

TECHNOLOGICKÝ LIST č. 78

~~poloprovozu ověřené technologie~~
~~prototypu uplatněné metodiky funkčního vzorku autorizovaného~~
~~software*~~

Název: Metodika hodnocení okamžitého efektu rezonančních cvičení hlasu

Title: The measurement method of the immediate effect of the resonance exercises of the voice

Původce (-i): Marek Frič

Vlastník: Akademie múzických umění v Praze, Hudební fakulta, Výzkumné centrum MARC

Lokalizace: 118 00 Praha 1, Malostranské nám. 13

Abstrakt: Metodika standardizuje postup hodnocení efektu různých rezonančních cvičení na vibroakustické vlastnosti hlasu a kmitání hrtanu (např. při uměleckém používání hlasu nebo při jeho rehabilitaci). Výsledkem měření je stanovení nejefektivnější výšky hlasu pro konkrétní účel rezonančních cvičení. V případě cvičení rezonančních trubiček je to sledování efektivity pomocí koeficientu zesílení kmitání hrtanu vzhledem na změnu vnitro-ústního tlaku. Metodika popisuje způsob snímání zvukového a elektroglotografického signálu, měření vibrací hrtanu pomocí akcelerometru a měření vnitro-ústního tlaku. Dále metodika popisuje obecný postup pro zpracování jednotlivých signálů a jej globální zhodnocení efektu cvičení. V metodice je popsán způsob analýzy pomocí software RealVoiceLab.

Abstract: The methodology establishes a procedure for evaluations of effects of different resonance exercises on vibroacoustic voice properties and larynx vibration. The result of measurement is to determine the most effective pitch for a particular purpose of the resonant exercise. In the case of resonance tube's exercise the efficiency is monitored by the gain factor of the larynx oscillation due to the change of intra-oral pressure. The methodology describes a method for sound and elektroglottographic signal recording, larynx vibration measurement using an accelerometer and measuring the intra-oral pressure. Furthermore, the methodology describes the general procedure for processing individual signals and a global assessment of the effect of exercise. The methodology also describes a method of analysis using software RealVoiceLab.

Popis: Viz Příloha k TL č. 78

Inovační aspekty: Rezonanční cvičení a použití rezonančních trubiček patří mezi základní metody hlasové terapie. Jejich efekt a tedy ani upřesnění provádění není doposud v literatuře standardizován. Tato cvičení využívají vliv obměněného vokálního traktu na kmitání hlasivek s cílem zesílení účinku a posílení samotných kmitů. Předkládaná metodika popisuje způsob záznamu a analýzy vibro-akustických signálů s cílem objektivního vyhodnocení efektu rezonančních cvičení. Detailní metodika umožňující následné porovnávání získaných výsledků nezávislé na původu záznamů nebyla dosud zpracována. Metodika postup definuje a zároveň doporučuje způsob prvotního vyhodnocení dat, který umožňuje vyhodnotit efektivitu jednotlivých cvičení a tedy následnou koncentraci na nevhodnější cviky.

Přínosy: Souběžný synchronní záznam zvukového, elektroglografického signálu se záznamem kmitání povrchu hrtanu a tlaku vnitro-ústního tlaku umožňuje stanovení nejefektivnější výškové polohy konkrétního rezonančního cvičení. Dle toho umožňuje stanovení nevhodnějšího cvičení k danému subjektu a za konkrétním účelem. Analytický algoritmus výpočtu potřebných parametrů byl implementován do software RealVoiceLab, který je používán v klinické praxi pro měření hlasového pole.

Licence: Není licenčně vázáno

Licenční poplatek: není

Obor: Umění, architektura, kulturní dědictví – AL, Akustika a kmity – BI,

Projekt: MŠMT Institucionální podpora dlouhodobého koncepčního rozvoje AMU Praha, IP DKR projekt *Zvuková kvalita*

Identifikační číslo RIV:

Údaje pro RIV:

Umístění: <http://zvuk.hamu.cz/vyzkum/publikacni.php>

Bližší upřesnění výsledku: N - certifikovaná metodika (kód A),

Interní kód produktu: Okamžitý efekt rezonančních cvičení

Číselná identifikace: TL.78

Technické parametry výsledku: Technické parametry a popis zařízení viz.

TECHNOLOGIC-KÝ LIST č. 78 (vydán r. 2015 Výzkumným centrem MARC, HAMU v Praze)

Ekonomické parametry výsledku: Metodika měření definuje postup objektivního měření vlivu rezonančních cvičení na vlastnosti hlasu a kmitání hrtanu a povrchu hlavy a umožňuje vzájemné porovnávání výsledků získaných odlišnými experimentátory a vybavením.

Označení certifikačního orgánu: CSQ-CERT, Novotného lávka 5, Praha 1

Certifikace: M032/M/2015

Datum certifikace výsledku: 18. 12. 2015

Způsob využití výsledku: C- výsledek je využíván bez omezení okruhu uživatelů

Kategorie výsledků podle nákladů:

Příloha technického listu číslo 78

Obsah

Úvod do problematiky	3
Cíle metodiky.....	5
Postup měření.....	6
Měřené hlasové úkoly	6
Měřené signály.....	7
Zásady záznamu jednotlivých signálů	7
Konkrétní příklad měření a měřicí aparatury na našem pracovišti	9
Kvantifikace vibračních vlastností.....	11
Konkrétní postup zpracování dat v experimentech na našem pracovišti.....	12
Vyhodnocení okamžitého efektu rezonančních cvičení	13
I. Stanovení nejefektivnějšího rezonančního cvičení.....	14
II. Stanovení efektivity konkrétního rezonančního cvičení	15
Stanovení efektivity cvičení za jinými účely	17
Literatura.....	18

Úvod do problematiky

Rezonanční hlasová cvičení patří mezi základní přímé (direktní) metody terapie hlasu (Carding et al., 1999).

Polo-uzávěr nebo výrazné zúžení vokálního traktu společně s prodloužením vokálního traktu trubičkou jsou často používanými metodami v hlasové pedagogice a terapii, společně se nazývají SOVT terapeutické metody hlasové terapie (semi-occluded vocal tract), tedy polo-uzavřený vokální trakt. Společně s rezonančními trubičkami do této skupiny SOVT cvičení patří i metody LaxVox, použití brček (straw), retní a jazykové trylky (lip-trill, tongue-trill), znělá bilabiální frikativa a exploziva [v:, b:], zakrytí úst pomocí ruky (hand-over-mouth), brumendo (humming) a jejich případná kombinace (Andrade et al., 2014; Dargin a Searl, 2015; Bele, 2005).

Princip využití těchto cvičení je ve zvýšení interakci **zdroje** - kmitání hlasivek a **filtru** - vokálního traktu pomocí rezonančního efektu a tím zpětnovazebné ovlivnění kmitání hlasivek. Samotný efekt interakce vokálního traktu a kmitání hlasivek byl teoreticky popsán ve vícero zdrojích (Bele, 2005; Titze, 2001; Titze a Verdolini-Abbott, 2012), opírá se o usnadnění vlastních vibrací zdroje pomocí posílení rezonančními vlastnosti vokálního traktu.

Za běžných podmínek jsou rezonanční frekvence vokálního traktu, typicky vyjádřené pozicí formantových frekvencí ($F1-F4$), příliš vzdálené od základní frekvence $F0$ kmitání hlasivek. Prodloužení vokálního traktu (trubičkou, našpulením rtů) a zúžení (nebo okluzie u brumend) způsobí nárůst akustické impedance vokálního traktu. Následkem je výrazné snížení pozice prvního formantu, která se dostane do frekvenčních pozic hlubokých harmonických složek, se kterými pak interaguje (Titze, 2004a).

Nastavení pozice základní frekvence nebo některé z prvních harmonických složek těsně pod frekvenci prvního formantu má za následek, že akustický tlak ve vokálním traktu pomáhá k pohybu hlasivek a proudění přes glottis. Ve zpětné vazbě se na kmitání hlasivek nejvýznamněji projevuje složka inertní reaktance (inercie) systému. Fázové poměry akustického tlaku a proudění vzduchu přes hlasivky jsou pak ve stavu, kdy jsou nejvíce posíleny vibrace hlasivek. Nárůst proudění vzduchu přes hlasivkovou štěrbinu nastává právě, když je tlak ve vokálním traktu nejvyšší. Společně s pozitivním subglotickým tlakem (pod hlasivkami) vyústí k zvýšení tlaku mezi hlasivkami (intraglottal pressure), který tlačí hlasivky od sebe. Opačně, snižování průtoku je spojeno s minimální hodnotou tlaku vokálního traktu, které v konečném důsledku napomáhá k uzavírání hlasivek (Titze a Verdolini-Abbott, 2012).

