, **20**(1), p. 82–88, 2006.
- [23] Ferguson S., Kenny D. T., Cabrera D.: Effects of training on time-varying spectral energy and sound pressure level in nine male classical singers, *Journal of Voice*, **24**(1), p. 39–46, 2010.
- [24] Švec J. G., Lejska M., Frostová J., Zábrodský M., Dršata J., Král P.: Česká verze dotazníku Voice Handicap Index pro kvantitativní hodnocení hlasových potíží vnímaných pacientem, *Otorinolaryngologie a Foniatrie*, **58**(3), p. 132–139, 2009.
- [25] Frič M., Kadlecová K., Szymiková R.: Záznam mluvního a zpěvního hlasu pro psychoakustické analýzy, MARC-Technologický list 13, Zvukové studio HAMU, Praha, 2007.
- [26] Frič M., Otčenášek Z., Syrový V.: Akustika hlasu, *Proc. of Umělecký hlas 2010*, p. 53–65, 2010.
- [27] KayPENTAX: Multi-Dimensional Voice Program (MDVP), Model 5105 [computer program]. Lincoln Park: KayPentax, A division of PENTAX Medical Company, 2008.
- [28] Erickson M. L.: Dissimilarity and the classification of female singing voices: a preliminary study, *Journal of Voice*, **17**(2), p. 195–206, 2003.
- [29] Collyer S., Davis P. J., Thorpe C. W., Callaghan J.: Sound pressure level and spectral balance linearity and symmetry in the messa di voce of female classical singers, *Journal of the Acoustical Society of America*, **121**(3), p. 1728–1736, 2007.
- [30] Collyer S., Davis P. J., Thorpe C. W., Callaghan J.: Fundamental frequency influences the relationship between sound pressure level and spectral balance in female classically trained singers, *Journal of the Acoustical Society of America*, **126**(1), p. 396–406, 2009.
- [31] Novák A.: *Foniatrie*, Avicenum Praha, 1996.
- [32] Wuyts F. L., Boldt M. S., Molenberghs M., Remacle M., Heylen L., Millet B., et al.: The dysphonia severity index: an objective measure of vocal quality based on multiparameter approach, *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, **43**, p. 796–809, 2000.
- [33] Ma E. P., Love A. L.: Electroglottographic evaluation of age and gender effects during sustained phonation and connected speech, *Journal of Voice*, **24**(2), p. 146–152, 2010.
- [34] Bele I. V.: The speaker's formant, *Journal of Voice*, **20**(4), p. 555–578, 2006.
- [35] Laukkanen A. M., Syrja T., Laitala M., Leino T.: Effects of two-month vocal exercising with and without spectral biofeedback on student actors' speaking voice, *Logoped Phoniatr Vocol*, **29**(2), p. 66–76, 2004.
- [36] Brockmann M., Storck C., Carding P. N., Drinnan M. J.: Voice loudness and gender effects on jitter and shimmer in healthy adults, *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, **51**(5), p. 1152–1160, 2008.

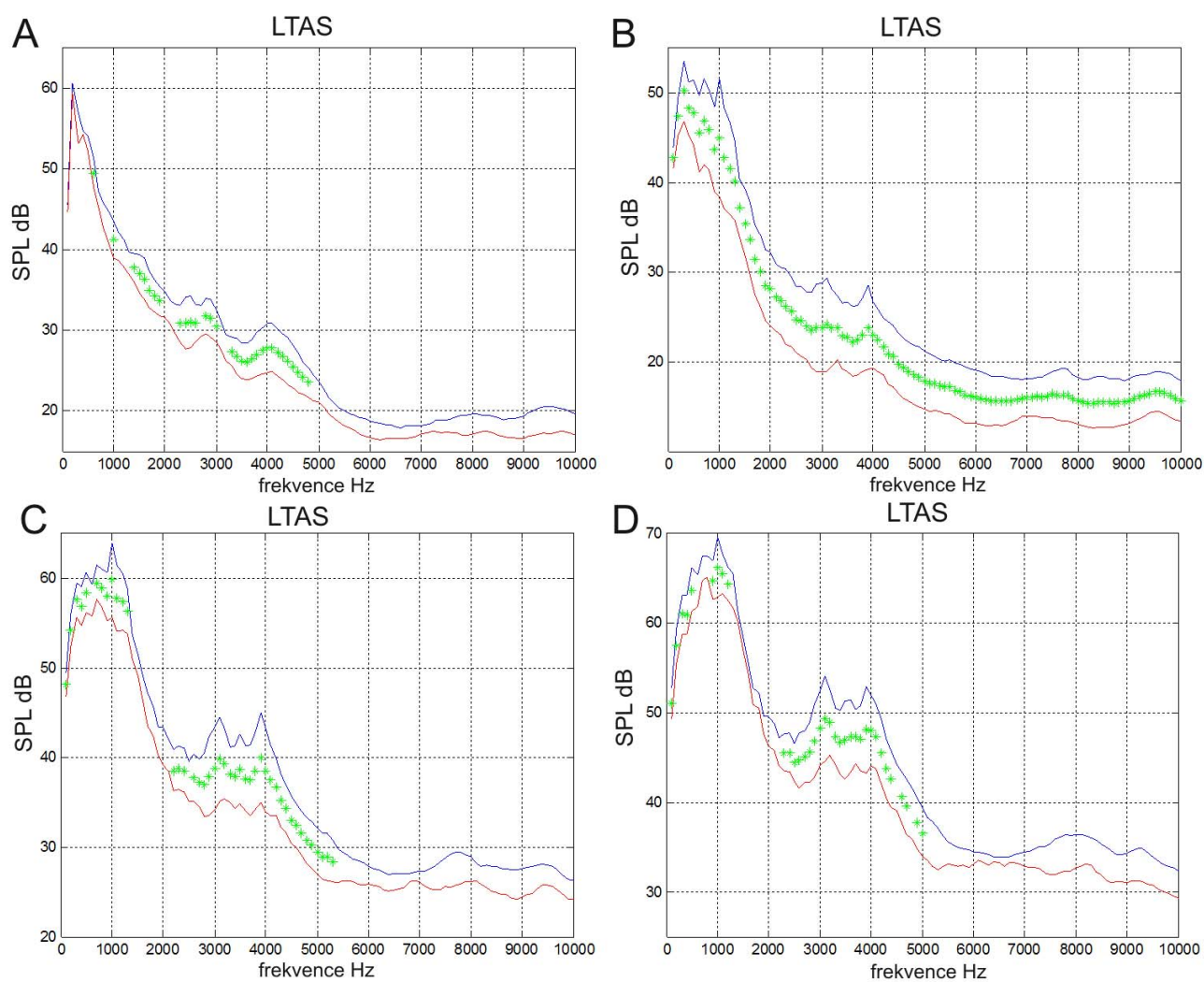
- [37] Amir O., Amir N., Michaeli O.: Evaluating the influence of warmup on singing voice quality using acoustic measures, *Journal of Voice*, **19**(2), p. 252–260, 2005.
- [38] Herbst C. T., Ternstrom S., Švec J. G.: Investigation of four distinct glottal configurations in classical singing—a pilot study, *Journal of the Acoustical Society of America*, **125**(3), p. EL104–EL109, 2009.
- [39] Herbst C. T., Howard D., Schlomicher-Thier J.: Using electroglottographic real-time feedback to control posterior glottal adduction during phonation, *Journal of Voice*, **24**(1), p. 72–85, 2010.
- [40] Sundberg J.: Level and center frequency of the singer's formant, *Journal of Voice*, **15**(2), p. 176–186, 2001.
- [41] Barlow C., Lovetri J.: Closed quotient and spectral measures of female adolescent singers in different singing styles, *Journal of Voice*, **24**(3), p. 314–318, 2010.
- [42] Henrich N., d'Alessandro Ch., Doval B., Castellengo M.: Glottal open quotient in singing: Measurements and correlation with laryngeal mechanisms, vocal intensity, and fundamental frequency, *Journal of the Acoustical Society of America*, **117**(3), p. 1417–1430, 2005.
- [43] Björkner E.: Musical theater and opera singing—why so different? A study of subglottal pressure, voice source, and formant frequency characteristics, *Journal of Voice*, **22**(5), p. 533–540, 2008.
- [44] Bloothoof G., Plomp R.: Spectral analysis of sung vowels. III. Characteristics of singers and modes of singing, *Journal of the Acoustical Society of America*, **79**(3), p. 852–864, 1986.
- [45] Erickson M. L.: Dissimilarity and the classification of male singing voices, *Journal of Voice*, **22**(3), p. 290–299, 2008.
- [46] Stone R. E., Jr., Cleveland T. F., Sundberg P. J., Prokop J.: Aerodynamic and acoustical measures of speech, operatic, and Broadway vocal styles in a professional female singer, *Journal of Voice*, **17**(3), p. 283–297, 2003.
- [47] Hertegård S., Gauffin J., Sundberg J.: Open and Covered Singing as Studied by Means of Fiberoptics, Inverse Filtering, and Spectral Analysis, *Journal of Voice*, **4**(3), p. 220–230, 1990.
- [48] Hanayama E. M., Camargo Z. A., Tsuji D. H., Rebelo Pinho S. M.: Metallic voice: physiological and acoustic features, *Journal of Voice*, **23**(1), p. 62–70, 2009.
- [49] Artkoski M., Tommila J., Laukkanen A. M.: Changes in voice during a day in normal voices without vocal loading, *Logoped Phoniatr Vocol*, **27**(3), p. 118–123, 2002.
- [50] Laukkanen A. M., Jarvinen K., Artkoski M., Waaramaa-Maki-Kulmala T., Kankare E., Sippola S., et al.: Changes in voice and subjective sensations during a 45-min vocal loading test in female subjects with vocal training, *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, **56**(6), p. 335–346, 2004.



