

Akademie múzických umění v Praze
Hudební a taneční fakulta

Katedra zvukové tvorby
Zvuková tvorba

DISERTAČNÍ PRÁCE

Aspekty barvy zvuku a zvukové kvality

Jan Otčenášek

Vedoucí práce: Ondřej Urban

Přidělovaný akademický titul: PhD

Praha, 30.6.2023

Academy of Performing Arts in Prague
Music and Dance Faculty

Department of sound
Sound design

DISSERTATION THESIS

Aspects of timbre and sound quality

Jan Otčenášek

Dissertation supervisor: Ondřej Urban

Awarded academic title: PhD

Prague, 30.6.2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem *Aspekty barvy zvuku a zvukové kvality* vypracoval samostatně pod odborným vedením vedoucího práce a s použitím pouze uvedené literatury a pramenů a že práce nebyla využita v rámci jiného vysokoškolského studia či k získání jiného nebo stejného titulu. Souhlasím s tím, aby práce byla zveřejněna v souladu se zákonem a vnitřními předpisy AMU.

Praha, dne 30.6.2023

Jan Otčenášek

Poděkování

Abstrakt

Předkládaná práce představuje výzkum v oblasti vnímání zvuku v širších souvislostech jeho hodnocení a lidského sluchu. Práce se podrobněji zabývá povahou základních a vynořujících se atributů barvy zvuku (časových dějů souvisejících s poslechem drsnosti a jemné časové struktury zvuku či jeho počátků). V oblastech, kde témata poskytují vhled do specifických kvalitativních a akustických fenoménů (varhanní, houslový zvuk a oblast lidského hlasu) práce přesahuje do oblasti aplikovaného výzkumu (například péče o historické hudební nástroje či distanční výuka).

Abstract

The thesis presents the results of a research of subjective auditory perception and the associated evaluation of sound sources. The study focuses on the nature of elementary and emergent sound attributes (of temporal or transient character related to sound roughness and temporal fine structure or its onsets). Specific methods for the analysis of perceptual data are used and the findings are discussed in the context of human hearing. The studied topics transcend to applied research in places where the studied attributes provide qualitative information and insight on specific acoustic phenomena (sound of an organ pipe, violin and voice).

Obsah

úvod

1 teoretická část

1. barvy zvuku

2 metodologická část

1. Metodologické aspekty výzkumu

2. Statistické postupy zpracování výsledků

3 experimentální část

1. Záznam zvuků a příprava stimulů

2. Poslechové pokusy

4 závěr

1. souhrn práce

2. doporučení pro navazující práci

Úvod

Předmětem práce je výzkum subjektivního vnímání hudebního zvuku v širších souvislostech jeho poslechu. Práce se zaměřuje na nedostatečně poznané aspekty barvy zvuku, které jsou zároveň podstatné z hlediska posuzování hudebního zvuku, zejména pak subjektivní časové aspekty barvy zvuku hudebních nástrojů. Téma je uchopeno z hlediska percepčních zákonitostí hudebního zvuku a akustických charakteristik hudebních nástrojů (teoretická rovina) i z hlediska reprodukce zvuku a stavby hudebních nástrojů (aplikovaná rovina).

Popis problému

Hodnocení zvuku a zvukové kvality poslechem je součástí praxe mnoha oborů zabývajících se zvukem a slouží jako zdroj informací o zdroji zvuku a souvisejících jevech (hodnocení varhanních píšťal poslechem je užíváno k posouzení konstrukčních zásahů a je významnou součástí řemeslných úkonů s cílem dosáhnout optimálního zvuku nástroje (Fritz et al. 2012). Vlastností užívaných k hodnocení zvuku v jednotlivých odvětvích zabývajících se hudebním zvukem ovšem nejsou pro mnohé oblasti jednotné (Siedenburg et al. 2016, Kaplanis et al. 2014). Tyto vlastnosti jsou též předmětem základního výzkumu principů vnímání a lidského sluchu (například model lidského sluchu [Vencovský a Frič 2012]). Vzhledem k šíři dané problematiky v současnosti vědecké práce nepokrývají celou řadu oblastí podstatných z hlediska využití v hudebním zvuku, a řada souvisejících problémů v oblasti fungování lidského sluchu není dosud uspokojivě uchopena.

Současný stav poznání

Současný přístup k výzkumu atributů barvy zvuku využívá metody konstrukce a interpretace percepčních prostorů či analýzy slovních dat (nejčastěji metodami faktorové či shlukové analýzy). Tyto slovní metody však neumožňují určit nezástupnost jednotlivých atributů a vztahy mezi nimi, a jsou citlivé na nejednotný slovník posluchačů (například Kaplanis et al. 2014). Toto je příčinou nejednoznačnosti a faktorem ztěžujících vznik přehledových studií (*Ibid.*). Zjištěné vlastnosti mohou být vzájemně zástupné a tvořit vícerozměrné vnořující se vlastnosti. V případě metody percepčních prostorů je počet základních atributů, které lze pomocí této metody nalézt omezen možnostmi této statistické metody. Těmito metodami tak byly stanoveny některé základní vlastnosti barvy zvuku (dimenze) a byly též nalezeny některé souvislosti s fyzikálně-akustickými vlastnostmi zvuku (například Zwicker a Fastl 1999), avšak rozsah těchto poznatků je pro účely užití v hudebním zvuku nedostatečný a odhalené závislosti jsou příliš obecné. Dimenze a odpovídající vlastnosti stanovené metodou

interpretace percepčních prostorů mohou tvořit vynořující se vícerozměrné vlastnosti (Otčenášek a Otčenášek [2015] a Otčenášek [2016]), jejichž závislosti dosud nebyly popsány. Lze také předpokládat, že některé dimenze jsou specifické jen pro určitý kontext zvuků a různé kontexty zvuku obsahují dimenze (Siedenburg et al. 2016), které doposud nebyly v literatuře popsány. Tyto dílčí vlastnosti mohou mít též nepopsané rozdílné souvislosti s preferencemi a kvalitou zvuku (Tsai 2004), která se na tyto vlastnosti váže. Drsnost byla například dána do souvislosti s nelibozvučností (Pressnitzer et al. 2000) a nepříjemností zvuku (Takao et al. 1993), ale také s jeho bohatostí (například žestě [Geringer et al. 1999], housle [Fritz et al. 2012], pěvecké techniky [Namba et al. 1991]). Relativní důležitost jednotlivých vlastností pro posouzení zvukové kvality zdroje či zvuku může též být odlišná pro různé vlastnosti. Tyto zákonitosti dosud nebyly rozlišeny.

V souladu s výše uvedeným se práce se zaměří na doposud nezkoumané zvukové kontexty a nezkoumané atributy barvy zvuku, například v návaznosti na Otčenášek (2013) a Otčenášek (2016) na vynořující se atributy a na ty, které souvisejí s časovými aspekty zvukového signálu (například drsnost).