Zvýšení inercie systému má za následek také výrazné snížení prahu fonačního tlaku (*PTP*, phonation treshold pressure), tím nastává ulehčení rozkmitávání hlasivek při nižším tlaku. Tento efekt může být ještě posílený pomocí zúžení vchodu do hrtanu (epilaryngeal tube), čímž se ještě zvýší impedance vokálního traktu. Náhlá změna ze zúženého epilaryngu do širokého faryngu má za následek posílení rezonance epilaryngální dutiny, která má za následek také shlukování formantů *F3-F5*, tedy vytváří fenomén pěveckého formantu s typickou zvonivou (ring) barvou zvuku (Titze a Talkin, 1979; Titze a Story, 1997; Titze, 2001).

Použití rezonančních cvičení a trubiček se významně projeví i v tlakových poměrech, kromě snížení *PTP* (Radolf et al., 2014), lze předpokládat i zvýšení orálního tlaku (uvnitř úst). Na základě modelů (Titze a Laukkanen, 2007) se prokázalo až tří-násobné zvýšení tlaku v ústech těsně za rty. Zvyšování orálního tlaku má za následek zvýraznění pocitu vibrací v oblastí tváře, ale také umožňuje provádět (trénovat) fonaci při vysokých subglotických tlacích bez výraznějšího efektu na kolize (poškození) hlasivek.

Uvedené akustické rezonanční efekty se projeví i změnou tvaru hlasivkového pulsu (glottal flow), tzv. "zešikmením doprava" (Titze, 2004b). Maximální proud vzduchu přes hlasivky je mírně snížený ve fázi otevírání hlasivek, ale déle udržovaný a následně velmi rychle utlumený v průběhu zavírání. Jinými slovy se dosahuje výraznější zrychlení maximálního poklesu průtoku vzduchu (tedy se zvýší hodnoty *MFDR* - Maximum flow declination ratio), což má za následek zvýraznění energie všech harmonických složek (Nordenberg a Sundberg, 2004).

Uvedené jevy byly sledovány i pomocí elektroglografie, kdy se předpokládal vliv na kontaktní koeficient hlasivek. Experimentální studie ale neprokázaly jednoznačný trendový vliv. Dle (Gaskill a Erickson, 2010) se efekt projevil u každého subjektu, ale obecný trend v zvýšení nebo snížení nebylo možné statisticky prokázat, u zpěváků se však prokázal efekt zvýšení *CQ EGG* ale i průtoku, *SPL* obecně po SOVT cvičeních (Dargin a Searl, 2015). (Andrade et al., 2014) na základě měření *CQ EGG* a rozdílu *F1-F0* rozdělili SOVT cvičení na dvě skupiny. Jedná skupina snižuje *CQ* a *F1-F0* diferenci - označují ji jako skupina cvičení jednoho zdroje se stabilní *CQ* - patří tam zakrytí úst pomocí ruky, brumenda a trubičky, resp. straw. Druhá skupina se projevovала vlivem dvou různých zdrojů oscilací s efektem fluktuací tedy zvětšením rozptylu naměřených hodnot *CQ* a větším rozdílem *F1-F0*, patřily tam jazykové a retní trylky a LaxVox terapie (fonace přes trubičku do vody).

Výše uvedené efekty SOVT cvičení lze sumarizovat efekty na různých úrovních produkce hlasu:

- zvyšují vstupní impedanci systému a snižují polohu prvního formantu - posouvají rezonanční efekt do oblastí blízkých polohám normálního mluvního hlasu;
- snižují prahový tlak vibrací hlasivek (*PTP*, phonation threshold pressure) -ulehčují fonaci;
- mění tvar hlasivkových pulsů, zvyšují *MFDR* (Maximum flow declination ratio) - čímž zvyšují celkovou SPL a hladiny jednotlivých harmonických složek zdroje;
- zvýrazňují pocit vibrací v oblastech tváře - čímž umožňují lepší taktilní percepční kontrolu;
- zvyšují orální tlak - čímž umožňují tvorbu hlasu při vyšším fonačním tlaku bez ohrožení poškození tkaniva hlasivek;
- zvýrazňují odpor proudění vzduchu - čímž umožňují lepší kontrolu vydechaného dechu.

Cíle metodiky

Citované studie neposkytují vhodné informace o konkrétní výšce hlasu, pro kterou jsou konkrétní trubičky a ani rezonanční cvičení určeny. Obecně se odvolávají na komfortní výšku a intenzitu hlas, ale z terapeutického a didaktického hlediska je vhodné objasnit vzájemnou závislost pozice největšího efektu rezonančního cvičení případně rezonanční trubičky na konkrétní výšce hlasu.

Metodika je založená na experimentech, které byly publikovány v předchozích pilotních studiích (Frič, 2015a; Frič, 2015b). Tyto studie ukázaly významný efekt délky rezonanční trubičky, resp. typu rezonančního cvičení zejména na maximální zesílení kmitání hrtanu ale i různých částí tváře. Potvrdily možnost měření vibrací tváře pomocí akcelerometrů, vibrometrů a vysokorychlostních optických metod.

Cílem předkládané metodiky je standardizovat a optimalizovat způsob měření efektu použití rezonančních cvičení a rezonančních trubiček na vibro-akustické vlastnosti hlasivek a hlasu. Uvedené pilotní studie ukázaly vysokou závislost měřených parametrů na fyzických vlastnostech subjektu (jako např. tloušťka podkožního tuku), proto se metodika věnuje relativnímu zhodnocení okamžitého efektu. Na základě takto provedeného měření je pak možné určit, které cvičené nebo trubička mají největší efekt, určit které vibro-akustické parametry jsou nejvíce ovlivněny (např. kmitání hrtanu, nazalizace, nebo vibrace části tváře) a jak souvisí s výškou hlasu. Metodika má tím pádem přesah do klinické oblasti řešení poruch komunikace, zejména poruch hlasu.

Hodnocení okamžitého efektu rezonančních cvičení je možný z vícero hledisek. Každé z níže uvedených postupů je možné využít samostatně pro sledování specifických vlastností, ale pro celkové zhodnocení efektu rezonančních cvičení je potřebné kombinované sledování, které v se doporučených postupech dotýkají měření akustického signálu, elektroglografického (EGG) signálu, záznamu vibračních vlastností jednotlivých částí (povrchu hrtanu, nosu a čela) a měření vnitro-ústního tlaku (je možné jenom u cvičení s výraznou obstrukcí konce vokálního traktu). Pro sledování jednotlivých parametrů je zásadní synchronní záznam jednotlivých signálů.

Uvedená metodika sleduje dva účely jejího požití:

- 1) Primárním cílem této metodiky je stanovení **nejefektivnější výškové polohy** hlasu při konkrétním SOVTE cvičení, resp. rezonanční trubičky.
- 2) Stanovení **efektivity hlasového cvičení** na kmitání hrtanu.

Postup měření

Měřené hlasové úkoly

Pro všechny výše uvedené cíle je vhodné měřit všechny dále uvedené hlasové úkoly, avšak některá cvičení mají vlastní specifikace využití, které jsou popsány přímo při úkolech.

Vzhledem k relativitě naměřených výchylek vibrací jednotlivých částí těla kvůli externím faktorům jakými jsou tloušťka podkožního tuku, síla utažení upevňujících pásku a pro možnost dalšího porovnání mezi doporučujeme, aby měření okamžitého efektu rezonančních trubiček byla vztahována k měřením základních hlasových úkolů:

- A. Jako primární hlasový úkol doporučujeme **habituální čtení** standardního textu (**volným tempem normální hlasitost a výška hlasu**). Tento úkol dokladuje normálové hodnoty kontaktního koeficientu a amplitudy EGG signálu, SPL a výšku hlasu zvukového záznamu a normálové hodnoty vibrací měřených částí těla pomocí akcelerometrů a vibrometrů. **Průměrné hodnoty amplitudových charakteristik Habituálního hlasu slouží jako reference k amplitudovým charakteristikám ostatních úkolů.** Proto pro zjištění relativních amplitudových vztahů se při vyhodnocení dat vydělí všechny změřené amplitudy průměrnou hodnotou zjištěnou při habituálním čtení.
- B. Úkol charakterizující spodní okraj dynamiky používaného hlasu je **počítání** (nejlépe od 11 do 20, kde je obsaženo relativně mnoho dlouhých "á") **volným tempem a uvolněným hlasem**. Tento úkol prezentuje nejmenší používanou aktivaci hlasivek.
- C. Za účelem zjištění dynamických schopností hlasu je **postupná gradace volání**, při použití slova s dlouhým "á", při měření hlasového pole se používá slovo "máma", ale toto slovo obsahuje nazály, a tedy příliš stimuluje kmitání nosu, proto pro českou populaci doporučujeme slovo "**táta**" pro zjišťování dynamického rozsahu vibrací pro řečové úkoly. Tento úkol dokumentuje největší fyziologickou aktivaci hrtanu v modálním rejstříku, je vhodný pro porovnání vzhledem k ostatním rezonančním úkolům.