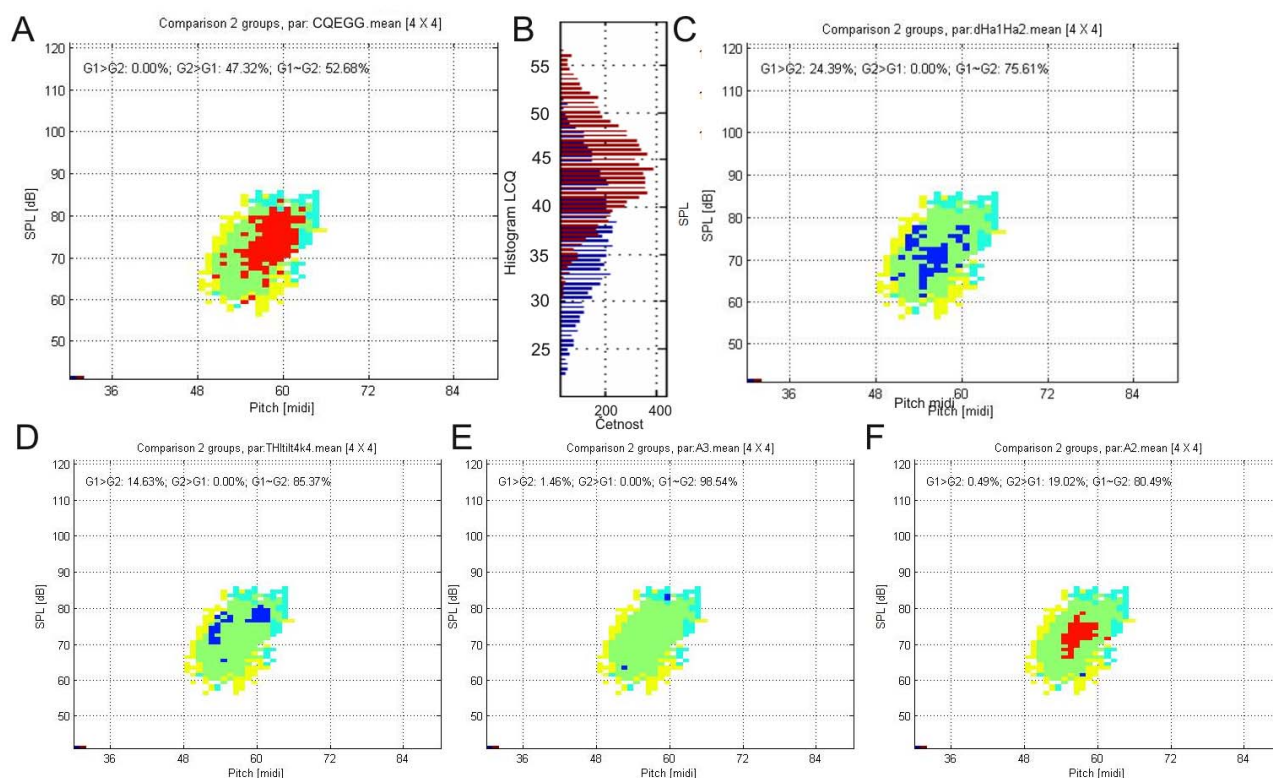
Obrázek 1: Schematické zobrazení rozložení subjektů trénované skupiny (modré kroužky) a netréované skupiny (červené křížky) na základě průměrného hodnocení vlastností hlasu: A) Rezonance habituálního hlasu vs. technika zpěvu, B) Technika zpěvu vs. rezonance zpěvu, C) Rezonance habituálního hlasu vs. rezonance zpěvu



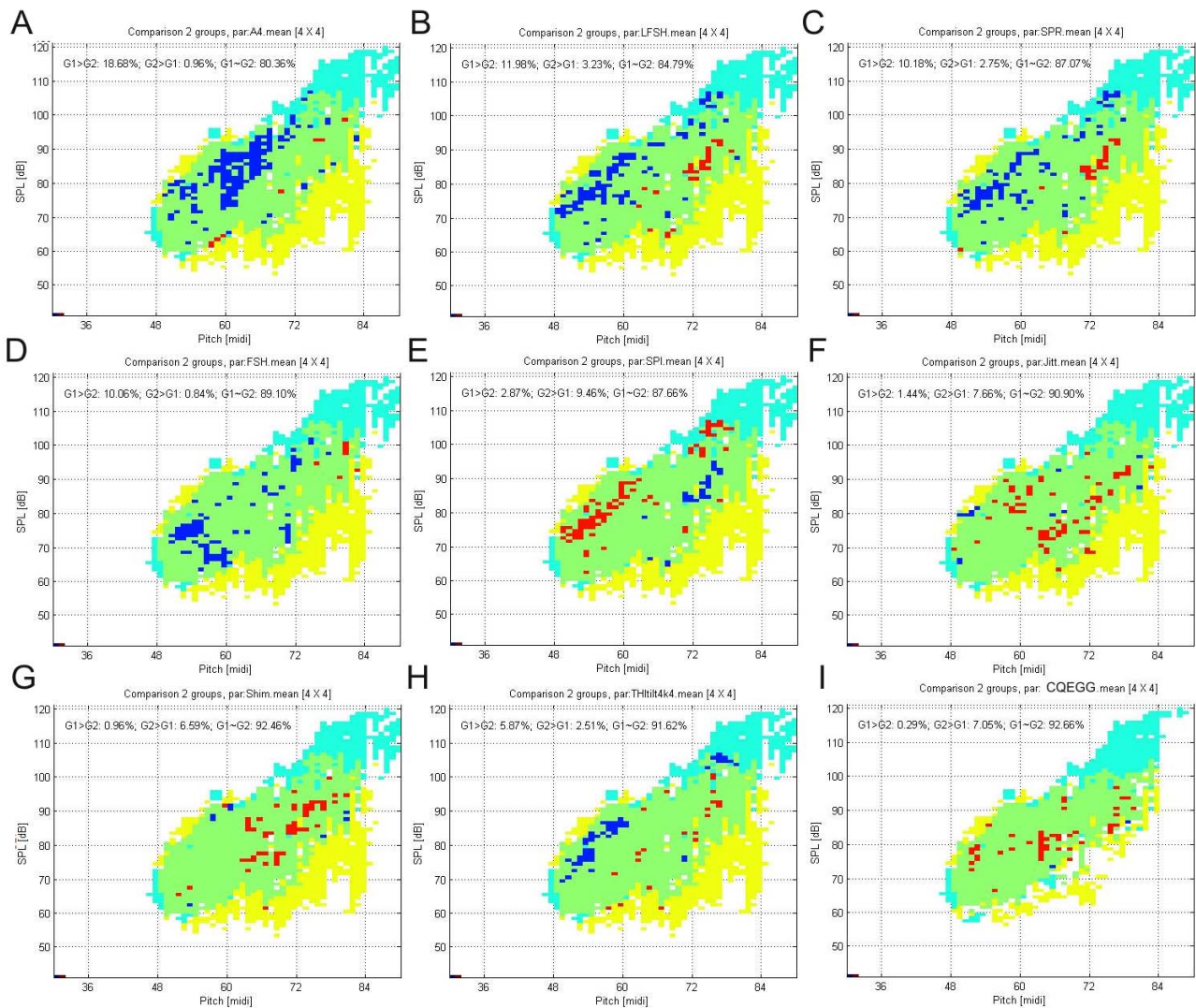
Obrázek 2: Porovnání průměrných obrysů mluvních (vlevo sumárně pro: habituální, hlasitý mluvní hlas a volání) a zpěvních (vpravo sumárně pro úkoly zpěv stupnic, crescendo a decrescendo a glissando) hlasových polí zpěvaček (modře) a netréovaných (červeně) studentek. Na ose x je zobrazena výška hlasu v midi půltónech, tečka na klaviatuře označuje c' v evropské notaci, resp. $C4$ v americké ($F0 = 261,6 \text{ Hz}$). Zelené hvězdičky při obrysech hlasového pole označují tóny se statisticky významným rozdílem v průměrně dosažené hladině akustického tlaku



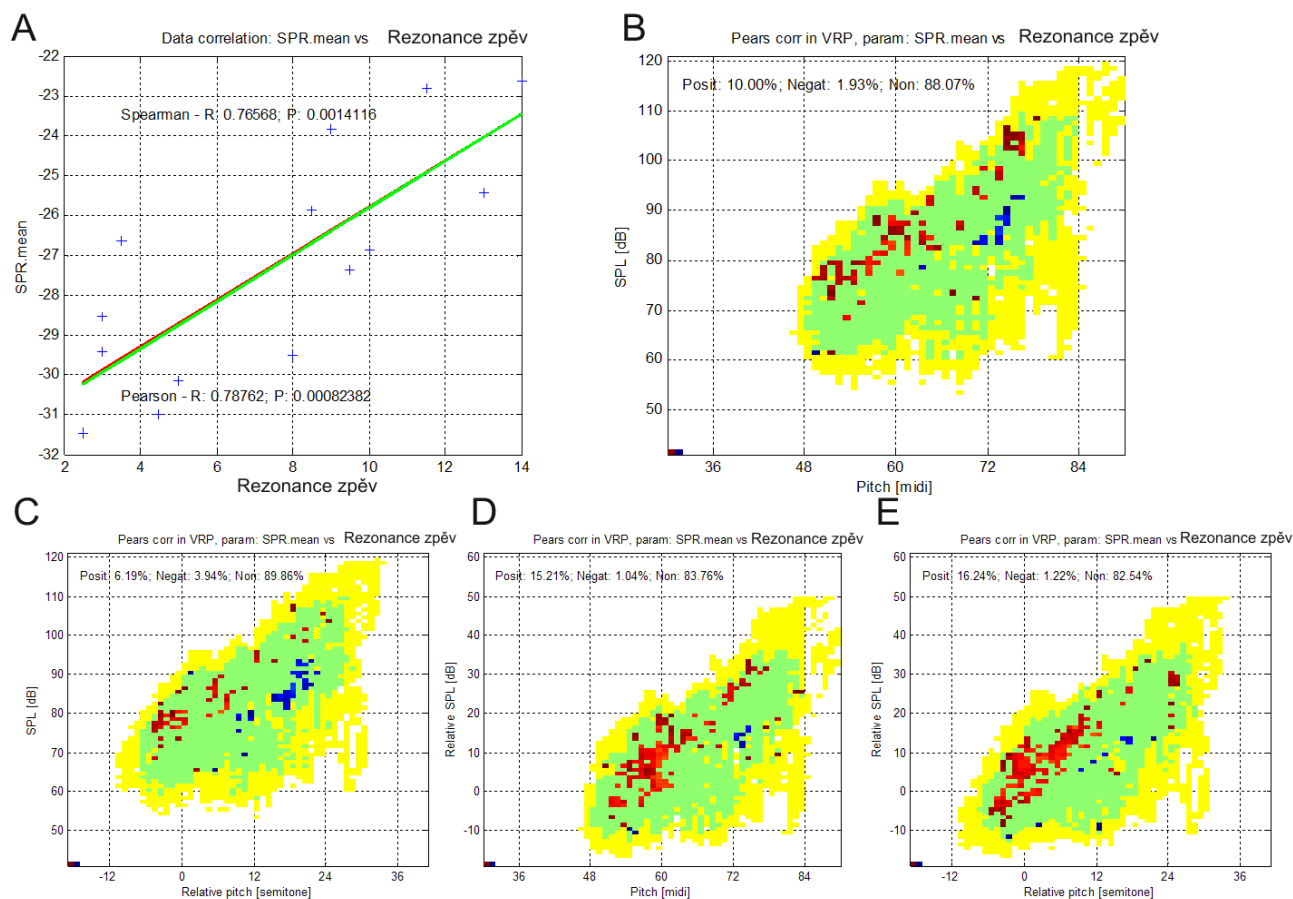
Obrázek 3: Porovnání dlouhodobých průměrovaných spekter (LTAS) mezi skupinami trénovaných zpěvaček (modře) a netrénovaných studentek (červeně) pro: A) habituální mluvní hlas; zpěv stupnice v B) *pp* dynamice, C) *mf* dynamice a D) *ff* dynamice. Zelené hvězdičky naznačují oblasti spektra se statisticky významným rozdílem v průměrných hladinách mezi skupinami