Cíle výzkumu

Výzkum má charakter základního i aplikovaného výzkumu barvy zvuku. Výsledky přispějí k zobecnění současné teorie lidského vnímání barvy a kvality zvuku, ovšem poznatky výzkumu budou též využitelné pro vytváření metodik hodnocení zdroje zvuku či reprodukčního řetězce.

- 1) Upřesnění charakteristik barvy zvuku spojených s posuzováním kvality zdroje zvuku
- 2) Upřesnění souvislostí vynořujících se a základních vlastností barvy zvuku
- 3) Upřesnění dodatečných zákonitostí pro kontext daného nástroje či reprodukce (například v souvislosti jejich konstrukcí či metodami reprodukce)

Postup

- 1) Určení zdrojů zvuku, pro něž jsou časové aspekty relevantní z hlediska kvality
- 2) Popis základních charakteristik barvy zvuku u studovaných zvuků
- 3) Určení souvisejících vlastností barvy zvuku a aspektů daného signálu

Použitá metodologie

V práci budou provedeny: experimentální manipulace měřených proměnných, záznamy experimentálních zvuků, poslechové testy s posluchači a analýza subjektivních i zvukových dat statistickými metodami. Pro záznamy bude použita binaurální stereofonní metoda či jiné vhodné metody záznamu. Vlastností barvy a kvality zvuku budou zkoumány metodami psychologického škálování (párový srovnávací test, odhad magnitudy) a slovními metodami (slovní popis). V rámci analýzy dat bude provedena statistická analýza vzájemných vztahů mezi získanými proměnnými k ověření pracovních hypotéz (analýza shody a posuzovacího stylu posluchačů, jednotné slovní zásoby, záměnnosti deskriptorů, tvorba frekvenčních slovníků, tvorba a interpretace prostorových modelů vztahů mezi vnímanými zvuky [percepční prostor]).

Přínos práce

- 1) Rozšíření současných poznatků o deskriptorech a vlastnostech barvy zvuku a lidském vnímání
- 2) Rozšíření současných poznatků o vlastnostech barvy a kvality zvuku zkoumaných zdrojů
- 2) Příspěvek k souběžné validitě výzkumů vlastností barvy zvuku a zvukové kvality

1 Teoretická část

1.1 Zvuk

Zvukem je označováno kmitání na jeho zdroji i vlnění šířící se k posluchači akustickým či elektroakustickým médiem¹, i jeho následná subjektivní reprezentace tvořená při jeho rozpoznání a poslechu. Zvuk tak představuje fenomén mnoha úrovní a podob od zdroje, přes jeho šíření prostředím k posluchači, až po převod na sluchové informace. Jejich plné poznání je pro jeho uchopení srovnatelně důležité a je zejména podstatné pro oblast hudebních zvuků, kde mají děje na každé úrovni i estetickou povahu. I u stálého tónu například dochází při jeho produkci a šíření ke složitým změnám amplitudy, frekvence i dalších parametrů (včetně těch časových) a tuto složitou akustickou povahu provází rozmanitost vnímaných vlastností zvuku posluchačem. Tyto pak zpětně odkazují na různé děje na zdroji zvuku i v jeho okolí. Mimo základní vlastnosti (výška či hlasitost) jsou to i další aspekty zvuku spojené s jeho rozličnými charakteristikami označované jako barva.

Percepce

Percepce² představuje proces zpracování sluchových informací do prvotních počitků a jejich další integraci do celistvé reprezentace mající u každého posluchače vlastní subjektivitu (jako proces se nedá omezit jen na jejich organizaci či interpretaci). Proces tohoto zpracování probíhá vědomě i nevědomě na několika úrovních (Atkinson 2003). Na nižší úrovni jednotlivé počitky existují na předvědomé a předpozornostní úrovni. Na této úrovni probíhá rozpoznání sluchové informace a odehrávají se základní afektivní reakce (Koelsch 2011, Harding et al. 2007). Na vyšší úrovni dochází k interaktivním operacím, které přesahují pouhé rozpoznání rysů, a k vědomému vnímání zvuku a jeho významů. Na této úrovni se také vytváří jazykové asociace. Uvedené zpracování a navazující uvědomění souvisí s aktem pozornosti. Její potřebná míra postupně narůstá u složitějších obsahů (Ibid.). Akustická informace je kódována v sensorické paměti a má podobu jednotlivých sluchových objektů (jejich sdružování se řídí pravidly podobnosti či blízkosti) a jednotlivé objekty jsou dále rozpoznávány do sluchové scény³ a tvoří oddělené sluchové toky [auditory stream]. Zpracování probíhá na základě tvarových principů a příznačných rozlišitelných rysů. Během této segregace má zásadní úlohu časová informace (Harding et al 2007).

¹ Zde jako signál

² Taktéž vnímání

³ Angl. *Auditory scene*

Subjektivita

Zvuk posluchač vnímá subjektivně jako počitek či celý vjem⁴ a následně i jako složitější reprezentaci či obraz⁵ (Harding et al. 2007). Subjektivní obraz zvuku představuje sled mnoha časově se odehrávajících aspektů či jednotlivostí, jež utváří jeho *charakter* (Koeslch 2011). Mnoho subjektivních aspektů zvuku souvisí s funkcí sluchového ústrojí a je podřízeno funkčnímu hledisku rozpoznání informací o zdroji či o situaci okolo posluchače. Sluchová reprezentace tak má zpravidla akustickou příčinu, může mít abstraktní i konkrétní formu (příčina i způsob rozpoznání jsou ale často spojené s fenoménem, který je způsobil). Subjektivní zvukovou podobu tak představují *informace* na neuronální i kognitivní úrovni. Integrace a interpretace těchto informací probíhá souběžně na mnoha propojených úrovních a to jak na delších časových úsecích (asi 150ms), tak i téměř okamžitě (například jako náhled⁶ (Harding et al. 2007)). I přes tuto složitou a subjektivní povahu opakované poslechy poukazují na stabilitu a předvídatelnost tohoto procesu a podstatně jej mohou ovlivnit až pozornost a prožívání. Utváření reprezentací probíhá na základě tvarových principů a dalších zákonitostí (například na základě rytmických, témbrových a prostorových vlastností či tvarových principů podobnosti, blízkosti, kontinuity).

Fenomenologická škola standardně rozlišuje různé způsoby poslechu (běžný spojený s účelem, sémantický spojený s praktickým významem a kritický spojený s hodnocením a popisem percepčního charakteru zvuku) (Carron et al. 2017). Ke kritickému patří například profesionální poslech.