Specifické úkoly pro zjišťování efektu rezonančních cvičení dle výše uvedených účelů:

- I. Pro zjištění **nejefektivnější výškové polohy** hlasu při konkrétním SOVTE cvičení, resp. rezonanční trubičky se doporučuje měření úkolu **glissando - postupná, plynulá a klouzavá změna výšky hlasu v celém rozsahu hlasu**, za účelem statistického vyhodnocení minimálně 2x vzestupně a 2x sestupně. Výsledná amplituda kmitů je **ovlivněná hlasovým úsilím** (sílou), proto pro měření **postačuje mf dynamika** (normální síly). Hlasitost zvuků je v případě

použití rezonančních trubiček a brumenda irelevantní, protože výrazná redukce vyzářovacího otvoru má za následek minimální změnu celkové dynamiky hlasu, naopak subjekt si výrazněji uvědomuje použité hlasové úsilí (nebo sílu hlasu).

- II. Pro **kvantifikaci efektivity cvičení** (poměru zesílení kmitání hrtanu k ostatním parametrem - vnitro-ústnímu tlaku, nebo naměřené SPL) je doporučeno cvičení **crescendo a decrescendo** ve výškové poloze odpovídající poloze největšího zesílení kmitání při úloze glissando. Toto měření lze zjistit i na základě měření sledovaného poměru z oblasti prvního rezonančního maxima kmitů hrtanu, resp. vnitro-orálního tlaku. Za účelem statistického vyhodnocení minimálně 2x zesilování a 2x zeslabování hlasu.

Pro oba výše uvedené typy měření je v průběhu měření potřebné dodržení stejné polohy těla, z hlediska časové výdrže této polohy je výhodnější sezení na židli bez opírání o opěradlo.

Přehled rezonančních cvičení které je možné analyzovat uvedenou metodikou:

- a) nejvíce otevřený **vokál "á"**;
- b) nejméně otevřený **vokál "ú"**;
- c) málo otevřený přední **vokál "í"** s nejmenším objemem ústní dutiny;
- d) **zavřené brumendo** (jako prodloužená hláska "m", kdy jsou zavřeny rty a zuby se jemně dotýkají);
- e) **otevřené brumendo** (podobně jako zavřené, jenom zuby jsou od sebe - cca 1-2 cm);
- f) měření **rezonančních trubiček s volným koncem ve vzduchu**;
- g) měření **rezonančních trubiček s volným koncem ve vodě (LaxVox cvičení)**.

Měřené signály

Pro oba účely metodiky stanovení nejefektivnější výškové polohy hlasu při konkrétním cvičení i stanovení efektivity hlasového cvičení je nutné:

- měření akustického signálu;
- elektroglografického signálu;
- měření vibrací hrtanu pomocí akcelerometru;
- měření vnitro-ústního tlaku.

Ostatní měření dokumentují jenom přídavné informace, které lze interpretovat jenom jako efekt na kmitání různých částí těla, sem patří:

- měření vibrací různých částí těla akcelerometrem (vhodné i pro měření oblastí které mohou být ovlivněny artikulací (např. rty, brada));
- měření vibrací různých částí těla vibrometrem (vhodné jenom pro fixovatelné oblasti, které nejsou ovlivnitelné artikulací);

Zásady záznamu jednotlivých signálů

Akustický záznam

Akustický signál je nutno dodržet následující zásady:

- měřit kalibrovatelným mikrofonom (nejlépe všesměrovým kondenzátorovým);

- měřit ve stejné vzdálenosti od akustického výstupu zdroje (za normálních okolností jsou to ústa, v případě použití rezonančních trubiček je to konec rezonanční trubičky, v případě LaxVox je to hladina vody).

Pro porovnání efektu různých typů cvičení proto doporučujeme měřit synchronně ve vícero vzdálenostech:

- a) ve vzdálenosti **30 cm** od úst (v šikmém směru) - pro možnost vyhodnocení efektu na zobrazení hlasového pole (zejména při měření řečových a zpěvních úkolů);
- b) ve vzdálenosti **10 cm** od úst a konce rezonančních trubiček (v šikmém směru) - pro možnost vyhodnocování útlumu jednotlivých rezonančních trubiček;
- c) ve vzdálenosti **1 m** od úst pro minimalizaci efektu vyzařování - vhodné zejména při porovnání vícero různých typů cvičení a LaxVox cvičení.

Elektroglotografický záznam

Elektroglotografický signál je možno snímat zařízeními s automatickým nastavováním zesílení signálu (např. Laryngograph D200) nebo zařízení s manuálním nastavením zesílení (např. Laryngograph A100). Pro vyhodnocování změn hlasových rejstříků (vibračních mechanismů) v průběhu rezonančních cvičení při glissandu je vhodné kromě měření kontaktního koeficientu sledování i absolutních změn amplitudy signálu, které jsou úměrné celkové kontaktní ploše hlasivek. Proto doporučujeme měření s konstantním zesílením, s tím, že před měřením se nalezne optimální zesílení.

EGG elektrody se umísťují tak, aby pokrývaly co největší plochu štítných chrupavek, se středem uprostřed chrupavek ve výšce hlasivek. Optimální zesílení se nalezne při úkolech s maximálním kontaktem hlasivek. Tato poloha obecně bývá v okolí habituální polohy, nejlépe se největší možný signál zjistí zpěvem řady tónu ve forte dynamice v rozsahu cca jeden tón pod až 4 tóny nad průměrnou polohou habituálního hlasu.

Ženské vyšší hlasy (soprán a mezzosoprán), zejména u klasicky trénovaných zpěvaček využívají už od habituální polohy hlasu falzetový vibrační mechanismus (m2), kdy amplituda signálu výrazně klesá. Pokud je cílem měření EGG signálu stanovení kontaktního koeficientu, nebo i tvaru jednotlivých EGG pulzů, pro tyto hlasy doporučujeme použití elektroglotografů s automaticky nastavovaným zesílením EGG signálu.

Záznam vibrací akcelerometry a vibrometrem

Akcelerometry nebo paprskový laserový vibrometer dokáží relativně snadno zaznamenávat měření jednotlivých bodů na povrchu těla, odlišují se jenom citlivostí a nutností fixace těla subjektu.

Měření pomocí akcelerometrů je citlivé v řádu 10^{-7} až 10^{-3} m (dle samotné citlivosti konkrétního akcelerometru). Výhodou je relativně snadné přiložení a fixace k částem povrchu těla (například náplastí), nevýhodou ale je možnost uvolnění fixace například při uvolnění náplasti potem, resp. změna kontaktního tlaku, čímž se ovlivňuje změřená výchylka. Uvedená skutečnost tedy předurčuje použití akcelerometrů na povrchy, kde je možné mechanické přitlačení akcelerometru k vibrujícímu povrchu páskou, například hrtan pomocí náhrdelníku, nebo čelo pomocí čelenky. Na nos (oblast "nasal bridge") je možné připevnit akcelerometr menších rozměrů pomocí širší náplasti.

Laserový vibrometer má výhodu přesného měření malých výchylek (cca v rádu 10^{-8} až 10^{-5} m), není ale vhodný na měření celkově se pohybujících částí, protože tělo v takovém případě nutno zafixovat. Další problém při použití laserových vibrometrů spočívá v tom, že na měřenou oblast nutno připevnit odrazovou plošku a ta se v průběhu měření nesmí posunout mimo oblast nasvícení laserem. Z tohoto důvodu je možné měřit laserem hlavně části těla s malými výchylkami, které nejsou ovlivněny artikulačními pohyby tváře, jako je například čelo. Fixace hlavy je nutná ve všech osách horizontálního i vertikálního směru (tedy v ose od ucha k uchu, předozadní horizontální ose i vertikální ose hlavy), pro účely tohoto měření zůstává volná jenom spodní čelist. Proto není vhodné měření vibrometry od lícních kostí směrem dolů.