Obrázek 4: Statistické porovnání rozložení vypočtených parametrů s ohledem na pozici v hlasovém poli mezi trénovanými zpěvačkami a nezpěvačkami u habituálního mluvního hlasu. (Modrá označuje plochu hlasového pole, kde byly statisticky významně vyšší hodnoty měřeného parametru pro trénované zpěvačky, červená pro nezpěvačky. Zelená označuje plochu překrývajících se hlasových polí bez statisticky významného rozdílu, tyrkysová ukazuje část hlasového pole, které bylo naměřeno pouze pro skupinu zpěvaček, žlutá pouze pro skupinu nezpěvaček. V obrázcích jsou procentuálně uvedeny poměry ploch vzhledem k celkové překrývající se ploše hlasových polí: $G1 > G2$ – sign. vyšší hodnoty pro zpěvačky, $G2 > G1$ sign. vyšší hodnoty pro nezpěvačky, $G1 \sim G2$ statisticky nevýznamný rozdíl v hodnotách parametrů mezi skupinami. Osa x znázorňuje naměřenou výšku tónu převedenou na tzv. midi stupnici, kde hodnota 60 odpovídá c' .) A) porovnání rozložení parametru CQEGG v hlasovém poli, červená označuje oblast se statisticky významně vyššími hodnotami CQEGG pro nezpěvačky (v 47,3 % plochy); B) histogram rozložení naměřených hodnot CQEGG pro všechny segmenty habituálního hlasu (modrá pro trénované zpěvačky, červená pro nezpěvačky); C) porovnání rozložení parametru dHa1Ha2 v hlasovém poli (24,4 % plochy vyšší hodnoty parametru pro trénované); D) parametr sklon spektra v pásmu 0,4–4 kHz (14,6 % plochy vyšší hodnoty pro trénované zpěvačky); E) zesílení 3. formantu (1,4 % plochy vyšší hodnoty pro trénované zpěvačky); F) zesílení 2. formantu (19 % plochy vyšší hodnoty pro nezpěvačky)



Obrázek 5: Porovnání rozložení parametrů ve zpěvním hlasovém poli: A) A4 (zesílení 4. formantu) ve zpěvním hlasovém poli (v 18,7% plochy překrývajících se hlasových polí dosahovaly trénované zpěvačky vyšších hodnot); B) LFSH (maximální hladina pěveckého formantu); C) Singing power ratio (SPR); D) FSH (poloha pěveckého formantu); E) Soft Phonation Index (SPI); F) Jitter; G) Shimmer; H) sklon spektra v pásmu 0,4–4 kHz; I) CQEGG. (Zelená zobrazuje oblast překrývajících se hlasových polí, červená značí oblast, kde je statisticky významně vyšší hodnota měřeného parametru pro netrénovanou skupinu – procentuální hodnocení v textu obrázku $G2 > G1$, modrá znamená vyšší hodnotu parametru u zpěvaček ($G1 > G2$). Tyrkysová označuje oblast hlasového pole, kterou dosahovaly pouze zpěvačky, žlutá pouze netrénované studentky. Osa x znázorňuje naměřenou výšku tónu převedenou na tzv. midi stupnici, kde hodnota 60 odpovídá c')



Obrázek 6: A) Korelační analýza mezi subjektivním hodnocením rezonance zpěvu a průměry parametru Singing Power Ratio (SPR) u jednotlivých subjektů. B) Korelace rezonance a SPR vzhledem k pozici ve zpěvním hlasovém poli. C–E) Korelace rezonance a SPR vzhledem k normalizované pozici v hlasovém poli: C) vzhledem k průměrné habituální výšce hlasu, D) vzhledem k průměrné habituální SPL, E) vzhledem k průměrné habituální výšce i SPL. (Žlutá oblast znázorňuje celkovou plochu naměřených pozic v hlasovém poli, zelená – části překrývajících se hlasových polí, ve kterých bylo možno vypočítat korelaci, červená – oblasti se statisticky významnou ($p < 0,05$) kladnou korelací mezi průměry měřeného parametru jednotlivce v dané oblasti hlasového pole a subjektivním hodnocením stupně rezonance zpěvu a modrá – obdobně jako červená, ale pro zápornou korelaci.)

Parametr		Habituační hlas				Zpěv stupnic			
Název	Zkratka	T-TEST	Trén.>Nezp.	Nezp.>Trén	Trén.~Nezp.	T-TEST	Trén.>Nezp.	Nezp.>Trén	Trén.~Nezp.
Kontaktní koeficient (uzavření) dle EGG	CQEGG	–1	0,0 %	47,3 %	52,7 %	–1	0,3 %	7,1 %	92,7 %
Rozdíl hladin 1. a 2. harmonické složky akustického spektra	dHa1Ha2	1	24,4 %	0,0 %	75,6 %	ns	2,0 %	6,2 %	91,7 %
Zesílení 2. formantu	A2	ns	0,5 %	19,0 %	80,5 %	1	9,9 %	1,1 %	89,0 %
Sklon třetino-oktávového spektra v pásmu 0,4–4 kHz	THilt4k4	1	14,6 %	0,0 %	85,4 %	ns	5,9 %	2,5 %	91,6 %
EGG Průměrný absolutní Jitter	L_MAJ	ns	14,6 %	0,5 %	84,9 %	ns	3,1 %	1,2 %	95,7 %
EGG Jitter	L_Jitt	ns	14,2 %	1,5 %	84,4 %	ns	3,3 %	1,0 %	95,7 %
Hladina první harmonické složky	H1	1	12,7 %	1,0 %	86,3 %	1	3,0 %	3,4 %	93,7 %
Zesílení 5. formantu	A5	ns	11,2 %	0,0 %	88,8 %	1	7,0 %	1,7 %	91,4 %
EGG absolutní Jitter	L_Jita	ns	11,2 %	0,5 %	88,3 %	ns	3,7 %	0,9 %	95,4 %
Poloha 6. formantu	F6	ns	1,0 %	9,8 %	89,3 %	ns	1,1 %	6,5 %	92,4 %
EGG Shimmer	L_Shim	ns	9,3 %	0,0 %	90,7 %	ns	1,3 %	1,6 %	97,0 %
Poloha 4. formantu	F4	ns	2,0 %	8,3 %	89,8 %	ns	9,5 %	1,0 %	89,6 %
Poloha pěveckého formantu	FSH	ns	7,8 %	0,5 %	91,7 %	1	10,1 %	0,8 %	89,1 %
Variabilita F0	vF0	ns	7,8 %	1,5 %	90,7 %	–1	0,7 %	7,3 %	92,0 %
Zesílení 6. formantu	A6	ns	7,8 %	0,0 %	92,2 %	ns	3,5 %	2,1 %	94,4 %
EGG Shimmer v dB	L_ShdB	ns	7,8 %	0,0 %	92,2 %	ns	2,5 %	0,8 %	96,7 %
Mean Absolute Jitter	MAJ	ns	6,8 %	3,4 %	89,8 %	–1	1,4 %	9,1 %	89,5 %
Energy ratio	ER	ns	1,0 %	6,3 %	92,7 %	–1	2,2 %	11,3 %	86,6 %
Soft Phonation Index	SPI	ns	1,0 %	6,3 %	92,7 %	–1	2,9 %	9,5 %	87,7 %
Těžiště spektra v pásmu 2–5 kHz	COG25k	ns	6,3 %	1,0 %	92,7 %	ns	7,9 %	1,9 %	90,2 %
Pitch Period Perturbation Quotient	PPQ	ns	5,9 %	0,5 %	93,6 %	–1	0,9 %	8,8 %	90,3 %
Voice Turbulence Index	VTI	ns	0,0 %	5,9 %	94,2 %	–1	5,3 %	1,4 %	93,3 %
Maximální hladina v pásmu pěveckého formantu	LFSH	1	5,4 %	0,0 %	94,6 %	1	12,0 %	3,2 %	84,8 %
Zesílení 1. formantu	A1	ns	1,0 %	4,9 %	94,2 %	–1	1,7 %	8,5 %	89,8 %
Poloha 1. formantu	F1	ns	0,5 %	4,9 %	94,6 %	ns	4,4 %	3,1 %	92,5 %
Jitter (relativní %)	Jitt	ns	4,4 %	1,0 %	94,6 %	–1	1,4 %	7,7 %	90,9 %
Shimmer	Shim	ns	4,4 %	0,0 %	95,6 %	–1	1,0 %	6,6 %	92,5 %
Singing Power Ratio	SPR	ns	3,9 %	0,5 %	95,6 %	1	10,2 %	2,8 %	87,1 %
Jitter (absolutní μs)	Jita	ns	3,9 %	2,0 %	94,2 %	ns	1,3 %	7,9 %	90,8 %
Shimmer v dB	ShdB	ns	3,9 %	0,5 %	95,6 %	ns	1,3 %	6,4 %	92,3 %
Alpha ratio	Alfa	ns	3,4 %	0,0 %	96,6 %	1	2,2 %	4,6 %	93,3 %
Zesílení 4. formantu	A4	ns	2,4 %	0,5 %	97,1 %	1	18,7 %	1,0 %	80,4 %
Relative Average Perturbation %	RAP	ns	2,4 %	1,5 %	96,1 %	–1	1,1 %	8,1 %	90,8 %
Těžiště spektra FFT	COGamp	ns	2,0 %	0,0 %	98,1 %	1	6,2 %	2,3 %	91,5 %
Zesílení 3. formantu	A3	1	1,5 %	0,0 %	98,5 %	ns	1,3 %	7,4 %	91,3 %
Těžiště harmonického spektra	COGharm	ns	1,5 %	0,0 %	98,5 %	1	4,4 %	2,0 %	93,5 %

Tabulka 3: Porovnání průměrných hodnot parametrů a rozložení v rámci hlasového pole mezi skupinami pro habituační hlas a pro zpěvní hlasové pole. Sloupec T-TEST – statistika porovnání průměrných hodnot (1 – statisticky významně ($p < 0,05$) větší hodnota parametru pro skupinu trénovaných zpěváků, –1 – větší hodnota pro nezpěváky, ns – není zjištěn signifikantní rozdíl průměrů hodnot). Sloupce Trén. vs. Nezp. – procentuální zastoupení v ploše překrývajících se hlasových polí statisticky rozdílných parametrů (<, >) nebo porovnatelných (~). Modře jsou označeny parametry, kde je rozdíl mezi procentuálním zastoupením ploch se statisticky významným rozdílem parametrů s ohledem na polohu v hlasovém poli mezi skupinami větší než 5 % u habituačního hlasu, červeně pro zpěvní hlas

Korelace	Koef. Trén.	VHI_P	VHI_E	DSI	Prům. Celk. dojem hab.	Prům. Rezon. hab.	Prům. Tmavost hab.	Prům. Napětí hab.	Prům. Tech. zpěv	Prům. Rezon. zpěv
P.mean hab.							–0,73*	0,89*	0,61	
P.min hab.							–0,62	0,59		
P.max hab.							–0,57	0,81*	0,69*	
TR hab.						0,52				
SPL.mean hab.						0,89*			0,62	
SPL.min hab.						0,62				
SPL.max hab.						0,8*		0,57		
DR hab.										
VRP Area hab.								0,64		
P.max řeč									0,56	
TR řeč					0,58					
SPL.max řeč		–0,58			0,55					
DR řeč		–0,71*		0,6						
P.max zpěv			0,56	0,78*						
TR zpěv			0,54	0,64*						
SPL.min zpěv				–0,8*		0,56				
SPL.max zpěv	0,81*			0,52					0,71*	0,6
DR zpěv	0,66*		0,54	0,78*						
VRP Area zpěv				0,72*						