Barva zvuku

Barva zvuku představuje percepční veličinu (Melka 2005) i označení pro širokou škálu různých aspektů zvuku, na jejichž *lze rozlišit dva zvuky stejné hlasitosti, výšky a doby trvání* (ANSI/ASA 2013, Pratt a Doak 1975 s. 317). Na základě této definice lze barvu zvuku popsat jako množinu *dalších* aspektů zvuku, které jsou součástí zvukového charakteru a rozpoznáváme je mimo *výšku* či *hlasitost a dobu trvání* při poslechu zvuku jako vlastnosti na nich nezávislé (Caclin et al. 2005). Posluchači vnímají vlastnosti barvy zvuku jako ucelené percepční vlastnosti (Letowski 1992, Susini et al. 1999) a mohou na jejich reprezentaci zaměřit pozornost a slovně své prožitky vyjádřit či jinak popsat, například jako *světlost, tmavost, ostrost, zvonivost* či *hrubost* zvuku (Štěpánek 2006). Tyto atributy představují reprezentace vlastností barvy zvuku na jazykové úrovni a lze jimi vyjádřit percepční identitu zvuku. Posluchači také mohou jejich míru posuzovat na posuzovací škále (Caclin et al. 2006,

⁴ Angl. *Percept*

⁵ Angl. *auditory object* či *auditory image*

⁶ Angl. *Auditory gist*

Melka 2005). Na základě výsledků poslechových testů byly stanoveny základní dimenze barvy zvuku a jejich přibližný rozsah, na kterém jsou navzájem kolmé a nezávislé⁷ (jednotlivé dimenze barvy zvuku jsou navzájem nezávislé na rovině *subjektivní reprezentace*) (Caclin et al 2008)] a posluchači je dokáží posuzovat odděleně (na tomto poznání je založeno širší pojetí barvy zvuku (Susini et al. 2004, Susini et al. 2015). Mnoho těchto dimenzí má přímou souvislost s fyzikálními či sluchovými příčinami (fyzikální podstata počitků)

Značná část předchozích studií se zaměřila pouze na výzkum barvy zvuku u stacionární části tónu (to může být důsledek úzké interpretace její definice⁸ a též i omezení metod signálu (zejména se užívá frekvenční analýza a amplitudové spektrum, například jeho obálka či poměr amplitud harmonických). Současná interpretace ovšem barvu zvuku pojímá širěji jako mnohorozměrnou kategorii zahrnující množinu mnoha kvalitativních vlastností zvuku. Na základě tohoto pojetí je barvu možné zkoumat i za okolností proměnnosti základních vlastností (zvuk se může lišit charakterem, ovšem utváří jej jednotlivé dílčí vlastnosti v rámci jejich stabilního rozsahu). Navazující studie (včetně této) pak jednoznačně potvrzují důležitost časové proměnnosti či přechodných dějů pro její charakter

Barva zvuku slouží jako podklad pro rozpoznání významu i emočního obsahu. Na neuronální úrovni mají sítě, na nichž se zpracovávají jednotlivé rysy barvy zvuku přímé napojení na centra spojená s emoční reakcí a prožíváním (Masataka 2006, Koelsch 2011) a na subjektivní úrovni tvoří barva zvuku *afektivní kvalitu* přímo spojenou s emočním prožíváním.

Barva hudebního zvuku

Barva zvuku je nedílnou součástí hudebního zvuku a u západní klasické i neklasické hudby a je důležitou složkou interpretační. Označení barva zvuku se při tom užívá jak zprostředkovaně, pro třídu určitého hudebního nástroje (původní význam slova *témbre*) i pro jednotlivé vlastnosti jeho zvuku (jako atribut) (Mazoreau et al 2003). Obecně má ale barva kvalitativní formu nezávisle na určení zdroje původu (barva zvuku je nezávislá na zdroji a k jeho identifikaci se pouze užívá) (Mcadams a Giordano 2012) a je univerzálním podkladem při hodnocení kvality hudebních nástrojů i širšího hudebního hodnocení (například záznamu či reprodukce hudebního zvuku).

Hudební poslech se vyznačuje značnou senzitivitou posluchačů k drobným barevným změnám a aspektům okolností poslechu⁹. Schopnosti posluchačů rozpoznávat jednotlivé vlastnosti barvy zvuku se postupně s hudební zkušeností rozvíjejí (zejména pak u interpretů a zvukových mistrů). Od toho se odvíjí celá řada dalších fenoménů specifických pro hudební

⁷ Též rozsah *invariance*

⁸ Potřeba držet shodnou délku trvání

⁹ Jevy ovlivňující kvalitu přirozeného zvuku jsou *subtilní* (Melka Alois, nepublikováno)

okolnosti. Mezi ně patří například *zabarvení* zvuku či *polyfonní* a *prostorová* barva¹⁰. Tyto fenomény souvisejí s poslechem zvuku v hudebních prostorách či s jeho zprostředkováním prostřednictvím záznamu a reprodukce, jsou spojené s projevem jednotlivých širších okolností (například interakce zvukových vln s místností) a provází je ovlivnění zvukové reprezentace (Kaplanis et al. 2014). Samostatné jevy spojené s místností či dozvukem se od barvy zvuku obvykle odlišují (posluchači je nepovažují za součást barvy zvuku a při poslechu se jim přizpůsobují), ale změnou barvy zvuku se projevují (*Ibid.*). Hudební barvu zvuku tak tvoří složitá sada vzájemně propojených aspektů (Mcadams a Giordano 2012).

I přes svou relativní důležitost ale nejsou zákonitosti o vnímání hudebního zvuku nástrojů, interpretace i záznamového a reprodukčního řetězce zcela popsány. Tato práce má zejména povahu základního výzkumu atributů barvy zvuku. Zobecněním jednotlivých poznatků do oblasti hudebního zvuku ovšem představuje její aplikovanou rovinu.

Dimenze barvy zvuku

Na základě představených poznatků lze barvu zvuku považovat za mnohorozměrnou veličinu sluchového vnímání, u níž lze rozlišit jednotlivé dílčí kategorie (atributy). U určitých atributů byla opakovaně prokázána vzájemná nezávislost (na subjektivní úrovni i na úrovni sluchového kódování a sluchové paměti) (Susini et al. 2004, Susini et al. 2015, Sylvain et al. 1999, Caclin et al. 2006¹¹), zatímco jiné atributy či popisné vlastnosti se vzájemně významově i poslechově překrývají. Celek těchto atributů a jejich vztahů tvoří latentní strukturu problému, jež je projevem konkrétních percepčních aspektů zvuku (latentní struktura je směs souvislostí atributů na daném kontextu zvuků¹²). Uvedenou strukturu lze odkrýt například na základě jejich kovariance (u slovních dat lze identifikovat faktory představující variabilitu popisovaného jazykového i percepčního problému) a následně, po posouzení její reprezentativnosti, identifikované faktory zobecnit jako strukturu prostoru základních a nezávislých vlastností zvuku (dle širší definice barvy). K pojmenování těchto vlastností je tak užíván termín základní. Identifikace nezástupných a základních atributů a jejich vztahů uvnitř prostoru představuje základní problém.