Měření vnitro-ústního tlaku

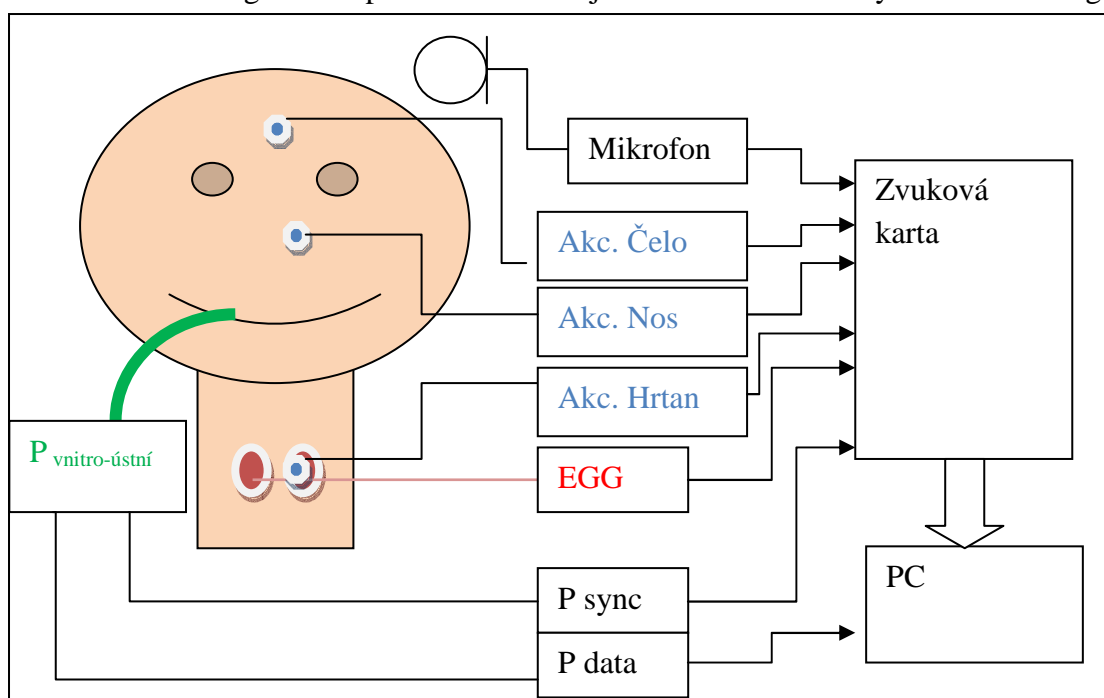
Vnitro-ústní tlak je indikátorem příčiny kmitání oblasti tváře a dokumentuje globální změny tlaku ve vokálním traktu, které jsou ekvivalentem supraglotického tlaku v hrtanu (s časovým zpožděním). Měření tlaku uvnitř úst je možné jenom v případech, kdy je konec vokálního traktu zúžený a relativně daleko od měřicího bodu. Při běžné řeči ani zpěvu není obecné měření vnitro-ústního tlaku možné, protože tlak vzduchu v ústech je stejný jako v okolí. Použití kanily pro měření tlaku je možné jen u úkolů se zavřenými ústy (brumenda) a při použití rezonančních trubiček. U digitálních tlakoměrů je nutný záznam synchronizačního signálu.

Konkrétní příklad měření a měřící aparatury

Schematické zobrazení je na Obrázku 1.

- Akustický signál byl měřený:
 - o ve vzdálenosti 10 cm od úst, nebo konce trubičky v šikmém směru, pomocí všesměrového kondenzátorového mikrofону SENNHEISER ME 2 - US - za účelem porovnání útlumu jednotlivých rezonančních trubiček;
 - o ve vzdálenosti 30 cm od úst, v šikmém směru, pomocí všesměrového kondenzátorového mikrofону SENNHEISER ME 2 - US - za účelem sledování efektu na hlasovém poli;
 - o ve vzdálenosti 1 m od úst pomocí kondenzátorového mikrofону SENNHEISER K6-P s vložkou s kulovou charakteristikou ME 62 - pro globální zhodnocení SPL vyzařovaného zvuku..
- Elektroglotografický signál je možné měřit
 - o v relativních hodnotách amplitudy s použitím manuálně nastavitelného výstupu elektroglotografu (Laryngograph A100), toto měření je primárně vhodné pro měření efektu rezonančních cvičení. Tento typ měření je vhodný zejména pro mužské hlasy a ženy s výrazný, resp. dobře identifikovatelnou štítnou chrupavkou.
 - o pomocí automaticky nastavitelného zesílení (Laryngograph D200), který ale neumožňuje sledování relativních změn amplitudy EGG signálu. V praxi však je doporučeno toto měření u žen s menším hrtanem, nebo u osob s těžkou identifikací štítné chrupky (např. u lidí s výrazným podkožním tukem).
- Vibrace byly měřeny pomocí piezoelektrických akcelerometrů PCB Electronics model:

- na hrtanu uprostřed plochy štítné chrupavky (konkrétně na jedné z EGG elektrod elektroglotografu na krku), upevňovací pásek EGG elektrod sloužil zároveň jako upevňující element akcelerometru k povrchu krku, použitý byl typ 352A24 s citlivostí 10,04 [mV/ms⁻²];
 - na nose v oblasti nosního můstku (konkrétně nalepený pomocí náplasti) , použitý byl typ 352C23 s citlivostí [0,568 mV/ms⁻²].
 - na čele (uprostřed plochy čela), na upevnění je vhodný upevňovací gumový pásek kolem hlavy se širší kontaktní ploškou v místě přitlačení akcelerometru k čelu, použitý byl typ 352A24 s citlivostí 10,04 [mV/ms⁻²];
- Měření vibrací pomocí paprskového Dopplerovho vibrometru se vyplatilo jenom ve fixované poloze hlavy s nasměrováním jednoho z paprsků na terčík, umístěný uprostřed plocha čela.
 - Měření horního rtu ani jiných pohyblivých částí není doporučeno.
 - Vnitro-ústní tlak byl snímáný pomocí digitálního diferenciálního tlakoměru (Honeywell ASDXAVX001PG2A3), kterého jeden výstup byl spojený s ústý pomocí tenké trubičky (vnitřní průměr 0,5 mm). Volný konec kanily byl umístěný v ústní dutině (tedy až za zuby), v případě měření rezonančních trubiček, byl v úrovni konce rezonanční trubičky v ústech, hned vedle trubičky. Signál tohoto systému je ukládaný digitálně v podobě *csv* souborů, pro identifikaci času spuštění a vypnutí záznamu tlaku vzduchu byl pořízený synchronizační signál v jednom z kanálů synchronního záznamu (Guštar, 2015).
 - Synchronní záznam:
 - je možné pořídit pomocí volně dostupného software Audacity, nebo pomocí AdobeAudition 3.0;
 - před záznamem je nutná kalibrace mikrofónů;
 - z digitálního převodníku tlaku je nutno zaznamenat synchronizační signál.



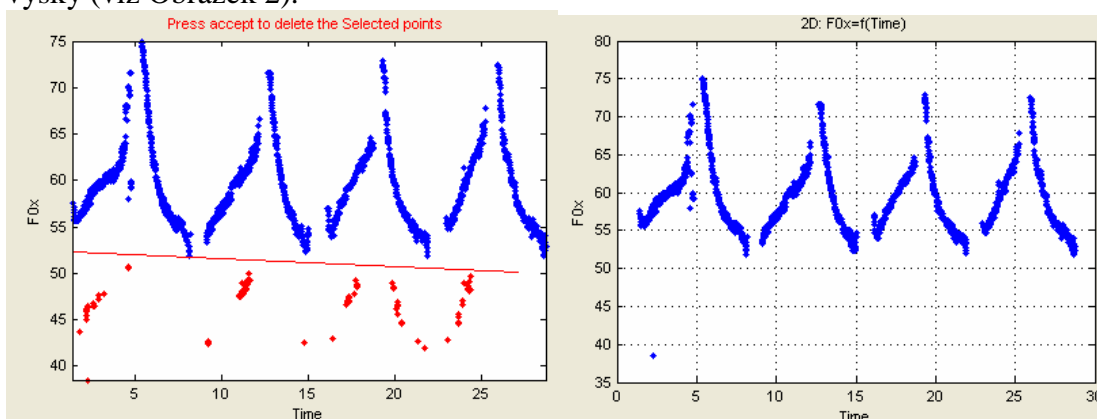
Obrázek 1 Schéma měřicí aparatury.