Tabulka 4: Korelace parametrů hlasových polí (P – výšková poloha (v púltonech), SPL – hladina akustického tlaku, VRP Area – plocha hlasového pole, DR – dynamický rozsah, TR – púltonový rozsah, hab. – habituální hlas, řeč – řečové hlasové pole obsahující habituální čtení, hlasité čtení a volání, zpěv – hlasové pole na vokál „a“) s koeficientem trénovanosti, VHI fyzickou a emoční částí a průměry hodnocení poslechových testů. Uvedeny jsou jenom statisticky významné korelace ($p < 0,05$), hvězdičkou jsou označeny korelace s $p < 0,01$

	Habituaální hlas							Zpěv stupnic									
Korelace	Koef. trén.	Rez. hab.	Tmavost hab.	Nap. hab.	Tech. zpěv	Rez. zpěv	Tmav. zpěv	Koef. trén.	Nap. hab.	Tech. d´	Tech. fis´	Rez. hab.	Rez. d´	Rez. fis´	Tmavost hab.	Tmav. d´	Tmav. fis´
F0x			−0,72*	0,89*	0,62												
SPL		0,9*			0,61			0,64		0,68*	0,77*	0,52	0,72*	0,86*		0,6	0,88*
ZCR			−0,58	0,8*					0,77*	0,62					−0,53		
Jita		−0,61		−0,77*	−0,69*								−0,58				
Jitt		−0,63			−0,55								−0,62				
ShdB																	
Shim										−0,63			−0,59				−0,74
MAJ										−0,55	−0,71	−0,56	−0,7*				
RAP		−0,63											−0,64				
PPQ											−0,66		−0,65				
vF0											−0,68		−0,64				
SPI								−0,68*		−0,66*	−0,74	−0,6	−0,76*				−0,64
VTI		−0,88*			−0,61	−0,55		−0,61		−0,65	−0,74		−0,7*	−0,84*		−0,61	−0,86*
ER				−0,54				−0,75*		−0,64	−0,79*	−0,61	−0,8*	−0,69			−0,7
SPR				0,55				0,74*		0,71*	0,82*	0,66*	0,79*	0,68			0,72
Alfa				0,7*					0,67*	0,67*							
H1		0,9*			0,67*	0,63		0,64		0,58	0,69		0,6	0,8*			0,78*
dHa1Ha2	0,56					0,59			−0,67*			−0,53					
F1			−0,73*	0,69*			−0,59		0,58	0,58					−0,54		
F2		−0,6	−0,55													−0,55	
F3		−0,62					−0,61										
F4		−0,7*			−0,54			0,53					0,58				
F5		−0,56															
F6	−0,62					−0,62											
A1									−0,78*	−0,63	−0,68	−0,52					
A2										0,75*	0,71		0,65	0,65			0,73
A3		0,6			0,75*	0,55							−0,54				
A4	0,51							0,81*		0,78*	0,86*	0,59	0,84*	0,83*			0,82*
A5		0,63						0,67*					0,69*				
COGamp		0,52		0,86*					0,72*	0,78*	0,79*	0,52	0,56	0,79*			0,69
COG0k25			−0,52	0,84*					0,76*	0,73*	0,71			0,7			
COGharm			−0,54	0,73*					0,67*	0,8*	0,69			0,71			
FSH								0,54					0,67*				
LFSH		0,84*		0,66*	0,66	0,56		0,76*		0,77*	0,88*	0,64*	0,84*	0,87*			0,91*
THItilt		0,65*		0,77*	0,6						0,71			0,86*			0,71
THItilt4k4	0,64					0,66*			0,53								
CQEGG	−0,58	−0,74*			−0,72*	−0,78*					−0,82*		−0,57	−0,77*			

Tabulka 5: Korelace průměrů akustických a EGG parametrů habituálního hlasu a zpěvu stupnic s koeficientem trénovanosti a hodnocením percepčních vlastností. Uvedeny jsou pouze statisticky významné korelace ($p < 0,05$), hvězdičkou jsou označeny korelace s $p < 0,01$

Měření reakčních dob u experimentů s akustickými podněty

Pavel Šturm^a a Jan Volín^b

^aFonetický ústav FF UK, nám. J. Palacha 2, 116 38 Praha 1

^bMetropolitní univerzita Praha, Dubečská 10, 100 31 Praha 10

e-mail: sturmp@seznam.cz

Acoustics is in its applicational enterprises often obliged to consider perceptual aspects of various problems. The present study explains current use of reaction time (latency) measurements in research that involves acoustic stimuli and compares three software tools that are freely available to the research community. The three applications are first briefly described with the focus on their strengths and weaknesses and then tested in terms of the consistency of their sound-file initiation and measurement precision. Automatically extracted data are compared with the values retrieved manually with the help of an external device and the best results are reported.

1. Motivace měření

Když se v 19. století v rámci psychologie vyprofilovala disciplína s názvem psychofyzika, došlo tím pouze k akcentování zjevného: zkoumání objektivních jevů je ve většině situací potřeba spojit s objasněním vazeb na lidskou percepci, aby byly poznatky aplikovatelné. V případě akustiky je tento vztah snad ještě zřetelnější: zohlednit kvantitativní vztahy mezi zvukovými podněty a sluchovými vjemy vždy patřilo mezi ústřední problémy oboru (viz např. [1, s. 15]).

Analogická situace nastala konečně i v lingvistice spolu s pochopením, že to, jak řečovou komunikaci vědomě analyzujeme a jaké jsou její skutečné objektivně měřitelné parametry, jsou dvě různé věci. Fonetický aspekt má přitom k plnému akceptování tohoto faktu nejbližší. V posledních desetiletích je proto obvyklé vztahovat řečové i jazykové jevy přímo ke kompetencím uživatelů jazyka [2] a není nijak vzácné mluvit přímo o mentálních reprezentacích jazykových jevů a jejich neurofyzilogickém základě. Doklady se objevují i v celé řadě časopisů publikujících v dané oblasti (např. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience, Brain Imaging and Behavior, Memory and Cognition, Journal of Experimental Psychology, Behavior Research Methods* a další).

Přes nesporný pokrok v přístrojovém vybavení však bádatelé stále stojí před problémem finanční dostupnosti technologií a srozumitelnosti (či jednoznačnosti) získaných dat. Proto dává řada z nich i nadále přednost experimentům s měřením reakčních dob. Nevyžadují totiž nákladné zařízení a staví na nezpochybnitelném základě: delší reakční doby indikují složitější cerebrální zpracování signálu. Týká-li se tedy pracovní hypotéza např. přirozenosti, elementárnosti nebo preferovanosti určitých jevů v akustickém kontinuu, je možno ji ověřovat pomocí experimentů s reakční dobou.

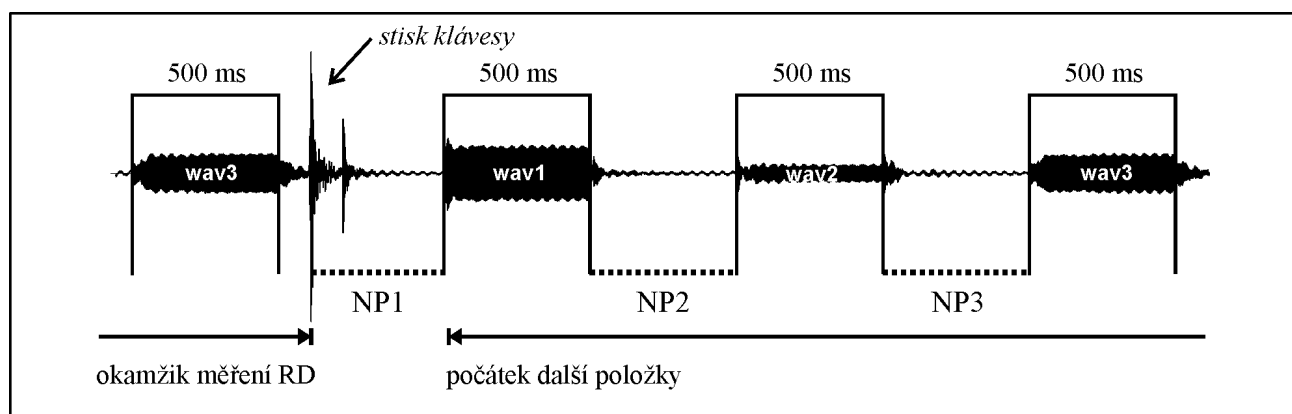
Buxtonová na jednom z takových experimentů ukazuje vliv rytmické uspořádanosti promluv na snadnost řečové percepce: jednotlivá cílová slova jsou rychleji rozpoznána ve větách s přirozeným rytmem řeči než ve stejných větách, ale s neobvyklým temporálním uspořádáním [3]. Jestliže

tedy člověk rozpozná totéž slovo pomaleji ve větě s narušeným rytmem, pak je rytmickou strukturu řeči nutno brát vážně a nepovažovat ji za pouhý „kosmetický“ doplněk řečové produkce. Podobně byla nedávno prokazována relevance intonačních kategorií v němčině [4], mimo jiné i s odvoláním na známou tezi, že diskriminace přes kategoriální hranice je snadnější (a tím pádem rychlejší) než uvnitř typů. Jestliže tedy prezentujeme posluchačům dvě rozlišné melodické kontury, které ale v jazyce plní stejnou funkci, pak je rozhodnutí, že se dané kontury opravdu liší, namáhavější než totéž rozhodnutí u fyzikálně stejně rozdílných kontur, které ale plní v jazyce dvě různé funkce. Naš percepční aparát je nastaven tak, aby stejný rozdíl vnímal různě v závislosti na komunikačním významu daného signálu.

Příklady využití měření reakcí na akustické podněty nemusí být jen z oblasti lingvistického bádání. Aplikovaný výzkum berlínského Institutu technologií se nedávno věnoval komunikaci řidičů motorových vozidel s hlasově ovládanými systémy během jízdy [5]. Protože je žádoucí, aby pozornost řidiče byla co nejméně rozptýlována, hledají se takové akustické prvky, které při nejmenší kognitivní zátěži přenesou cílovou informaci nejspolehlivěji. V uvedené studii se pracovalo jednak se zrychlenou řečí, jednak s řečí sémanticky chudou a dále se zvukovými ikonami, tj. neřečovými signály, s jejichž významy se řidič musí předem seznámit. Zrychlená řeč se ukázala jako nejméně efektivní.