Základní či obecné atributy barvy zvuku jsou popsány řadou předcházejících studií a metod (včetně těch založených na poslechové hodnocení) (Carron et al. 2017) a lze mezi ně zařadit zejména *ostrost*, *tupost* či *úzkost*¹³ (*Ibid.*). Prostřednictvím těchto atributů také bylo popsáno několik základních univerzálních percepčních dimenzí (například tmavost, světlost či úzkost) (Caclin et al. 2005) a pro značnou část z těchto atributů byla stanovena i příčina¹⁴

¹⁰ Souzvuč zdrojů a místností (Alluri a Toiviainen 2010)

¹¹ Taktéž Handel and Erickson (2001)

¹² Například zástupnost

¹³ Dle okolností i mnoho dalších

¹⁴ Například rozložení energie (*světlost*) či kolísání amplitudy (*drsnost*)

(Zwicker a Fastl 1999). Studie těchto atributů ale nepokrývají celou řadu zvukových aspektů a okolností či jejich subjektivních a akustických příčin (z hlediska hudebního zvuku nemají potřebnou jemnost). Uvedené studie taktéž převážně popisují barvu stabilních zvuků zakmitaného stavu¹⁵ (Zwicker a Fastl 1999, Fritz et al. 2012).

Barva i barva hudebního zvuku byla též předmětem několika rozsáhlých českých studií. Podrobnou jazykovou studii slovních charakteristik barvy zvuku a potenciálních dimenzí provedl na základě dotazníkového šetření pro české prostředí kolektiv Jana Štěpánka (Stepanek a Moravec 2005). Studie katalogizuje slova z hlediska jejich vzájemných souvislostí (protikladnost a podobnost) i jejich příhodnosti k popisu jednotlivých činností a částí tónu. Popisem a základními vlastnostmi barvy hudebního zvuku se zabývaly i předchozí rozsáhlé české studie kolektivu centra MARC či ústavu VUZORT (Štěpánek 2006). Cílem těchto studií bylo určení základních dimenzí. Percepční prostor v nich byl vymezen na 3 dimenze, které bylo možné slovně interpretovat jako *temný* a *tmavý* - *jasný* a *světlý*, *drsny* a *hrubý* - *jemný*, *plný* a *široký* - *úzký*¹⁶ (uvedené dimenze odpovídají dalším z jiných studií¹⁷). Část této práce se k archivním sekundárním datům této studie navrácí a představuje pokus o jejich hlubší analýzu na základě nových postupů, které souvisí s rozvojem metod i poznání od dob jejího uskutečnění.

Časová struktura

Studie barvy zvuku se převážně omezují na pseudostacionární tón. Příčinou různých barev zvuku ovšem může být kombinace stabilních i přechodných zvukových charakteristik (Sethares 2005). Přirozené zvukové signály jsou různě proměnné či modulované a jednotlivé harmonické mají různá fázová či časová zpoždění. Barvu zvuku tak nelze plně vysvětlit na základě rysů amplitudového spektra¹⁸(i když je tento přístup rozšířený) (Cadoz 1990). Nízkofrekvenční modulace představují součást hlavních dimenzí barvy zvuku orchestrálních hudebních nástrojů (Eliot et al. 2011) a různé proměnnosti či modulace jsou charakteristickým rysem zvuku mnoha hudebních nástrojů (Lalitte 2008, Eliot et al. 2011, Kendall et al. 1999). Z hlediska této práce je významný fenomén *jemné časové struktury*. Termín se především užívá k popisu sluchového fenoménu ale má svou objektivní i subjektivní reprezentaci (Huan a Poeppel 2007). Studie naznačují změnu citlivosti na jemnou strukturu s posluchačskou zkušeností (Mishra et al. 2015) či dozvukem (zejména u vyšších frekvencí) (Sayles a Winter 2008) a tento předmět představuje aktuální výzkumný problém.

¹⁵ Úzká definice barvy zvuku

¹⁶ *Ostrost* je společným atributem *světlosti*, *úzkosti* a *drsnosti* (Štěpánek 2006)

¹⁷ Například *temný* - *jasný* a *kulatý* (Garnier et al. 2008) či *jasnost*, *textura* či *hmotnost* (Zacharakis et al. 2015).

¹⁸ například na základě obálky či vztahů mezi amplitudami

Posuzování zvuku

U mnoha hudebních oborů se užívá posouzení zvuku poslechem jako prostředek k získání informací o dějích spojených s hudebním zvukem či o zvuku hudebních nástrojů a odpovídajících akustických fenoménech. Při uvedeném druhu poslechu dochází k hodnocení kritérií a účelových vlastností pro posouzení a rozlišení jednotlivých hodnocených fenoménů (Fritz et al. 2012). Tato kritéria jsou specifická pro určité oblasti (například pro jednotlivé nástroje) a tvoří součást profesních znalostí uživatelů a jejich slovníků (Štěpánek a Moravec 2005). I přes jejich relativní důležitost jsou kritéria i navazující zákonitosti u zdrojů hudebního zvuku a přenosového řetězce málo poznaná a obecně známá.

Kvalita

Kvalita zvuku označuje jak užší soud nad zvukovou adekvátností či jakostí tak i širší kvalitativní prožívání či posuzování zvuku (Rossing a Moore 2002, Fritz et al. 2012). Zvukovou kvalitu tak mohou představovat jednotlivé kvalitativní prožitky při poslechu zvuku i aspekty jeho posuzování, a i další abstraktní kritéria navázaná na různá přesvědčení (Susini et al. 2011). U každé z kvalit je možné stanovit referenční rámce (pro některou kvalitu je to účel, ale také jimi mohou být i biologická danost či další okolnosti při poslechu) (*Ibid.*). Uvedené oblasti sice popisují odlišné okolnosti kvality a poslechu, ale přesto stále výrazně souvisejí s barvou zvuku a jejím charakterem. Barva je jedním z hlavních aspektů posuzování hudebních nástrojů či záznamu a reprodukce zvuku (Rossing a Moore 2002, Fritz et al. 2012).

Obecně pojatá kvalita zvuku může mít složku technickou (technické hodnocení), smyslovou (vnímání a prožívání) a estetickou (individuální či kulturní). U hudebního zvuku se přidává ještě složka umělecká. Mezi těmito složkami a dalšími širšími situačními (přání a očekávání) či osobními okolnostmi (nálada a postoje) mohou vznikat mnohočetná propojení, která jsou příčinou osobních odlišností. Z obsahového hlediska lze u kvality rozlišit afektivní (příjemnost) i evaluační složku (spokojenost), které jsou obě zastoupené konceptem preference. Zvuky mají základní subjektivní afektivní kvalitu¹⁹. Charakter zvuku a jeho barva představují *valenci* (termín označující nejen afektivní reakci, ale také možnosti zvuku tuto reakci způsobit) či *potenciál*, jež jsou podkladem pro *estetický tón* (Hailstone et al. 2009), a s kvalitou je tak lze spojit i přímo, na základě jejich subjektivního významu [například jako možnosti zvuku kvalitativně působit] (Letowski 1992). Percepční smyslová složka kvality je

¹⁹ Např. *příjemnost - nepříjemnost*

mezi posluchači poměrně stabilní a i ostatní složky lze při zohlednění souvisejících okolností popsat (například při rozlišení odlišných modelů jednotlivých osob či jejich skupin). Pro jednoduché okolnosti lze užít koncept preference a lineární model promítnutí percepčního fenoménu do jeho hodnocení (Kaplanis et al. 2014) a takto byla popsána i závislost s různými objektivními veličinami²⁰ (Melka 2005).