Kvantifikace vibračních vlastností

Vyhodnocení akustického záznamu

Akustický záznam, podobně jako je tomu při vyšetření hlasového pole, nese informace o výšce hlasu a naměřené SPL. Pro analýzu základní frekvence je doporučeno použití vyhodnocení na základě **autokorelační funkce** jednotlivých segmentů. pro účely analýzy mluvního hlasu je doporučeno analytické okno 40 ms s posunem 10 ms, pro zpěvní úkony (glisando, crescendo a decrescendo) je vhodné okno 50/15 ms.

Měření výšky hlasu pomocí autokorelace občas vykazuje nepřesné polohy, zejména v případech dominance některé z vyšších harmonických nebo subharmonické složky. Subharmonické složky jsou generovány zejména v hlubokých polohách, kdy subjekt přechází do pulsního rejstříku hlasu, nebo také často při použití rezonančních trubiček s volným koncem ve vodě, kdy nastává výrazná modulace frekvencí unikání bublinek jak periody, tak amplitudy kmitání hlasivek a tedy i výrazný jitter a shimmer v akustickém a EGG signálu. V takové případě je nutná kontrolovaná (semiobjektivní) editace změřené výšky (viz Obrázek 2).



Obrázek 2 Příklad ruční editace v SW RealVoiceLab změřené základní frekvence zvuku (převedené na hodnoty midi púltónů) s následným přepočtem vyšší základní frekvenci na základě nejbližšího nižšího maxima autokorelační funkce.

Vyhodnocení EGG záznamu

Z elektroglossografického záznamu jsou zásadní dva parametry: kontaktní koeficient hlasivek (CQ), tedy procentuální míra kontaktu hlasivek a amplituda EGG signálu získaná jak průměrná magnituda jednotlivých hlasivkových cyklů v měřeném okně.

CQ je dle literatury možno počítat různými způsoby (Herbst a Ternstrom, 2006), které vedou k odlišným hodnotám, ale z hlediska zaměření sledovaných efektů, se uvedená měření a kvantifikace má týkat zejména modálního rejstříku (m1 mechanismu), kde se u většiny subjektů předpokládá charakteristický tvar EGG signálu jednoho cyklu, kdy fáze kmitání hlasivek jsou charakteristické náhlým uzavřením, pozvolným uvolňováním a pak zase relativně náhlým rozpojením hlasivek. V signálu se tento typ kmitání projevuje "kolenem" ve fázi uzavření a dvěma výraznými vrcholy v první derivaci signálu, pozitivní vrchol odpovídá momentu kontaktu hlasivek, negativní vrchol zase momentu oddálení hlasivek. Uvedený typ měření kontaktu hlasivek není vhodný pro falzetový rejstřík (m2 mechanismus), který má spíše sinusový průběh EGG signálu. Výrazným znakem falzetového rejstříku je však i náhlá výrazná změna amplitudy EGG signálu. Na druhé straně popisovaná rezonanční cvičení se obecně

nemají provádět ve falzetovém rejstříku, proto není nutné ani pro tento rejstřík analyzovat CQ koeficient.

Vyhodnocení vibračních dat

Vibrační data získaná vibrometrem popisují rychlost pohybu a měření akcelerometrů popisuje zrychlení. Pro výpočet výchylky (amplitudy kmitů) je nutná prvotní integrace signálu.

Pro amplitudu vibrací vibrometrů platí vztah:

$$Av(t) = \int u(t) \cdot SV \, dt, \text{ kde } u(t) \text{ je signál vibrometru a } SV \text{ je jeho citlivost (ms}^{-1}\text{V}^{-1}\text{)}.$$

Pro amplitudu vibrací akcelerometrů platí vztah:

$$Aa(t) = \iint u(t) / SA \, dt, \text{ kde } u(t) \text{ je signál akcelometru a } SA \text{ je jeho citlivost (Vm}^{-1}\text{s}^2\text{)}.$$

Pro samotnou analýzu amplitud jednotlivých cyklů je nutné odstranění jednosměrné složky a pomalých pohybů celé hlavy resp. těla.

Konkrétní příklad postupu zpracování dat v experimentech

Všechny analýzy této metodiky byly implementovány do SW *RealVoiceLab*, který složí i pro další měření vlastností hlasu, primárně pro měření Hlasového pole.

- Zpracování akustického signálu:
 - F0 a SPL (resp. v nekalibrovaném případě hodnoty RMS) byly vypočteny a následně editovány v programu *RealVoiceLab*, jak je postupováno v případech měření hlasového pole (viz (Frič, 2012));
- Vyhodnocení EGG a vibračních signálů:
 - CQ a amplituda EGG kmitů a amplitudy kmitů měřením pomocí vibrometrů a akcelerometrů, ze synchronního záznamu ve více kanálech byly stanoveny pomocí SW *RealVoiceLab*, pro tato hodnocení byla vytvořena funkce v prostředí MATLAB - *anChannelDataVibr*. Funkce umožňuje nastavení dle informací o jednotlivých kanálech, typ signálu (akcelerometer, EGG, nebo vibrometer), a citlivost zařízení daných signálů, případně jejich zesílení v předzesilovači. V případě nutnosti měření absolutních hodnot výchylek, se berou do úvahy hodnoty citlivosti snímačů a případného předzesílení (viz tabulka 1).

Tabulka 1 Způsob zadávání informací o měřených kanálech pro analýzu EGG a akcelerometrů

Kanál	Typ sign.	Citlivost	(-1)* Předesílení v dB	Poznámka
1	wav	1	0	Zvuk
2	EGG	1	0	Elektroglotograf
5	acc	1/0.01004	0	Akc. hrtan
6	acc	10/0.00966	-10	Akc. nos
7	acc	100/0.01013	-20	Akc. čelo
8	vib	0.125	-10	Vibrometr

Pro vyhodnocení pozice nejefektivnější polohy postačují relativní informace o amplitudě.

▪ Vyhodnocení **záznamu vnitro-ústního tlaku**:

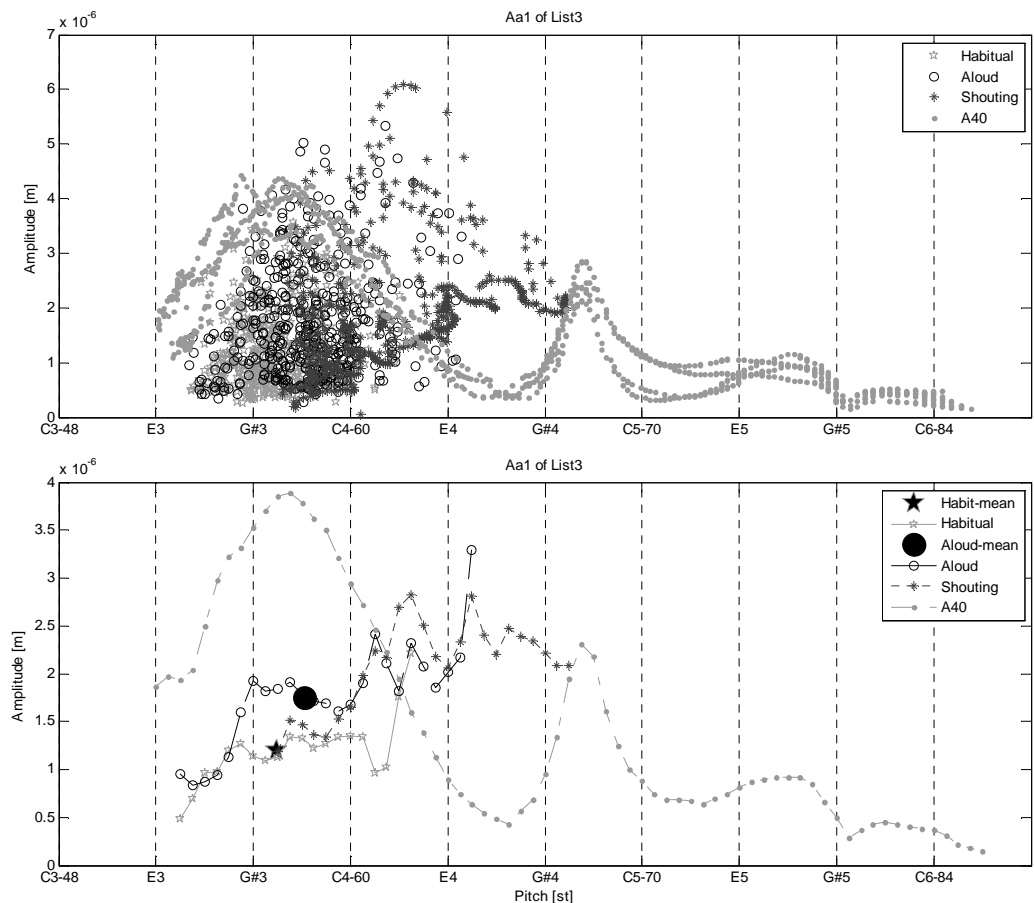
- v SW *RealVoiceLab* byla vytvořena funkce *ImpPQdatana* zjištění počátku záznamu tlaku ze synchronizačního signálu a následný import tlakových dat do datové struktury *RealVoiceLab*. Jako konkrétní tlak je uvedena průměrná magnituda rozkmitu změřeného tlaku ze všech měřených period v analyzovaném časovém okně. Použitý systém umožňuje sledování se vzorkovací frekvencí 2 kHz.