Johnson ovšem varuje, že jakkoli se zdá interpretace reakčních dob jednoduchá, u experimentů, které se již příliš vzdalují přirozenému komunikačnímu chování člověka, je třeba opatrnosti [6, s. 129]. Při prověřování zdánlivě elegantní hypotézy o fonologické pre-stimulaci se zjistilo, že respondenti mění své chování během delšího experimentu tak, aby se na nezvyklý úkol adaptovali a splnili ho za daných podmínek co nejlépe. Vysoká adaptabilita člověka tedy může maskovat percepční stereotypy i u tak automatizované činnosti, jakou je dekodování řečového signálu.

Přestože u složitějších hypotéz nemusí být interpretace reakčních dob jednoznačná, ukazuje se, že pokud je experiment řádně připraven a *povaha, pořadí i kontext* stimulů



Obrázek 1: Schéma s oscilogramem akustických událostí v testu (500-ms intervalů) s okamžiky, od nichž nebo k nimž se měří reakční doba (šipky ve spodní části obr.). NP1-NP3 jsou zpoždění nutná pro spuštění zvuku. Ukázka z programu *Alvin*

jsou důkladně promyšleny, výsledky bývají přesvědčivé. To přispívá k atraktivnosti i poměrně vysoké prestiži experimentů s reakčními dobami. Nakonec vlastně i to, že 14 z 18 psycholingvistických procedur v [7] je založeno na měření reakčních dob, mluví samo za sebe.

Je ovšem zřejmé, že i měření reakčních dob klade poměrně přísné nároky na softwarové i hardwarové vybavení. Rozdíly v cerebrálním zpracování různých stimulů se pohybují v doméně desítek milisekund, což běžné počítačové aplikace nemusí být schopny zachytit. Byla proto vyvinuta celá řada programů a hardwarových sestav, které lépe či hůře zajišťují potřebnou přesnost.

2. Současné možnosti

Z komerčně nabízených programů jsou mezi experimentátory známy především

- *E-Prime* (www.pstnet.com/eprime.cfm),
- *Inquisit* (www.millisecond.com) nebo
- *DirectRT* (www.empirisoft.com),

jejichž cena se pohybuje kolem 500 dolarů. Podrobnější popis, parametry a způsoby využití je možno nalézt v [8, 9]. Tyto nástroje zjednodušují přípravu experimentů z hlediska programování: např. *E-Prime* využívá populárního rozhraní *drag-and-drop*. Jak ovšem upozorňuje [10], tyto komerční nástroje neposkytují zdrojový kód pro nezávislé testování a jasné údaje o přesnosti. Pouze u programu *Inquisit* se nám podařilo nalézt publikované výsledky nezávislého testu, provedeného za pomoci dvou dalších počítačů a fotobuňky [11].

Pokud ovšem výše uvedené programy přesahují finanční možnosti výzkumníka, freewarový *Alvin* [12] a *Dmdx* [13] představují alternativy vyzkoušené v mnoha psychologických experimentech. Také mezi fonetiky oblíbený *Praat* [14] byl nedávno rozšířen o možnost měření reakčních dob. Účelem naší studie je porovnat vhodnost těchto tří dobře dostupných aplikací pro měření reakcí na zvukové podněty.

Alvin je flexibilní nástroj umožňující provádění řady různých percepčních testů (identifikace, diskriminace, řazení atp.). Kromě zvukových položek může prezentovat i položky vizuální, včetně videa. Velkou výhodou je možnost rychlého a přehledného zpracování nasbíraných výsledků. Jistým problémem je ale např. nemožnost naprogramovat bloky testovacích položek s různou randomizací: každý typ řazení položek musí být ve zvláštním testu.

Velký otazník ovšem visí nad výstupy měření reakčních dob. Autoři sami připouštějí, že „měřené reakční doby nemusí být dostatečně přesné pro některé účely“, ale že se jedná o „rozumně vypadající výsledky (reasonably looking results)“ [12, s. 54]. Měření je spuštěno v okamžiku příkazu pro přehrání položky. Čas, který uplyne od tohoto okamžiku k reálnému počátku zvukového podnětu, je pak započítán do reakční doby. Je samozřejmě možné nahrát všechny podněty do jednoho souboru a odečítat dobu jejich nástupu, ale protože platforma Windows je komplexním víceúkolovým systémem, průběh reálného času se v něm operačně do určité míry bortí, což může při měření opět znamenat nepřesnosti.

Program *Dmdx* je oproti tomu navržen primárně pro měření reakčních dob, není tedy jako *Alvin* univerzálním nástrojem pro různé typy experimentů. Tato specializace se projevuje už např. v tom, že příkazy nejsou odesílány do Windows, ale do Direct X. Tím je cesta k hardwarovým elementům „zjednodušena“ a čas potřebný ke spuštění zvukových souborů výrazně zkrácen. Problém víceúkolového prostředí není úplně odstraněn – program může být jádrem opět přerušen. Na rozdíl od programu *Alvin* se ale v *Dmdx* s touto možností počítá a existuje pro ni funkční řešení. Čas se měří dvěma způsoby: jednak autonomně přímo na centrální řídicí jednotce (CPU – central processing unit) a jednak rastrovým počítadlem, které využívá obnovovací cykly monitoru (cca 16 ms) a které je svázáno s děním na obrazovce. Pokud dojde k nesrovnalostem, ohrožené položky testu jsou označeny a je možno je při analýzách vyřadit. Forster a Forster jsou přesvěd-

čení, že při použití moderní výbavy jsou chyby vyloučeny [13, s. 118].

Holandský *Praat* byl představen před zhruba dvaceti lety. Specializovaný program pro analýzy řeči umožňující anotování signálu je přinejmenším mezi fonetiky velmi rozšířen. Analýzy v doméně časové i spektrální je možno ovládat pomocí skriptů a od verze 5.3 nabízí také platformu pro experimenty s měřením reakčních dob. Struktura experimentu není příliš flexibilní, ale obsahuje obvyklé složky: spouštění testových položek, definování pauzy mezi nimi, opakování, text na obrazovce, zpětnou vazbu pro respondenty, randomizaci apod. Stejně jako u předchozích aplikací jsou výsledky přehledně prezentovatelné v tabulkách. Přesnost měření reakčních dob však nebyla nezávisle testována a uživatelé si mají provést hodnocení sami, než začnou s experimentem.

Odhlédneme-li od rozdílů v jednotlivostech nabízených těmito třemi programy, stále zůstává otázka, zda jsou *Alvin*, *Dmdx* a *Praat* stejně spolehlivými nástroji pro měření reakčních dob. V našem experimentu jsme tedy prozkoumali variabilitu v nástupu zvukového podnětu (dále *nástupová prodleva*), tedy otázku konzistence ve spouštění zvukových souborů. Dále jsme porovnali automaticky měřené reakční doby s hodnotami získanými manuálně pomocí externího zařízení.

3. Metoda

Za účelem porovnání parametrů tří různých programů (*Alvin*, *Dmdx*, *Praat*) jsme vytvořili pseudotest, v němž jako položky posloužily sinusové tóny o trvání 500 ms uložené samostatně ve formátu wav. (Termínu pseudotest jsme použili ve smyslu arbitrárnosti akustického podnětu a absence s ním související hypotézy, dále pro zjednodušení již jen test.) Test čítal celkem patnáct položek, které se skládaly z výše uvedených tónů, mezi nimiž nebyly nastaveny žádné prodlevy; každá položka by tak měla ideálně sestávat z nepřerušené sekvence tří tónů o celkovém trvání 1500 ms. I když je vzhled a ovládání zkoumaných nástrojů poněkud odlišné, formát testu byl pro všechny programy v zásadě identický.

Jeden z autorů posloužil jako respondent ve třikrát zopakovaném experimentu (tj. ve stejném testu ve třech programech), v němž pouze reagoval na slyšené tóny stisknutím klávesy počítačové klávesnice. Všechny tři testy byly zachyceny jako celek mikrofonom na externí zařízení tak, aby bylo možno ze zvukové vlny určit, ve kterém okamžiku došlo ke stisknutí klávesy, tj. k reakci. Zvuková nahrávka byla anotována v popisném objektu TextGrid programu *Praat*, kde byly zachyceny veškeré události, tedy začátky a konce přehrávaných tónů a okamžiky stisknutí klávesnice (viz obr. 1). Z těchto údajů byly následně změřeny nástupové prodlevy a reakční doby.

Hardwarové vybavení experimentu bylo následující: Laptop Lenovo R61i s procesorem Intel Core 2 Duo (1,8 GHz) a pamětí RAM 2 GB, externí zvuková karta E-MU USB 0202; klávesnice KME; sluchátka Sennhei-

ser PX 100. Protože jsou nejnižší nekonzistence pro *Dmdx* údajně dosahovány pro Windows 2000, ME a XP [11, s. 122], pracovali jsme s operačním systémem Windows XP Professional s nainstalovaným rozhraním DirectX 9.0. Porovnání různých hardwarových a operačních alternativ je možno nalézt v [10].

4. Výsledky

Cílem experimentu bylo určení (a) velikostí zpoždění mezi iniciací položky a spuštěním souborů, které položku tvořily (tato *nástupová prodleva* by teoreticky správně měla být nulová) a (b) rozdílů mezi reakčními časy zapsanými každým z testovaných softwarů a hodnotami získanými nezávislým externím měřením. V tabulkách 1a, 1b a 1c jsou tyto hodnoty pro každý ze tří testovaných programů uvedeny. Ačkoli bylo provedeno vždy patnáct opakování pokusu (patnáct položek), první z pokusů musel být vždy vyřazen, neboť neposkytoval úplné informace o inicializaci položky v operačním systému.

Z tabulky 1a je zřejmé, že iniciační prodlevy při použití programu *Alvin* jsou skutečně vysoké (ve stovkách milisekund) a navíc vykazují i značnou variabilitu (směrodatná odchylka s pro NP1 byla 78 ms), takže není možno je korigovat vhodně nalezenou konstantou. Naproti tomu program *Dmdx* produkoval zpoždění řádově nižší (v desítkách milisekund) a přijatelnější byla i variabilita: směrodatná odchylka s pro NP1 jen 17 ms, pro NP2 a NP3 dokonce pod 5 ms (viz tabulka 1b). Šedě označené hod-

pokus č.	NP1 (ms)	NP2 (ms)	NP3 (ms)	Δ RD (ms)
1	449	484	468	212
2	486	531	531	227
3	484	469	469	241
4	485	481	469	249
5	340	501	517	247
6	482	469	500	233
7	281	482	488	234
8	469	481	468	316
9	451	502	500	202
10	263	469	468	239
11	469	486	403	246
12	449	488	481	309
13	423	500	499	230
14	500	500	469	238
průměr	431	489	481	244
s.o.	78,0	17,0	30,2	31,6
C_{var}	18	3	6	13

Tabulka 1a: Zpoždění při inicializaci položky a rozdíl mezi reakčními dobami (RD) měřenými programem *Alvin* a externím měřením. Všechny hodnoty v milisekundách kromě variačního koeficientu (C_{var}) v procentech

pokus č.	NP1 (ms)	NP2 (ms)	NP3 (ms)	Δ RD (ms)
1	90	20	0	38
2	70	20	10	39
3	70	20	0	50
4	70	20	0	35
5	69	20	0	34
6	70	20	9	34
7	70	20	0	43
8	70	20	0	32
9	97	20	10	35
10	105	20	0	39
11	101	20	10	33
12	108	20	0	35
13	107	21	0	39
14	100	21	0	32
průměr	86	20	3	37
s.o.	16,8	0,4	4,5	4,9
C_{var}	20	2	164	13

Tabulka 1b: Zpoždění při inicializaci položky a rozdíl mezi reakčními dobami (RD) měřenými programem *Dmdx* a externím měřením. Všechny hodnoty v milisekundách kromě variačního koeficientu (C_{var}) v procentech (zvýrazněné buňky ve sloupci NP1 – viz text)

noty navíc označují položky, v nichž byla volena zvláštní inicializace – respondent záměrně reagoval až po odeznění celého zvukového podnětu. To se ovšem v reálných experimentech stává jen zřídka a ve studiích, s nimiž jsme se seznámili, by se jednalo o nežádoucí výsledek. Pokud tyto položky vyřadíme, směr. odchylka výrazně poklesne (na pouhých 7 ms) a průměrná prodleva NP1 bude 73 ms. Zvláštní inicializace položek u zbylých programů není nijak značena, neboť neměla na naměřené výsledky jasný vliv (*Alvin*) či byla jedinou možnou inicializací (*Praat*).