Estetika

Percepce hudebního zvuku je spojena s receptivní či hedonickou formou prožívání (někteří autoři označují hudební poslech za svébytný druh poslechu) (Carron et al. 2017). Širší náležitosti percepce tak lze popsat prostřednictvím sensorického či estetického prožitku²¹. Počáteční úloha smyslového počítku je označována jako podklad dalších procesů recepce a prožitku uměleckého díla napříč studiemi (Pelowski et al. 2016) a kvalitativní vlastnosti zvuku i znalost jejich zákonitostí a působení se postupně podílejí na jeho tvorbě či interpretaci (Tinio 2013). Jednotlivé kvalitativní aspekty zvuku mají v estetickém vyznění zásadní úlohu i jako zvukové nuance (Atsushi a Martens 2005).

Popis aspektů

Slovo *aspekt* je v této práci užíváno jako pojem s nejvyšší úrovní abstrakce a odpovídá rozšířenému významu širšího znaku či hlediska (může představovat konkrétní ráz ale i abstraktní koncept posouzení zvuku). Atribut je pak chápán jako určitá charakteristická vlastnost či znak (například zvuku nebo zvukem vyvolaného vjemu) představující významovou jednotku, jíž mohou posluchači posoudit na posuzovací škále (Melka 2005).

Deskriptor pak představuje pojmenování určitého atributu použitého k popisu určitého aspektu (může například ukazovat jeho míru). Jednotlivé atributy mohou být vzájemně zástupné a tvořit složitá uspořádání či se dále spojovat do složených atributů²². Ten utváří několik sloučených znaků (zejména kognitivně či okolnostmi na zdroji či při jeho poslechu) z nichž některé mohou být značně specifické (pro určitou oblast zvuků i okolností) (Otčenášek 2019, Siedenburg et al. 2016). Množství těchto základních a vynořujících se vlastností není dosud plně popsáno. Jejich povahu lze ovšem upřesňovat a rozlišit jejich obecné a specifické souvislosti při použití vhodných statistických metod.

Hudební aspekt

²⁰ Například pro *drsnost* a *ostrost*

²¹ Rovněž i zkušenost (angl. *experience*)

²² Taktéž vynořující se atribut

Mnoho aspektů zvuku a sluchových vjemů, které jsou předmětem této práce, přímo přesahuje do oblasti hodnocení a tvorby hudebních zvuků a má uplatnění při hodnocení v tvorbě hudebních zvuků, zvukovém designu a dalších činnostech, při nichž dochází k mediaci zvukového děje a je třeba posoudit záměr či obsah z univerzálního či odborného hlediska (Amandine a Gustavino 2013, Susini a Lemaitre 2011). Tyto aspekty jsou pak také důležité v oblasti dokumentárního hudebního zvuku, u něhož se zužují možnosti pro volnou kreativitu (například pokud je cílem při sejmutí zvuku zprostředkovat subjektivně úplný vjem).

Zdroje zvuku

Zdrojem hudebního zvuku mohou být hudební nástroje i zpěvní hlas. Jejich zvuk se od předmětů s nehudebním určením odlišuje hudebním či estetickým účelem a záměrným soustředěním akustické energie do rezonancí a jejich buzení. Jednotlivé rezonanční systémy tvoří propojenou akustickou soustavu mnoha různých rezonančních prvků a budící síly (Dubnov a Rodet 2003, Rossing 1999). Jejich vzájemná interakce²³ se projevuje různým druhem časové proměnnosti a obdobně se pak odlišuje i vyzářený zvuk (*Ibid.*). U nástrojů interakce souvisí s konkrétní stavbou a může se značně lišit v závislosti na druhu nástroje (například u dechových či smyčcových nástrojů) (Castellengo 1999). K jednotlivým jevům může docházet různými způsoby na každé z komponent hudebního nástroje (rezonátor i oscilátor) či při jeho šíření k posluchači.

Při výrobě hudebních nástrojů je užíváno hodnocení zvuku poslechem v konstrukčním procesu i při přípravě nástroje do hratelého stavu a jeho intonaci. Ta představuje proces finálního dotvoření zvuku²⁴ a je součástí konečné fáze výroby mnoha hudebních nástrojů (akordeon či klavír). Podstatnou úlohu má u varhan při jejich dokončování a zde představuje značně odbornou interpretační činnost (Monette 1992). Studie barvy zvuku hudebních nástrojů přitom tvoří menšinu celkového úhrnu těchto studií (Carron et al. 2017). Následující sekce představují přehled poznatků souvisejících s tématem této práce.

Zvuk houslí

Interpreti i posluchači mají schopnost rozlišovat mnoho charakteristik svého nástroje (Fritz et al. 2007). U houslí jsou základní kvalitativní parametry spojené s tvarováním vrchní desky a korpusu. Rezanční deska je v důsledku průběžného pulzního buzení značně tlumena (oproti drnkacím nástrojům) a obě rezonanční desky jsou pevně spojené. Jejich interakce spolu s ostatními částmi rezonančního systému ovlivňuje amplitudové i časové

²³ Například interference sousedících rezonančních modů

²⁴ Zvuku a jeho kvalit

charakteristiky zvuku. Jejich tloušťka a klenutí či provedení basového trámce patří mezi základní intonační parametry (Gonzalez et al. 2021). Intonace houslí se také provádí uzpůsobením kobyly a polohou duše. Primární zdroj energie zvuku u houslí je spojen s rezonancemi korpusu. Housle mají nižší stovky rezonancí (100-200). Ty mají rozdílné tlumení a vyzařovací charakteristiku. Sousedící rezonance se mohou polohou i frekvenčně překrývat [zejména u tónů nad 1kHz]. Na těchto frekvencích se s frekvencí mění vyzařovací charakteristika i amplituda a relativní fáze harmonických složek vyzářeného zvuku (ta byla dána do souvislosti s *leskem* či *brilancí* zvuku [Wienreich 1996]). Obdobně byla také popsána periodická proměnlivost fáze harmonických u violoncella a tento jev byl dán do souvislosti s nelineární charakteristikou buzení a tělem s mnoha blízkými sousedícími rezonancemi (Dubnov a Rodet 2003). Tyto projevy také bylo možné rozlišit od těch u dechového hudebního nástroje (flétna). Srovnáním přenosových funkcí bylo identifikováno několik rezonančních oblastí indikujících *bohatost*, *jasnost* či *nasalitu* (jasnost souvisela s tvarem a podobou otvorů f). Jasnost byla též spojena s vyzařováním zvuku z oblasti rezonancí kobyly. S kvalitou zvuku také souvisejí děje na struně (Otčenášek a Otčenášek 2015), jež se projevují narušením stabilního časového průběhu buzení či naopak harmonicitou s násobkem periodicity základního tónu, a mění se na základě přítlaku či polohy smyčce. Jejich projevy byly popsány jako meziharmonicita a šum (do těla nástroje se přenáší s nucenou periodou kmitání struny) a byla prokázána souvislost nepravidelných dějů na struně s křaplavou formou drsnosti (ale lze předpokládat jejich spojitost i se *šustivostí* či s označením zvuku jako *žíně*). Pulzní buzení smyčce (střídání stavu unášení s přeskokem) se působením jednotlivých prvků rozkládá nepravidelně v čase. Z hlediska této práce je podstatné kolísání fáze u vyšších harmonických, což může také souviset s jejich časovou a amplitudovou oscilací na nástrojích s mnohočetnými úzkými sousedícími rezonancemi (Dubnov a Rodet 2002). Nasazení tónu je u houslí (oproti varhanní píšťale) méně výrazné a je podstatné pouze pro určité specializované režimy hry (Guettler 2004).