Vyhodnocení okamžitého efektu rezonančních cvičení

Popis efektu konkrétního cvičení na vlastnosti hlasu

Pro stanovení efektu konkrétního cvičení je vhodné výsledky měřených parametrů zobrazit v závislosti na výšce hlasu. Pro stanovení největšího efektu na kmitání hlasivek lze požit kombinaci parametrů Amplitudy kmitání hrtanu (Aa1), kontaktní koeficient z EGG (CQd) signálu a amplitudu EGG signálu (eA).

Obrázek 3 dokumentuje naměřené hodnoty výšek a amplitud kmitání hrtanu jednotlivých analyzovaných segmentů (horní část) a jejich průměrované hodnoty pro jednotlivé výškové intervaly (spodní část) dobře dokumentují pozici maxima kmitání vzhledem k výšce hlasu, ale také efekt na kmitání hrtanu vzhledem na habituální průměrnou amplitudu kmitání hrtanu.



Obrázek 3 Zobrazení naměřených amplitud kmitání hrtanu jako funkce změřené F0 (nahore) pro měření Habituálního hlasu, hlasitého čtení, gradace volání a glissand pomocí trubičky 40 cm. Spodní graf ukazuje průměrované hodnoty pro jednotlivé výškové intervaly a celkové průměrné hodnoty (označeno mean) pro habituální hlas a hlasité čtení (Aloud-mean).

Uvedený příklad dokumentuje pro trubičku 40 cm, že pozice prvního rezonančního maxima leží přímo nad pozicí průměrných hodnot výšky hlasu při hlasitém čtení (ale i něco výše, než je poloha habituálního hlasu). Amplituda kmitání hrtanu je přibližně 2,5 násobná vůči hlasitému čtení, resp. cca 3,2 násobek habituálních vibrací. V porovnání s maximální amplitudou gradace volání (což znázorňuje nejvyšší míru hlasové námahy) je maximální kmitání hrtanu při použití rezonanční trubičky ještě větší.

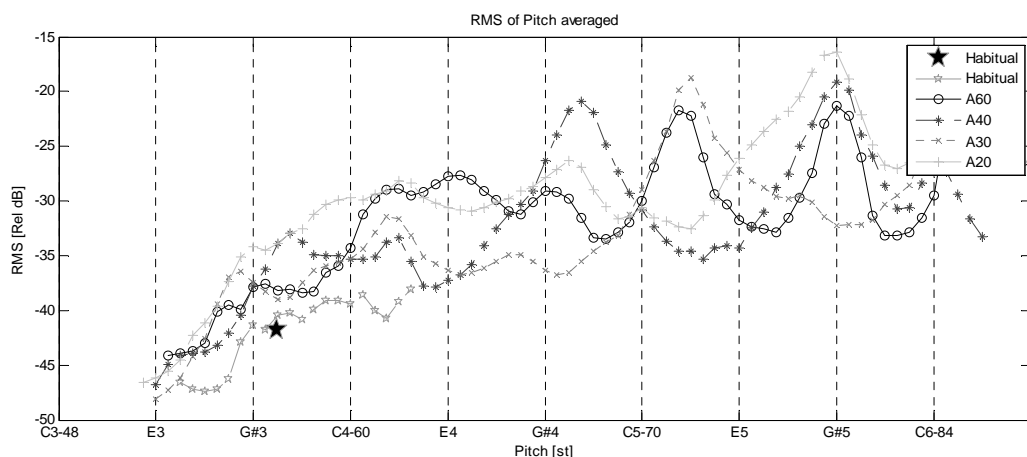
Proto dle porovnání pozic a amplitud habituálního hlasu, gradace volání a měřené trubičky stanovit obecný výškový ale i zesilovací efekt použití konkrétního rezonančního cvičení nebo rezonanční trubičky.

I. Stanovení nejefektivnějšího rezonančního cvičení

Vícenásobné měření umožňuje i statistické vyhodnocení. Prvním krokem je stanovení průměrné amplitudy všech opakování pro konkrétní výšku hlasu.

Obrázek 4 ukazuje průměrované hodnoty hladiny akustického tlaku (resp. hodnot RMS) z konkrétního intervalu sledované výšky hlasu pro habituální hlas a 4 měřené rezonanční trubičky. Dle grafu lze pozorovat, že hodnoty lokálních maxim odpovídající prvním rezonancím nejsou dobře patrné, RMS hodnoty však ukazují zřetelně polohy druhých rezonančních maxim, které ale leží v příliš vysoké poloze vzhledem na habituální polohu hlasu.

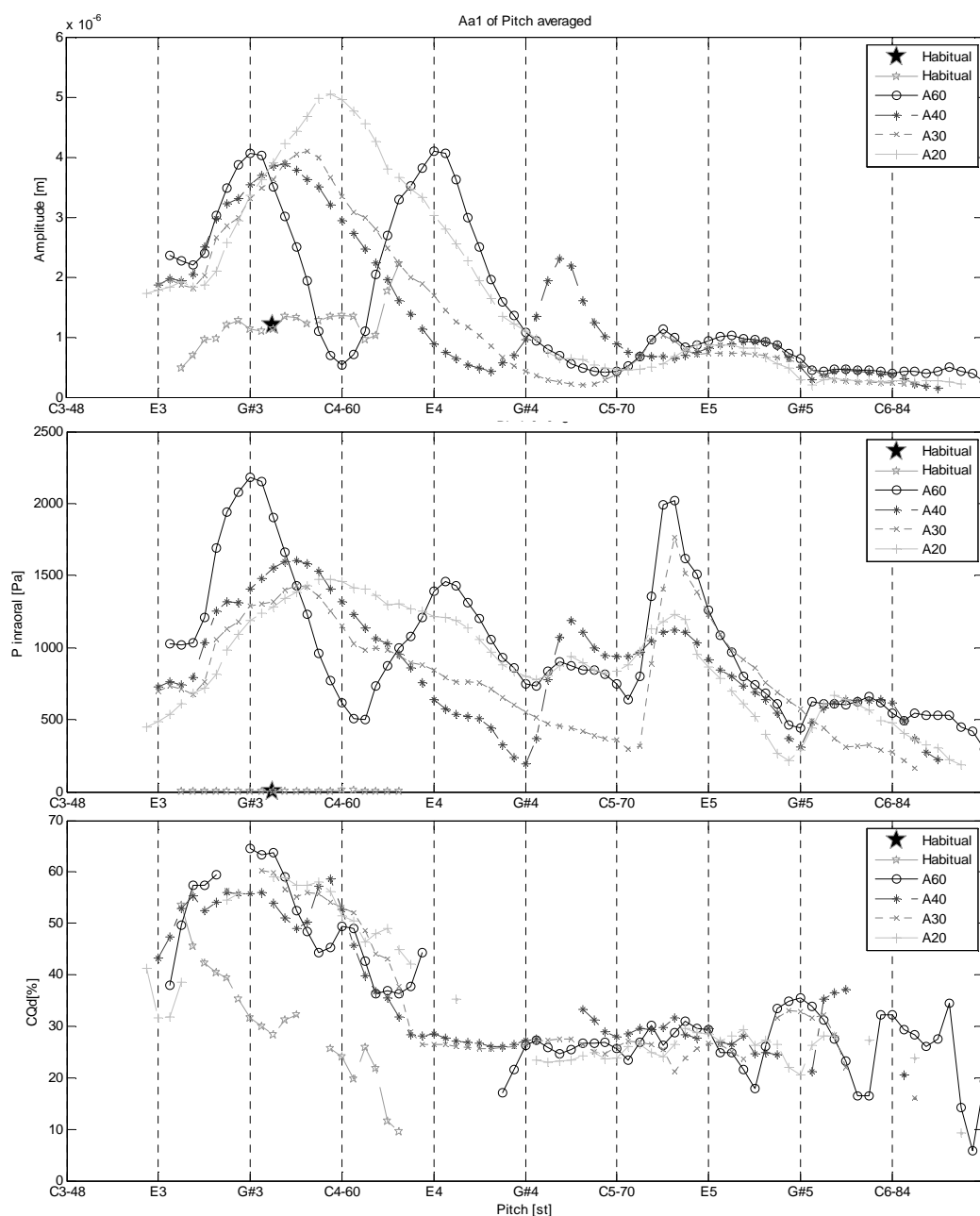
Pro stanovení rezonančního efektu rezonančních trubiček je potřebné zobrazení amplitud kmitání hrtanu, měření vnitro-ústního tlaku a měření kontaktního koeficientu hlasivek. Tyto parametry nepřímě popisují efekt na hrtan a kmitání hlasivek.