Přibližně stejnou variabilitu zpoždění vykazuje i třetí z testovaných programů, *Praat*. U něj je směrodatná odchylka zpoždění u NP1 7,5 ms. Tento program ale automaticky zahajuje novou položku v okamžiku reakce, takže situace není přímo srovnatelná. Jestliže tedy respondent zareagoval, zbytek akustického podnětu už neuslyší, což může být například v případě řečových podnětů lehce frustrující. Dalším specifikem programu *Praat* je, že automaticky konkatenuje zvuky v rámci jedné testové položky. V tabulce 1c je tím pádem vidět, že prodlevy NP2 a NP3 jsou nulové.

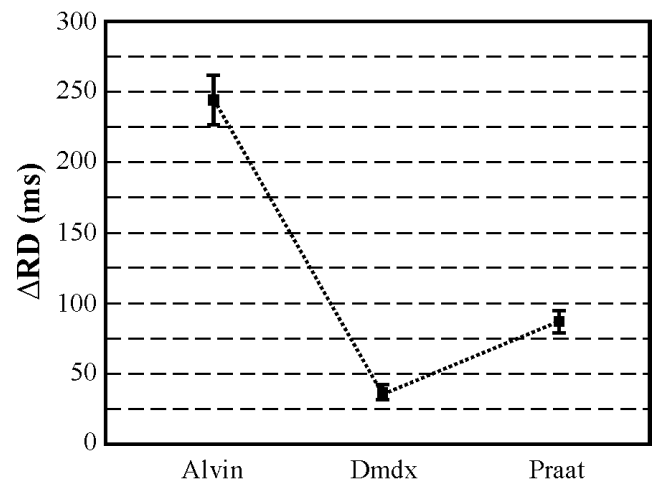
Poslední sloupec v každé z tabulek obsahuje hodnoty rozdílů v reakčních dobách měřených softwarem a měřených externě. Jejich průměr je pro názornost ještě zachycen na obr. 2. To, že jsou všechny hodnoty kladné, indikuje delší reakční doby v měřeních *Alvinu*, *Dmdx* a *Praatu* oproti dobám odečteným ručně. Určitým příspěvkem k tomuto výsledku je odezva klávesnice. Jestliže pro nás bylo

pokus č.	NP1 (ms)	NP2 (ms)	NP3 (ms)	Δ RD (ms)
1	90	0	0	91
2	89	0	0	73
3	75	0	0	85
4	106	0	0	97
5	84	0	0	88
6	85	0	0	77
7	89	0	0	88
8	85	0	0	83
9	97	0	0	95
10	83	0	0	91
11	94	0	0	93
12	91	0	0	90
13	92	0	0	99
14	93	0	0	73
průměr	89	0	0	87
s.o.	7,5			8,3
C_{var}	8			10

Tabulka 1c: Zpoždění při inicializaci položky a rozdíl mezi reakčními dobami (RD) měřenými programem *Praat* a externím měřením. Všechny hodnoty v milisekundách kromě variačního koeficientu (C_{var}) v procentech

momentem reakce stisknutí klávesy, zvuk způsobený tímto úkonem byl zachycen externím zařízením téměř okamžitě, zatímco počítač přece jen potřeboval určitý čas k registraci signálu z klávesnice. Literatura (např. [13]) uvádí, že odezva klávesnice může být až dvacet, někdy dokonce i více milisekund. K vlastnostem klávesnice ještě níže, viz oddíl 5 – Diskuze.

To příliš nemění nepříznivý výsledek u programu *Alvin*, kde je průměrný rozdíl mezi externě měřenou a softwarově



Obrázek 2: Průměrné rozdíly mezi automaticky a ručně měřenými reakčními dobami s 95% intervaly spolehlivosti pro tři softwarové aplikace: *Alvin*, *Dmdx* a *Praat*

uváděnou reakční dobou 244 ms při $s = 32$ ms. *Praat* vykazuje rozdíl menší, v průměru 87 ms při $s = 8$ ms, a nejlepší výsledek nalézáme u *Dmdx*, kde se zdá, že kromě odezvy klávesnice už samotný software a operační systém příliš mnoho „nadbytečných milisekund“ nepřidává. Analýza rozptylu s následnými Scheffeho testy párového srovnávání potvrdila významnost rozdílů mezi výsledky vyprodukovanými *Alvinem*, *Praatem* a *Dmdx*: $F(2, 39) = 449,11$; $p < 0,001$.

5. Diskuze

V simulaci experimentu s měřením reakčních dob se jako nejproblematictější ukázal program *Alvin*. Iniclace podnětu trvá stovky milisekund, což je v doméně cerebrálního zpracování zvukových stimulů nepřijatelné. Také variabilita zpoždění je výrazná a nedovoluje odečtení konstantní aproximované hodnoty pro zpřesnění výsledku. Na vině je s největší pravděpodobností usazení *Alvinu* v platformě Windows. Tato platforma nepracuje v reálném čase a povoluje těžko kontrolovatelné plnění několika úloh naráz, takže do práce určité aplikace vnáší nežádoucí interference. Na obranu *Alvinu* je však nutno zdůraznit, že je to program uživatelsky velmi dobře propracovaný a z testovaných programů nejvšestrannější, co se týče jiných behaviorálních testovacích paradigmat. Není-li tedy nutno měřit reakční doby, ale pouze např. hodnocení zvuků posluchačem nebo účinky různých parametrů maskování, jedná se o program velmi dobrý. I proto jsme ho využili paralelně s programem *Dmdx* při studii, v níž jsme sledovali reakce posluchačů na řečový signál segmentovaný na hlásky nebo slabiky vložením mikropauz [15]. Ovšem jak již bylo řečeno výše, kvůli náhodné variabilitě zpoždění nebylo možné pro *Alvin* nalézt korekční vzorec.

Kromě iniciace položek byl v našem experimentu důležitým parametrem také rozdíl mezi interně a externě měřenou reakční dobou. Tento rozdíl je možno považovat za chybu. Průměr u *Alvinu* byl 244 ms, u *Praatu* 87 ms, zatímco u *Dmdx* pouze 37 ms. Jelikož byl experiment proveden stejnou metodou u všech tří programů a veškeré další zařízení bylo identické, je nutno tyto rozdílné výsledky přičítat testovaným aplikacím. Zde je opět s vysokou pravděpodobností výhodou skutečnost, že *Dmdx* využívá DirectX, čímž se snižují interference víceúkolového prostředí.

Jedním ze zdrojů nepřesností, který žádný z programů nemohl obejít, je zařízení snímající mechanickou reakci posluchače. I když je použita stejná klávesnice nebo myš pro všechny experimenty, variabilitě zpoždění se nelze vyhnout [16]. Ve srovnání s myší nebo zařízením PIO12 je klávesnice obzvláště nespolehlivá, ovšem v praxi se může stát, že je jedinou možností. Určitým řešením je využití nejnovějších produktů, které by měly mít díky celkovému vývoji v hardwarových technologiích lepší časové charakteristiky. Například klávesnice DirectIN PCB v2010 (www.empirisoft.com) byla vyvinuta právě pro měření reakčních dob a je inzerována jako rychlé a spolehlivé řešení. Na naše podmínky je sice nákladnější (cca 5 000,- Kč),

ovšem nabízí odezvu kolem jedné milisekundy. Podobnou opatrnost je třeba věnovat zvukové kartě, jejíž odezva může být kolem 5 ms nebo až 100 ms. Ostatní zařízení jako CPU nebo RAM by v dnešní době již neměla představovat problém.

6. Závěr

V našem přehledu nejznámějších aplikací používaných při experimentech s měřením reakčních dob jsme srovnávali některé jejich vlastnosti a případná omezení. Jak u komerčních, tak u volně dostupných programů je z hlediska prověřovaných hypotéz vždy nejdůležitější otázkou reliability jimi poskytovaných údajů a v reakci na absenci nezávislých testů jsme pro tři volně dostupné programy provedli experimentální ověření jejich chování. Jednalo se o program *Alvin*, který je velmi všestranný a nabízí řadu testovacích paradigmat, *Dmdx* s omezenějším využitím, ale vyvinutý speciálně pro měření reakčních dob, a *Praat*, který je dnes nepostradatelným pomocníkem fonetiků při analýzách řečového signálu. (Další alternativy včetně programů MS DOS a toolboxů MatLabu je možno nalézt v [17]). Program *Dmdx* se ukázal jako nejpřesnější. Naším cílem ovšem není vynášet jakékoli další soudy. Výběr programu je ve výsledku věcí experimentátora, který zvažuje specifické požadavky každé řešené úlohy. Koneckonců ani dokonalý nástroj ještě nezaručuje validitu výsledku: pokud by nebyla struktura experimentu, reprezentativnost vzorku a kvalita a adekvátnost zvukových podnětů v pořádku, sebestřednější měření by i tak postrádala smysl.

Poděkování

Děkujeme Jamesi M. Hillenbrandovi a Jonathanu C. Forsterovi za užitečné informace, které nám poskytli v osobní korespondenci.

Reference

- [1] Melka, A.: *Základy experimentální akustiky*, Akademie múzických umění v Praze, Praha, 2005.
- [2] Pierrehumbert, J., Beckman, M., Ladd, R.: Conceptual Foundations of Phonology as a Laboratory Science. In: N. Burton-Roberts et al. (eds.), *Phonological Knowledge, Conceptual and Empirical Issues*. Oxford University Press, Oxford, p. 273–303, 2000.
- [3] Buxton, H.: Temporal predictability in the perception of English speech. In: A. Cutler, D. R. Ladd (eds.), *Prosody: Models and Measurements*. Springer-Verlag, Berlin, p. 111–121, 1983.
- [4] Schneider, K., Dogil, G., Möbius, B.: Reaction time and decision difficulty in the perception of intonation, *Proc. of INTERSPEECH 2011*, p. 1161–1164, Florence, 2011.