Zvuk varhan

Zvuk varhan vzniká kombinací znění mnoha píšťal různých rejstříků u nichž je barva zvuku určujícím principem. Celkový zvuk vzniká nejen kombinací zvuku jednotlivých píšťal, ale i jejich interakcí v prostoru. Značná část barevné proměnlivosti je zapříčiněna tvarem a nastavením úst, tvarem či zakončením píšťal či jejich materiálem. Publikace o zvuku varhan také ukazují různá řešení píšťal doplněna popisem zvukového charakteru (ten je součástí nástroje a interpretem je pouze využit) (Klinda 2000). Hodnocení zvuku píšťal poslechem je užíváno k posouzení konstrukčních zásahů a řemeslných úkonů, jejichž cílem je dosáhnout optimálního zvuku nástroje (*Ibid.*) Intonér při procesu intonace posuzuje řadu subjektivních

parametrů u znění tónu i jeho počátku²⁵ a upravuje konstrukční parametry píšťaly (například tvar výřezu či šířku průlinky). Proces intonace probíhá postupně jak v místě určení, tak i na intonační lavici v místě výroby. Intonačního procesu se při závěrečné fázi může účastnit i několik osob a je pro něj zásadní účinná slovní komunikace. Během procesu intonace se srovnává a přizpůsobuje zvuk píšťal uvnitř rejstříků i mezi nimi a intonace předurčuje jejich umělecký a zvukový charakter²⁶ (Otčenášek et al. 2018)] a utváří jedinečnou zvukovou identitu daného nástroje. Intonace odráží regionální a dobové hudební požadavky a řemeslné dovednosti a přispívá k unikátnímu zvukovému charakteru jednotlivých varhan. Od houslového tónu se zvuk varhanních píšťal z mnoha hledisek odlišuje. Jednou z odlišností je také výrazné nasazení tónu. To může mít značnou časovou prodlevu nástupu jednotlivých složek [opožděné dosažení srovnatelné energie] i energií s časem se měnících různých šumových složek (Castellengo 1999).

Individuální výroba hudebních nástrojů je charakteristická vysokým podílem znalostí a postupů. Při rekonstrukci varhan je nejednou třeba nahradit jednotlivé poškozené píšťaly. Mnoho historických nástrojů může mít zachován historicky hodnotný intonační záměr, který může být jejich památkově hodnotnou součástí. Tato disertační práce přispívá k rozvoji přesnějších subjektivních metod kvantifikace zvukového charakteru (což patří k jednomu z jejich aplikovaných cílů). Sběr slovních popisů představuje prostředek zachycení znalostí a na ně navázaných aspektů kulturního dědictví. Poznání širších zvukových a intonačních souvislostí je předpokladem pro rozvoj možnosti dopočtu a rekonstrukci parametrů pro chybějící či poškozené píšťaly (Mlčoch 2003) a má tak obecný význam pro rozvoj přesnějších restaurátorských metod.

Zpěv

Barva zvuku i poslechové hodnocení je taktéž užíváno pro hodnocení zpěvu (zejména při jeho výuce či interpretaci) a může jej provázet i formou kompozičních požadavků (například na sílu, světlost či jasnost [Frič et al 2019]). Sestavení či ověření univerzální hodnotící škály pro zpěvní hlas představuje aktuální problém. Studie Oates et al. (2006) například představuje kategorie hodnocení přiměřenost vibrata, intonační přesnost, zvonivost, vyrovnanost zvuku a napětí. Předkládaná práce tyto kategorie dále ověřuje pro okolnosti, při nichž má zpěv významnou časovou složku.

Časové děje

²⁵ nasazení i tón se poslouchají odděleně

²⁶ provedené změny se projevují změnou hlasitosti a barvy zvuku

Časová složka je jedním z hlavních znaků subjektivních smyslových dějů (vymezuje strukturu a rozsah) (Melka 2005). Objektivně lze u každého zvuku rozlišit fázi nakmitání, trvání a dokmitávání. Protějšek těchto jevů v subjektivní rovině má povahu zvukového počátku, znění tónu a doznívání [tyto jsou posluchači schopní posuzovat odděleně]. U náběhu i dokmitávání se děje odehrávají přechodně a se značnou proměnou, zatímco u znění a zakmitaného stavu je jejich proměnlivost menší (charakter je kvazistacionární). Subjektivní vnímání počátečního tranzientního děje do znění tónu přechází pozvolna a přesahuje objektivní protějšek jeho dobou trvání (Otcenasek et al. 2003). Jednoznačné dělení na zvukový počátek a znění tónu, či na jejich objektivní protějšky je tak spíše umělé a tranzientní děje lze považovat za součást obou fenoménů.

Časové děje se mohou odehrávat v různém časovém měřítku. Širší měřítko sledu tónů či různé ornamentace s nízkou frekvencí [do ~15 Hz] lze považovat za děje s časově širší strukturou. Paralelně lze rozeznat ještě časové děje s drobnou strukturou, které představují různé jemné fluktuace (Joris et al. 2004) a projevují se jako zabarvení zvuku. Projevem těchto změn mohou být různé vlastnosti barvy zvuku [převážně drsnost, ale i další, například jasnost (Alluri a Toiviainen 2010)]. Četnost, se kterou se tyto atributy vyskytují v předchozích studiích, poukazuje na jejich subjektivní důležitost (Rioux 2001, Štěpánek 2006).

Fáze zvuku

Časové zpoždění průběhu jednotlivých frekvenčních komponent zvukového signálu lze popsat hodnotou časového zpoždění [s] proti společné referenci (jako *zpoždění skupiny*) či hodnotou fáze dané komponenty (jako *zpoždění fáze*) [°] (Dubnov a Rodet 2003). Časová hodnota zpoždění na stejné fázi s frekvencí postupně klesá na podprahové hodnoty slyšení a je tak obecně předpokládána nízká citlivost na fázové zpoždění. Schopnost sluchem zaznamenat posun relativní fáze sousedících frekvenčních složek zvuku ale opakovaně prokázalo několik studií (Mathes a Miller 1947, Patterson 1987, Banno et al. 2002). Studie také naznačují souvislost těchto posunů se sluchovou drsností (Pressnitzer a McAdams 1999) a hlubšími časovými aspekty mechanismů percepce. U modelů lidského sluchu například došlo ke zlepšení predikční schopnosti po zohlednění fáze signálu (Kolrausch a kol. 2005, Vencovský a Rund 2017). U zpoždění tří-tónových signálů zmiňují percepční účinek jako změnu *drsnoti* či *hladkosti* a u modulovaného tónu či obdobnou změnu *hrubosti* či *drsnoti* (Mathes a Miller 1947)²⁷. Časové fázové děje též mají aplikovanou rovinu a jsou také předmětem diskuzí v oblasti reprodukce zvuku či prostorové akustiky, kde ovlivňují kvalitu elektroakustického řetězce či místnosti.