Obrázek 4 Zobrazení průměrovaných hodnot RMS (nekalibrovaných hodnot SPL) vzhledem ke sledovaným intervallům výšky hlasu pro úkoly habituálního hlasu a 4 rezonančních trubiček.

Obrázek 5 ukazuje příklad, kdy jsou porovnány výsledky 4 trubiček (60, 40, 30 a 20 cm dlouhých) vzhledem k habituálnímu hlasu. Výsledky měření amplitudy kmitání hrtanu dokumentují, že největších výchylek dosahuje hrtan pro trubičku 20 cm, ale maximum kmitání je v nejvyšší poloze vzhledem k rozsahu mluvního hlasu. Z tohoto pohledu se jako nejvhodnější ukazuje trubička 30 cm, která zesiluje kmitání hrtanu nepatrně méně než 20 cm, ale zato téměř v celém rozsahu použití mluvního hlasu, resp. svým účinkem bude korigovat cvičení hlasu zejména na výšky použitelné pro mluvní hlas. Dalším faktorem je vnitro-ústní tlak, nejvyšších hodnot dosahuje trubička A60, ale pozice jejího maxima leží příliš hluboko k habituálnímu hlasu, trubička A30 má nejnižší maximum, které ale leží v ideální výšce. Nejnižší maximum dosaženého tlaku implikuje možnost největší efektivity cvičení, protože pro nejmenší změnu tlaku se dosahuje největší změna

výchylky hrtanu. Tuto skutečnost ověřuje 2. cíl uváděné metodiky. Kontaktní koeficient slouží zejména jako indikátor mechanismu kmitání hlasivek, kde je nutno dbát na to, aby hlasivky kmitaly v ml mechanismu (CQd by mělo být v rozmezí 30-60 %).



Obrázek 5 Zobrazení naměřených průměrovaných amplitud kmitání hrtanu (horní obrázek), velikosti vnitro-ústního tlaku (uprostřed) a kontaktního koeficientu hlasivek (dolů) všech měření konkrétního cvičení jako funkce změřené F0 pro všech opakovaná měření konkrétní rezonanční trubičky. Zobrazena jsou měření habituálního čtení a čtyř rezonančních trubiček různé délky (60, 40, 30 a 20).

II. Stanovení efektivity konkrétního rezonančního cvičení

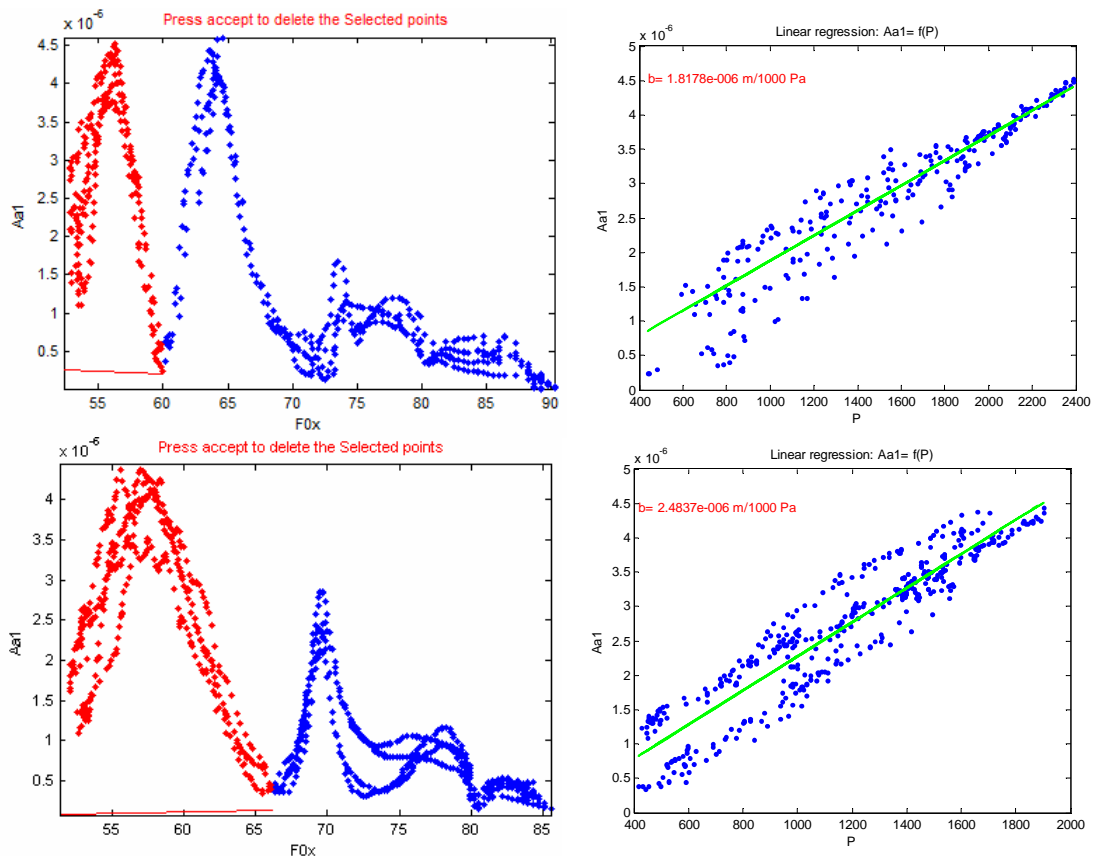
Pro stanovení efektivity rezonančního cvičení se vychází ze stanovení hodnot koeficientu zesílení kmitání hrtanu vzhledem na změnu vnitro-ústního tlaku. Toto měření je možno

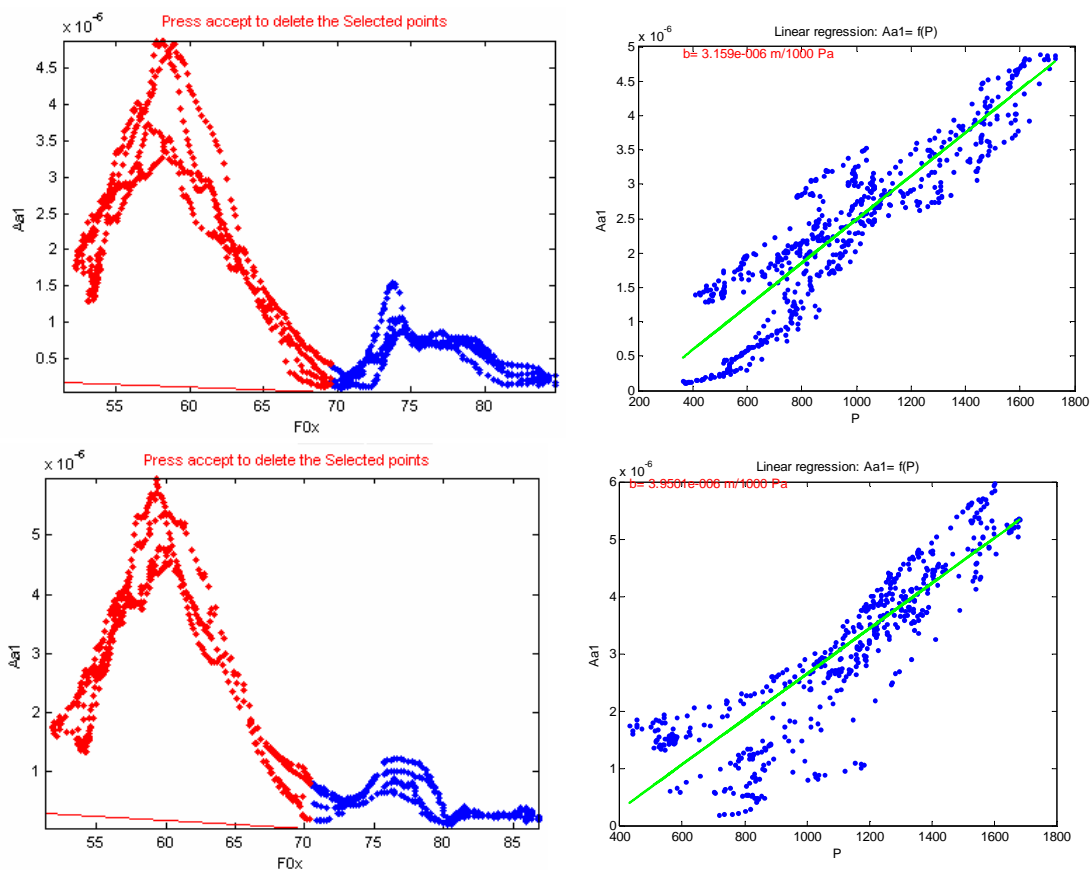
provádět jenom u cvičení s výraznou obstrukcí vokálního traktu, tedy u rezonančních cvičení a u brumend.