- [5] Niemann, J., Schulz, K., Wechsung, I.: Effects of shortening speech prompts of in-car voice user interfaces on users' mental models, *Proc. of INTERSPEECH 2011*, p. 1521–1524, Florence, 2011.
- [6] Johnson, K.: *Quantitative methods in linguistics*, Blackwell Publishing, Oxford, 2008.
- [7] Grosjean, F., Frauenfelder, U. H.: A Guide to Spoken Word Recognition Paradigms: Introduction, *Language and Cognitive Processes*, **11**(6), p. 553–558, 1996.
- [8] Stahl, C.: Software for Generating Psychological Experiments, *Experimental Psychology*, **53**(3), p. 218–232, 2006.
- [9] MacWhinney, B., St. James, J., Schunn, C., Li, P., Schneider, W.: STEP – A System for Teaching Experimental Psychology Using E-Prime, *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, **33**(2), p. 287–296, 2001.
- [10] MacInnes, W., Taylor, T.: Millisecond timing on PCs and Macs, *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, **33**(2), p. 174–178, 2001.
- [11] De Clercq, A., Crombez, G., Buysse, A., Roeyers, H.: A simple and sensitive method to measure timing accuracy, *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, **35**(1), p. 109–115, 2003.
- [12] Hillenbrand, J. M., Gayvert, R. T.: Open Source Software for Experiment Design and Control, *J. of Speech, Language, and Hearing Research*, **48**, p. 45–60, 2005.
- [13] Forster, K. I., Forster, J. C.: DMDX: A Windows display program with millisecond accuracy, *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, **35**(1), p. 116–124, 2003.
- [14] Boersma, P., Weenink, D.: *Praat: doing phonetics by computer* (version 5.3.03). Staženo 21. listopadu 2011, <http://www.praat.org>.
- [15] Šturm, P., Volín, J.: Syllables versus phones in a word-monitoring experiment, *Studies in Applied Linguistics*, **3**(1), v tisku, 2012.
- [16] Plant, R. R., Hammond, N., Whitehouse, T.: How choice of mouse may affect response timing in psychological studies, *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, **35**(2), p. 276–284, 2003.
- [17] Strasburger, H.: Software for visual psychophysics: An overview. Staženo 10. srpna 2012, http://www.hans.strasburger.de/psy_soft.html.

Studium zvukové pohltivosti pórovitých materiálů

Martin Vašina^a a Lubomír Lapčík^b

^aÚFMI FT UTB ve Zlíně, T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín

^bÚTMP FT UTB ve Zlíně, T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín

e-mail: vasina@ft.utb.cz, lapcik@ft.utb.cz

Noise is a negative factor of our environment. There are different possibilities of noise reduction. Application of suitable sound absorption materials belongs among these possibilities. Materials with porous, spongy and fibrous structure are ranked among suitable materials in terms of sound absorption. The aim of the paper is to investigate sound absorption properties of porous materials. Polyurethane foams and recycled porous materials were investigated in this case. This work involves the measured frequency dependencies of the sound absorption coefficient. There are many factors that have influence on sound damping of the investigated porous materials. These factors are subsequently evaluated.

1. Úvod

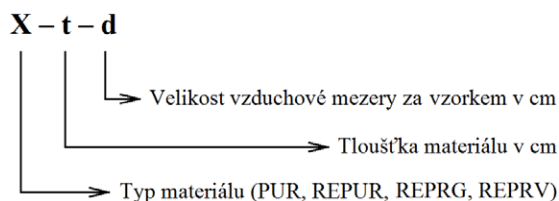
Hluk patří k nežádoucím jevům našeho životního prostředí. Působí negativně na zdraví člověka, bezpečnost, produktivitu práce apod. Proto je třeba snižovat hladiny hluku na přijatelnou úroveň. Snižovat hluk lze redukcí hluku v samotném zdroji hluku, vhodným umístěním hlučných strojů a zařízení, využitím zvukoizolačních krytů, aplikací materiálů pohlcujících akustickou energii nebo používáním osobních ochranných pomůcek. Nejlepších výsledků lze dosáhnout vhodnou kombinací výše uvedených metod snižování hluku [1].

Tato práce je zaměřena na snižování hluku při aplikaci zvukové pohltivosti pórovitých materiálů. Jsou vyhodnoceny různé faktory, které ovlivňují velikost činitele zvukové pohltivosti pórovitých materiálů.

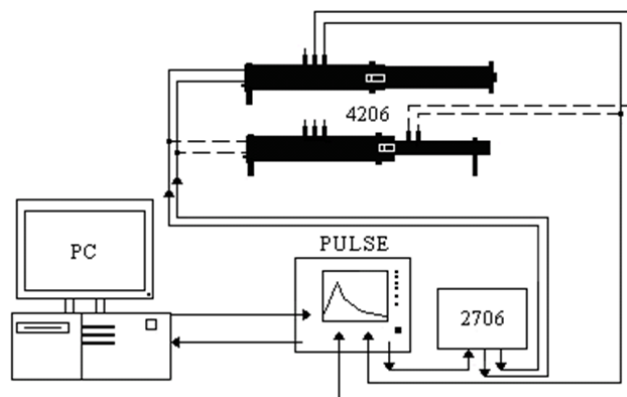
2. Zkoumané materiály

Materiály s pórovitou, houbovitou nebo vláknitou strukturou patří obecně k materiálům vhodným k pohlcování zvuku. U těchto materiálů dochází k významné transformaci akustické energie na teplo.

V této práci jsou zkoumány zvukové absorpční vlastnosti pórovitých polyuretanových pěn a recyklované pryže. Základní informace o těchto materiálech jsou uvedeny v tabulce 1. U daného typu materiálu se zkoumal vliv jeho tloušťky t a velikosti vzduchové mezery d mezi materiálem a pevnou stěnou na jeho zvukové absorpční vlastnosti. Princip označení materiálů se zahrnutím těchto skutečností je uveden na obrázku 1.



Obrázek 1: Princip značení zkoumaných materiálů



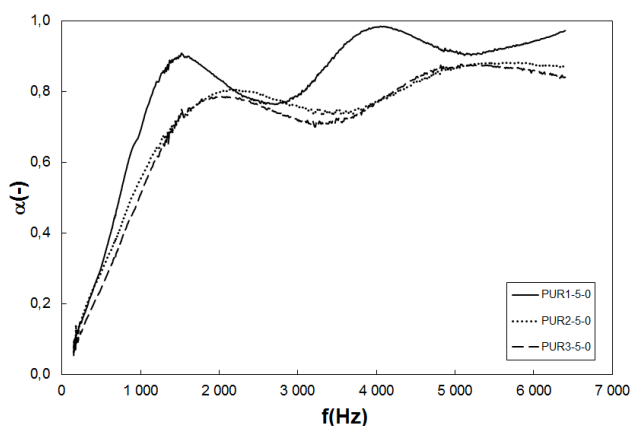
Obrázek 2: Schematické zapojení měřicího zařízení

3. Metoda měření

Za účelem posouzení zvukové absorpčních vlastností zkoumaných materiálů bylo potřeba experimentálně změřit frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti [2], který je definován poměrem pohlcené akustické energie v materiálu k dopadající akustické energii na daný materiál. Měření činitele zvukové pohltivosti bylo provedeno metodou přenosové funkce [3] podle ČSN ISO 10534-2. Na obrázku 2 je znázorněno schéma zapojení měřicí aparatury pro měření činitele zvukové pohltivosti. Tato aparatura sestává z Kundtovy impedanční trubice Brüel & Kjær typu 4206, tříkanalového PULSE multianalizátoru Brüel & Kjær typu 3560-B-030, zesilovače Brüel & Kjær typu 2706 a počítače PC pro ukládání naměřených dat. Kundtova impedanční trubice se přitom skládá ze dvou částí. Trubice s velkým průměrem ($d = 10$ cm) je vhodná pro měření při nízkých frekvencích a trubice malého průměru ($d = 3$ cm) je naopak vhodná pro měření při vyšších frekvencích. Měření činitele zvukové pohltivosti proběhlo ve frekvenčním rozsahu $f = \langle 150, 6400 \rangle$ Hz s frekvenčním krokem $\Delta f = 2$ Hz při okolní teplotě $t \cong 22$ °C.

Označení materiálu	Typ materiálu	Popis materiálu	Hustota (kg·m ⁻³)
PUR1	Polyuretanová pěna	Malé póry	22,7
PUR2	Polyuretanová pěna	Středně velké póry	27,8
PUR3	Polyuretanová pěna	Velké póry	28,9
REPUR	Recyklovaná polyuretanová pěna	Různé velikosti částic pěny	74,1
REPRG	Recyklovaná pryž	Granulovaná pryž	694,8
REPRV	Recyklovaná pryž	Vláknitá pryž	658,0

Tabulka 1: Parametry a popis zkoumaných materiálů

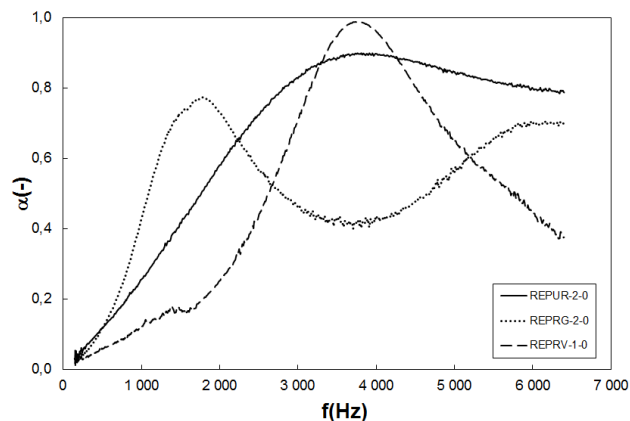


Obrázek 3: Frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti polyuretanových pěn

4. Výsledky a diskuze

4.1. Porovnání zvukové absorpčních vlastností materiálů

Na obrázku 3 jsou znázorněny frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti polyuretanových pěn o tloušťce $t = 5$ cm. Z tohoto srovnání je zřejmé, že nejvyšší zvuková



Obrázek 4: Frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti recyklovaných materiálů

ková pohltivost je dosažena u polyuretanové pěny s malými póry. V tomto případě dochází k významné transformaci akustické energie v teplo v důsledku tření při pohybu vzduchu poblíž pevné stěny. Proto jsou k pohlcování zvuku vhodné pórovité materiály s jemnými póry, jejichž plocha, na které dochází ke tření, je velká vzhledem k objemu materiálu [1].