²⁷ Pouze zmínka autorů

Popis zvuku

Sémantickým konstruktem (zejména vhodně zvoleným) lze u zvuku popsat se značnou přesností jeho *identitu*. Slovní popis lze užít jako prostředek k poznání jeho charakteru ale zprostředkovaně též i k poznání samotných souvisejících jevů (včetně těch percepčních). I přes omezení daná jazykovou slovní zásobou jedince (Susini et al. 1999) a tím, že rozlišovací schopnost jazyka²⁸ nedosahuje rozlišovací schopnosti u sluchu (Bodo 2019) je slovní popis základním nástrojem a možností sdílení vnitřních obsahů a je užíván i celou řadou dalších oborů zaměřených na informace ze smyslu (například enologie či šlechtitelství ovoce [Sharma et al. 2020, Predieri et al. 2006]).

Určení jevu pojmem či popisem tvoří základní prvek škálovacích technik (například u metod *odhadu magnitudy* či *sémantického diferenciálu*) (Melka 2005). U těchto technik je užíváno posouzení míry vlastnosti na hodnotící škále, ovšem jako základní jednotku míry určitého parametru lze užít i samotný akt slovního popisu [při tomto přístupu je četnost slov užitá jako hodnota odpověďové proměnné]. Slovní popis je stabilní a lze odhalit jeho hlubší povahu pomocí metod statistické analýzy.

Interpretace slovních dat postupně předpokládá rozkrytí jejich *denotativních* i *konotativních* významů [předpokládá se postupné odhalení obou]. U slovního popisu zvuku lze *denotativní* význam přiřadit ke sluchovému počítku a k jeho struktuře a stabilitě. *Konotativní* význam pak představuje individuální osobní odlišnosti od těchto náležitostí. Shodu denotativních významů uživatelů jazyka lze ověřit srovnáním jazykového obsahu s nejazykovým (Osgood 1952)

Jazyk

Jazyk je základní *nositel* a *zprostředkovatel* významu (Melka 2005) a referenční rámec pro slovní hodnocení (používané deskriptory atributů mají asociaci s konkrétními vjemy²⁹) (Wallmark a Kendall 2018). Subjekty používají percepční reprezentaci k tvorbě té sémantické a ta je následně součástí sdělení. Při slovním popisu zvuku tak nad četnostmi vzniká latentní struktura (psychologická i sémantická). Tu lze studovat metodami slovní faktorové analýzy (*Ibid.*). Reprezentace zvuku (či i představa o ní) je srovnávána s interním slovníkem pouze na základě rozpoznání rysů bez nutnosti předchozího určení významu zvuku (Schon 2010).

Slovníky

²⁸ Sémiotická dispozice

²⁹ Sémantická konceptualizace

Percepce probíhá nezávisle na jazykovém aparátu. Reprezentace zvuku ale mají svou sémantickou stránku. Lze je při poslechu zvuku (i za jeho nepřítomnosti) slovně popsat prostřednictvím asociovaných popisných slov (charakteristik či kvalit) a mnoha jazykových strategií [od technického popisu po metaforu] (Bodo 2019). Obdobně lze slovně vyjádřit i další smyslové prožitky či vědomé obsahy (Regan 2009). Tato schopnost souvisí s účelem jazyka a jeho popisnou funkcí (*Ibid.*). Používaná popisná slova jsou součástí místních či odborných slovníků uživatelů a zároveň nestandardizovanou slovní zásobou umožňující komunikaci obdobných skupin (Lawless a Civile 2013). Tato zásoba často reflektuje místní či oborové potřeby použití uživateli. Určitá slova mají povahu zastřešujících či druhotných charakteristik, ale mohou mít nerozlišenou či arbitrární povahu. Jiná jsou naopak konkrétní a smysluplná, ale mohou být nevhodná pro popis celých reprezentací. Slovník popisných slov pro barvu zvuku u hudebních nástrojů představil například Štěpánek a Moravec³⁰ (2000), pro popis zvuku užitných produktů (Altinsoy 2013) či zvukových procesorů a efektů (Stables et al. 2016) a pro obecné zvukové okolnosti také Lindsey a Huron (2020).

Percepční prostor

Mezi zvuky a jejich vlastnostmi existují různé formy vztahů (například podobnostní či protichůdné) a posluchači rozeznávají zákonitosti u zvuků na základě rozdílů mezi nimi³¹ (Susini et al. 1999). Systematické rozdílnosti mezi studovanými objekty stanovené na základě stabilních hledisek vytváří jejich skrytou³² strukturu. K jejímu zviditelnění a studiu těchto vztahů se často používají mnohadimenzionální prostory a jejich geometrická zobrazení (například prostor vytvořený faktorovou analýzou vhodných veličin získaných analýzou jejich signálu). Obdobně je možné využít geometrické uspořádání nepodobností³³ u atributů, které popisují rozdíly mezi zvuky, do percepčního prostoru (zvuky jsou v něm objekty a reprezentují studované vlastnosti) (*Ibid.*). Geometrická struktura pro zvuky stejné délky, výšky a hlasitosti je percepčním prostorem barvy zvuku.

Percepční prostory jsou také jednou z možností upřesnění společných arbitrárních slovních deskriptorů a mohou objasnit jejich vztahy nezávisle na zkušenosti či jazyku. To je možné jednak propojením jejich hodnot s příčinou ale i interpretací percepčního prostoru posluchačů (zejména pak interpretací srovnáním či porovnáním prostorů získaných od více posluchačů nebo za různých zvukových okolností).

³⁰ Studie v českém prostředí

³¹ Rozdíly jsou projevem vztahů

³² Latentní

³³ Či nepřijemnosti, jak bylo ověřeno studií autora (Otčenášek 2018)

1.2 Sluch

Sluchový aparát

Sluchové ústrojí tvoří akustickou, mechanickou a hydrodynamickou bází pro transformaci zvuku na sluchové informace (jednotlivé části zhruba odpovídají vnějšímu, střednímu a následně vnitřnímu uchu) (Rugero 1992). Jejich amplitudová i časová přenosová funkce se liší s frekvencí. To je spojeno s funkční proměnou podoby zvuku a slouží jako podklad o vlastnostech transformace (z hlediska této práce jde například o nárůst citlivosti mezi kritickými pásmy 12 a 18).