Koeficient zesílení se určí z hodnot lineární regrese vztahu $A=f(P)$, kde první lineární koeficient představuje poměr o kolik se změní velikost kmitání hrtanu při změně tlaku v ústech. Pro tento výpočet však třeba použít jenom hodnoty tlaku a amplitudy kmitání hrtanu pro oblast prvního rezonančního vrcholu.

Na Obrázku 6 je zobrazen způsob výpočtu implementovaný do SW RealVoiceLab. Nejdřív je na grafu závislosti amplitudy kmitání hrtanu na změřené výšce selektována oblast příslušného rezonančního maxima (tedy v rozsahu výšek nejbližších změřených minim) a následně je jenom z těchto hodnot zjištěná lineární regrese závislosti amplitudy kmitání hrtanu na vnitro-ústním tlaku. Výsledky koeficientu zesílení jsou v pravé části obrázků.

Zobrazené hodnoty ukazují postupný **nárůst koeficientu zesílení** kmitání hrtanu od trubičky délky 60 cm až po trubičku délky 20 cm. Dle uvedených hodnot by zde byla nejvhodnější trubička 20 cm. Její efektivní oblast zesílení však leží příliš vysoko vzhledem k rozsahu habituálního hlasu. Proto je jako nejvhodnější stanovena trubička 30 cm, jejíž maximum leží nad polohou průměru habituálního hlasu, ale pod maximální výškou habituálního hlasu, přičemž ale zároveň dosahuje nejvyššího koeficientu zesílení kmitání hrtanu.





Obrázek 6 Zobrazení závislosti naměřené amplitudy kmitání hrtanu vzhledem k výšce hlasu (levá část obrázků) a výpočet koeficientu zesílení kmitání hrtanu na vnitro-ústním tlaku (pravé části obrázků). Zobrazena jsou měření pro rezonanční trubičky 60, 40, 30 a 20 cm.

Stanovení efektivity cvičení za jinými účely

Podobným způsobem jak byl vyhodnocen koeficient zesílení kmitání hrtanu vzhledem na změnu vnitro-ústního tlaku lze hodnotit i jiné efekty rezonančních cvičení. Výše uvedený efekt je nejzákladnějším principem v hlasové rehabilitaci, kdy je snahou zesílení kmitání hlasivek při nejmenší námaze.

Z pohledu uměleckého hlasu je snahou cvičení zesílení hlavové rezonance, tedy kmitání čela. Tento efekt je obecně nejlépe dosahován ve vyšší polovině rozsahu hlasu, a proto je pro tyto účely vhodné sledovat vyšší rezonanční maxima rezonančních trubiček, resp. hlasových cvičení.

U osob s malou kontaktní plochou hlasivek, nebo krátkým kontaktním koeficientem lze metodiku využít na zjištění efektivity jednotlivých cvičení za účelem zlepšení uvedených problémů.

Častým problémem hlasových profesionálů a zejména osob s funkčními poruchami hlasu, je úsilné zesilování hlasu jenom pomocí zvyšování addukce hlasivek a tím i subglotického tlaku. Cílem rezonančních cvičení v takovém případě je maximální zesilování SPL vzhledem na nejmenší míru kontaktu a addukce hlasivek, které jsou v měřených signálech prezentovány kontaktním koeficientem a amplitudou EGG signálu. V případě měření efektivity cvičení při tomto účelu by měl být posuzován nejvyšší koeficient zesílení SPL vzhledem k změně CQd, resp. amplitudy EGG signálu.

Literatura

- ANDRADE P. A., WOOD G., RATCLIFFE P., EPSTEIN R., PIJPER A., SVEC J. G. (2014). Electroglossographic Study of Seven Semi-Occluded Exercises: LaxVox, Straw, Lip-Trill, Tongue-Trill, Humming, Hand-Over-Mouth, and Tongue-Trill Combined With Hand-Over-Mouth. *J Voice*, Vol. 28, No. 5, pp. 589-95.
- BELE I. V. (2005). Artificially lengthened and constricted vocal tract in vocal training methods. *Logoped Phoniatr Vocol*, Vol. 30, No. 1, pp. 34-40.
- CARDING P. N., HORSLEY I. A., DOCHERTY G. J. (1999). A study of the effectiveness of voice therapy in the treatment of 45 patients with nonorganic dysphonia. *J Voice*, Vol. 13, No. 1, pp. 72-104.
- DARGIN T. C., SEARL J. (2015). Semi-occluded vocal tract exercises: aerodynamic and electroglottographic measurements in singers. *J Voice*, Vol. 29, No. 2, pp. 155-64.
- FRIČ M. (2012). RealVoiceLab - manuál [computer program]. Výzkumné centrum hudební akustiky HAMU; 2012.
- FRIČ M. (2015a). Efekt rezonančních cviků a rezonančních trubiček na kmitání hrtanu a nosu. In: *Nové trendy akustického spektra 2015*. Technická univerzita vo Zvolene.
- FRIČ M. (2015b). The face vibration in resonance exercises measured by three different methods - first results. In: *Models and analysis of vocal emissions for biomedical*. p. (in press).
- GASKILL C. S., ERICKSON M. L. (2010). The effect of an artificially lengthened vocal tract on estimated glottal contact quotient in untrained male voices. *J Voice*, Vol. 24, No. 1, pp. 57-71.
- GUŠTAR M. (2015). Přístroj pro záznam tlaku a průtoku vydechovaného vzduchu. Praha. MARC-Technologický list čís. 80, Výzkumné centrum hudební akustiky HAMU.
- HERBST C., TERNSTROM S. (2006). A comparison of different methods to measure the EGG contact quotient. *Logoped Phoniatr Vocol*, Vol. 31, No. 3, pp. 126-38.
- NORDENBERG, M and SUNDBERG, J. (2004). Effect on LTAS of vocal loudness variation . *Logopedics Phoniatics Vocology*, Vol. 29, No. 4, pp. 183-191.
- RADOLF, V., LAUKKANEN, A. M., HORÁČEK, J., and LIU, D. (2014). Air-pressure, vocal fold vibration and acoustic characteristics of phonation during vocal exercising. Part 1 : measurement in vivo. *Engineering MECHANICS*, Vol. 21, No. 1, pp. 53-59.
- TITZE I. R. (2001). Acoustic interpretation of resonant voice. *J Voice*, Vol. 15, No. 4, pp. 519-28.
- TITZE I. R. (2004a). A theoretical study of F0-F1 interaction with application to resonant speaking and singing voice. *J Voice*, Vol. 18, No. 3, pp. 292-8.
- TITZE, I. R. (2004b). What makes a voice acoustically strong? *J.Sing.*, Vol. 61, No. 1, pp. 63-64.
- TITZE I. R., STORY B. H. (1997). Acoustic interactions of the voice source with the lower vocal tract. *J Acoust Soc Am*, Vol. 101, No. 4, pp. 2234-43.
- TITZE, I. R. and TALKIN, D. T. (1979). A theoretical study of the effects of various laryngeal configurations on the acoustics of phonation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 66, No. 1, pp. 60-74.
- TITZE I.R., VERDOLINI-ABBOTT K. (2012). *Vocology, The science and practice of voice habilitation*. 1st ed. National Center for Voice and Speech. ISBN
- TITZE I. R., LAUKKANEN A. M. (2007). Can vocal economy in phonation be increased with an artificially lengthened vocal tract? A computer modeling study. *Logopedics Phoniatics Vocology*, Vol. 32, No. 4, pp. 147-56.