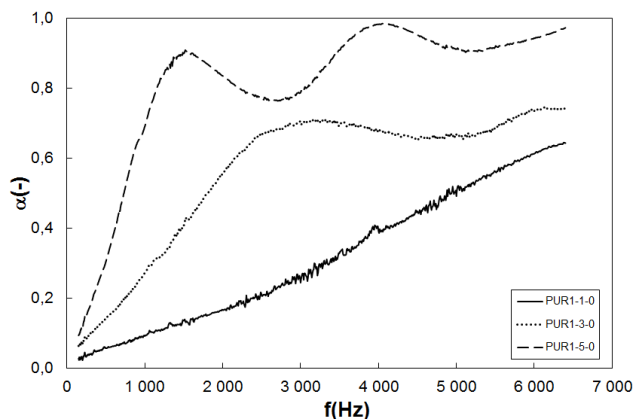
Na obrázku 4 jsou uvedeny frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti recyklovaných materiálů. Vyšší zvuková pohltivost u těchto materiálů je dosaženo při vyšších frekvencích, zejména u recyklované polyuretanové pěny.

4.2. Vliv tloušťky materiálu na zvukovou pohltivost

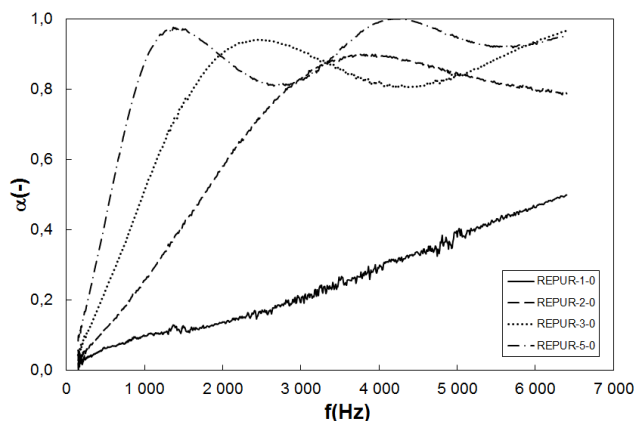
Tloušťka pórovitého materiálu je velmi důležitá z hlediska tlumení zvuku. Na obrázku 5 jsou zobrazeny frekvenční průběhy činitele zvukové pohltivosti u polyuretanové pěny s jemnými póry pro tři různé tloušťky. Podobně na obrázku 6 je znázorněn vliv tloušťky recyklované polyuretanové pěny na pohlcování zvuku. Z těchto průběhů je zřejmé, že rostoucí tloušťka materiálu má příznivý vliv na tlumení zvuku, zejména v oblasti nízkých frekvencí. S rostoucí frekvencí všeobecně vzrůstá hodnota činitele zvukové pohltivosti až do určité hodnoty, na které zhruba setrvává při dále se zvyšujícím kmitočtu. Materiál je přitom akusticky dobře účinný od určité frekvence f_m , za kterou činitel α vzrůstá nad 60 % své maximální hodnoty získané při vysokých frekvencích [4]. Frekvenci f_m lze v daném prostředí (tzn. při konkrétní rychlosti šíření zvuku c) pro příslušnou tloušťku pórovitého materiálu t stanovit pomocí přibližného vztahu:

$$f_m \cong \frac{c}{10 \cdot t} \quad (1)$$

Z výše uvedené rovnice je zřejmé, že s rostoucí tloušťkou pórovitého materiálu klesá hodnota frekvence, od které začíná materiál dobře pohlcovat zvuk. Frekvence f_m stanovená z rovnice (1) koresponduje s naměřenými frekvenčními závislostmi (viz obrázky 5 a 6) při předpokládané rychlosti šíření zvuku ve vzduchu (tj. $c \cong 344 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Především při větších tloušťkách pórovitého materiálu. Podobně lze pomocí rovnice (1) stanovit nejmenší tloušťku materiálu, od které bude pórovitý materiál vykazovat



Obrázek 5: Vliv tloušťky na zvukovou pohltivost u polyuretanové pěny s jemnými póry

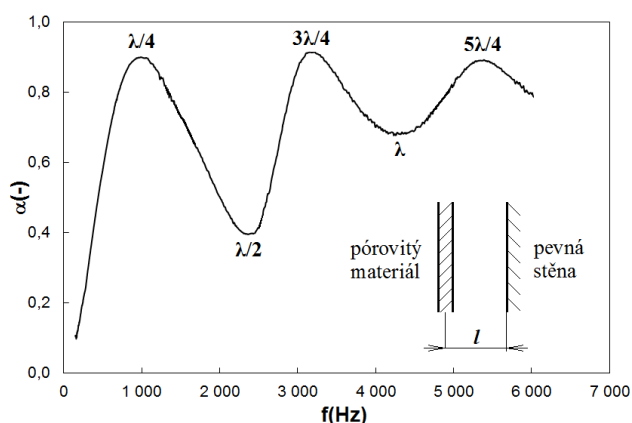


Obrázek 6: Vliv tloušťky na zvukovou pohltivost u recyklované polyuretanové pěny

dobrou zvukovou pohltivost při znalosti minimální frekvence, při které bude materiál aplikován v praxi. S rostoucí tloušťkou materiálu se ale zvyšují investiční náklady. Z tohoto důvodu se provádí různá konstrukční opatření, která zmírňují tuto nevýhodu. Jednou z možností je umístit pórovitý materiál o malé tloušťce v určité vzdálenosti od pevné stěny. Jedná se tedy o konstrukci se vzduchovou mezerou mezi pórovitým materiálem a pevnou stěnou.

4.3. Vliv vzduchové mezery na zvukovou pohltivost

Jak již bylo uvedeno, umístění pórovitého materiálu přímo na pevné stěně není příliš výhodné z hlediska tlumení zvuku. Transformace akustické energie na teplo souvisí s akustickou rychlostí [5]. Na akusticky pevné stěně, kde při odrazu zvuku vzniká uzel akustické rychlosti, je nulová akustická rychlost. S rostoucí vzdáleností od stěny akustická rychlost postupně vzrůstá a svého maxima dosáhne ve vzdálenosti l , která je vzdálena o čtvrtinu vlnové délky λ od pevné stěny (tj. $l = \lambda/4$). Proto je vhodnější umístit tenký pórovitý materiál do této vzdálenosti před



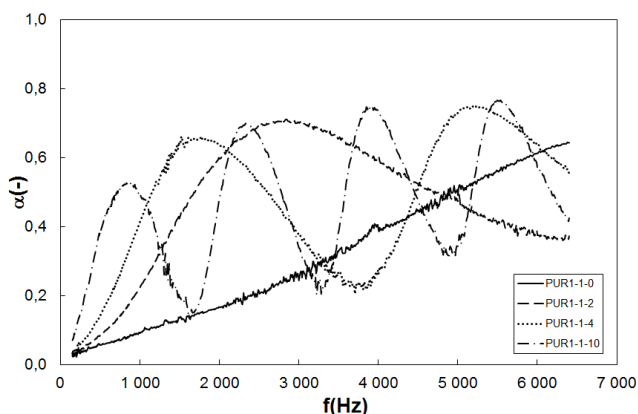
Obrázek 7: Princip pohlcování zvuku při umístění tenkého pórovitého materiálu ve vzdálenosti l před pevnou stěnou

pevnou stěnu (viz obrázek 7). Potom činitel zvukové pohltivosti dosahuje maximálních hodnot na frekvencích pro liché násobky čtvrtiny vlnové délky, rovnající se vzdálenosti materiálu od pevné stěny. V těchto případech je materiál umístěn přímo v kmitně akustické rychlosti. Podobně minimálních hodnot činitele je dosaženo na frekvencích pro sudé násobky čtvrtiny vlnové délky. Frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti má z tohoto důvodu kmitavý průběh.

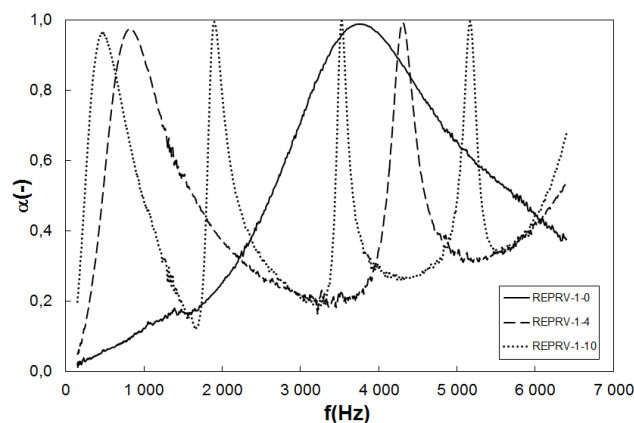
Na obrázcích 8 a 9 je znázorněn vliv velikosti vzduchové mezery na zvukovou pohltivost polyuretanové pěny a recyklované pryže s vláknitou strukturou. Délka vzduchové mezery mezi pevnou stěnou a povrchem pórovitého materiálu se přitom nastavovala od 0 cm do 10 cm s délkovým krokem 2 cm. Je zřejmé, že s rostoucí velikostí vzduchové mezery se zvyšuje zvuková pohltivost především v oblasti nízkých frekvencí. Frekvenční průběhy činitele zvukové pohltivosti jsou přitom harmonické periodické s maximy na frekvencích pro liché násobky čtvrtiny vlnové délky. První maximum odpovídá skutečné vzdálenosti vzorku l od pevné stěny, která je rovna čtvrtině vlnové délky λ při daných fyzikálních podmínkách z hlediska šíření zvuku. Vzdálenost l je v tomto případě dána součtem poloviny jeho tloušťky t materiálu a velikosti vzduchové mezery mezi pevnou stěnou a povrchem pórovitého materiálu. Při větších velikostech vzduchové mezery se vyskytuje více maxim činitele zvukové pohltivosti ve frekvenčním rozsahu. Naopak u menších vzduchových mezer je méně maxim činitele zvukové pohltivosti a jeho změna je pozvolnější v závislosti na frekvenci.

5. Závěr

V rámci této práce byly zkoumány zvukově absorpční vlastnosti pórovitých materiálů. Bylo ověřeno, že pórovité materiály patří k vhodným materiálům z hlediska tlumení zvuku. Experimentálně bylo ověřeno, že lepší zvukově absorpční vlastnosti pórovitých materiálů jsou dosaženy zejména při vyšších budicích frekvencích, větších



Obrázek 8: Vliv velikosti vzduchové mezery na zvukovou pohltivost polyuretanové pěny



Obrázek 9: Vliv velikosti vzduchové mezery na zvukovou pohltivost recyklované pryže s vláknitou strukturou

tloušťkách materiálů a větších tloušťkách vzduchové mezery mezi zkoumaným materiálem a pevnou stěnou. Vysoká zvuková pohltivost byla dosažena rovněž u recyklovaných pórovitých materiálů, zejména u recyklované polyuretanové pěny. Aplikace recyklovaných materiálů pro tlumení zvuku je jednou z možností jejich následného využití a přispívá k ochraně životního prostředí.

Reference

- [1] Nový, R.: *Hluk a chvění*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2000.
- [2] Beranek, L. L.: *Noise and Vibration Control*, Poughkeepsie, New York, 1988.
- [3] ČSN ISO 10534-2 Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích – Část 2: Metoda přenosové funkce. Český normalizační institut, 2000.
- [4] Němec, J., Ransdorf, J., Šnédrle, M.: *Hluk a jeho snižování v technické praxi*, SNTL, Praha, 1970.
- [5] Kolmer, F., Kyncl, J.: *Prostorová akustika*, SNTL, Praha, 1982.