Převod akustického tlaku na prvotní nervovou informaci probíhá ve vnitřním uchu v Cortiho orgánu. Průhyb basilární membrány zde působí depolarizaci vnitřních vláskových buněk a doprovází jí uvolnění vzruchu na synaptickém rozhraní nervového vlákna. Vzruchový potenciál se poté šíří vlákny ve svazku vláken sluchového nervu do mozkového kmene či i dále [sluchová dráha]. Jednotlivá vlákna sluchového nervu se liší mírou citlivosti a klidové aktivity (Syka 1987).

Jednotlivé děje a mechanismy spojené se zpracováním informací na sluchové dráze lze u člověka pozorovat zejména nepřímo a obdobně i ověření modelů sluchu na lidské populaci je možné pouze druhotnými experimenty. Pozorování je tak omezené na různé povrchové a nepřímé metody. Vývoj a ověřování vhodných zvukových stimulů a postupů jejich prezentace posluchačům je stále aktuální výzkumnou otázkou.

Model lidského sluchu

Sluchové ústrojí je možné připodobnit k paralelnímu uspořádání frekvenčně selektivních filtrů, jež představují analogii interakce pružné basilární membrány s obklopující kapalinou a sekundárními zdroji tlaku v místě lokálního prohnutí membrány. Výsledek takovéto pásmové filtrace připomíná součet průběhů bioelektrického signálu ze série sousedních buněk určité části basilární membrány (Joris et al. 2004). Přesnost této analogie je ale omezená a rozvoj pokročilejších modelů sluchu a jejich validace představuje paralelní a aktuální výzkumnou oblast. Jejich přehled uvádí například Meddis et al. (2010). V této práci je analogie této pásmové filtrace také využita.

Kritická pásma

Basilární membrána má omezenou pružnost. Při buzení tónem o dvou rozdílných frekvencích nemůže dojít k nezávislému prohnutí na dvou polohově blízkých místech [obě

prohnutí se překrývají a dochází k společnému interferenčnímu působení obou tónů]. Membránu tak můžeme virtuálně podélně rozdělit na oblasti, ve kterých nemůže dojít k nezávislému prohnutí při společné přítomnosti dvou či více tónů [nezávislé prohnutí by tóny způsobovaly jen samostatně] (Zwicker a Fastl 1999). Virtuálním oblastem s určitou charakteristickou střední frekvencí [Hz] a o určité délce [mm] pak na základě tohoto rozdělení odpovídají kritická pásma o určitém frekvenční šířce [Hz] (*Ibid.*). Tónové složky zvuku budící oblast uvnitř každého pásma registrují vláskové buňky po celém jeho rozsahu, ale na membráně dochází k jejich interferenci a ke vzniku různých specifických fenoménů (například maskování). Šířka těchto pásem je relativně nezávislá na hladině akustického tlaku, ale narůstá s frekvencí (*Ibid.*). Šířka a střední frekvenci pásem relevantních z hlediska této práce je uvedena v Tabulce č. 1.

I když jsou kritická pásma definována na základě maskování, jejich příčina je fyziologická a představují tak dobře ověřený model chování sluchu. Pro tuto práci také představují teoretické východisko pro zvolený a ověřovaný postup (práce tím souběžně ověřuje i tuto koncepci a možnosti jejího užití).

Sluchová dráha

Sluchová dráha představuje neuronální část sluchového aparátu. Dráha má počátek na vnitřních vláskových buňkách v Cortiho orgánu umístěném v hlemýždi (kochlea) a postupně probíhá až do nejvyšších oblastí centrální nervové soustavy (aferentní dráha) (Eggermont et al. 2001). Tyto buňky sledují prohnutí určité oblasti na basilární membráně (jsou citlivé na jeho rychlost a míru). Jsou na ně mnohočetně napojena vlákna sluchového nervu. Informace sluchového nervu je přenášena do oblasti mozkového kmene, kde dochází k jejímu zpracování a rozpoznání základních sluchových rysů ve zvuku, jež jsou již na této úrovni (*inferior colliculus*) k dispozici.

Zvuková informace

Signál aferentních vláken již sám o sobě poskytuje mnoho indicií pro rozpoznání a detekci stavu či změn frekvence a modulace tónu či zvuku (Joris et al. 2004). Je nositelem informace o četnosti nervových vzruchů i o jejich místě původu (tato informace je pak různou měrou zachována i při dalším zpracování). Napojení každé vnitřní vláskové buňky na více vláken umožňuje pravděpodobnostní kódování intenzitní informace (určena spontánní aktivitou) a časové informace o struktuře zvuku (dána refrakční dobou) (Eggermont 2001). Toto souběžné uspořádání je podstatné pro přenos časové informace s periodicitou

přesahující refrakční prodlevu vláken (refrakční zotavování³⁴ má pravděpodobnostní povahu a trvá minimálně 1ms). V důsledku tohoto uspořádání vláskové buňky pravděpodobnostním způsobem sledují periodicitu kmitů a děje působící na výchylku membrány (výchylka i její místo jsou výslednicí proti sobě působících hydromechanických dějů v kapalině nad a pod membránou). Vlákna s vyšší citlivostí mají nižší práh a (reagují při malých akustických tlacích na prahu slyšení) a reagují vyšším počtem vzruchů oproti těm s nízkou citlivostí, ale také s větší časovou nahodilostí vzruchů (jejich vzruchy časově rozptýlené a nahodilejší). Nervová vlákna s vysokou citlivostí a spontánní aktivitou mají nižší dynamický rozsah. Se zvyšující se hlasitostí se pravděpodobnostní reakce saturuje (v četnosti vzruchů například přestává být patrná modulace amplitudy) (*Ibid.*).

Sluchová ústrojí u vyšších savců jsou si značně podobná v reakci na obdobné podněty. Poznání této části sluchu je převážně odvozeno ze zvířecích studií a výzkumů šíření a převodu biologických elektrických signálů na sluchovém nervu (akčního potenciálu).

Časová informace

Časování vzruchů na vláknech sluchového nervu má tendenci sledovat časovou informaci zvuku prostřednictvím časového kódování³⁵ (kódována je fáze tónu i obálka jeho modulace). Příčinou jevu je necitlivost vláskových buněk na zápornou část průhybu a navazující binární odezva neuronů jednotlivých vláken (Joris et al. 2004). U vláken a tónů s nižší charakteristickou frekvencí (do 1kHz) je sledování souběžné s jinými vlákny a přímo navázané na průhyb a u buněk a tónů s vyšší charakteristickou frekvencí (1-3 kHz) je omezeno refrakční dobou a odehrává se pravděpodobnostním způsobem. Informace kódovaná tímto jevem (vzorce vzruchů tvořící synchronizační otisk) je pak zpracováván odděleně od informace amplitudové či frekvenční odlišným druhem neuronů i jejich sítí (například formou inhibice) (Eggermont 2001).

Kochleární jádro

Kochleární jádro je centrálním bodem zakončení vláken sluchového nervu v mozkovém kmeni i místem základního předzpracování signálu pro jeho rozpoznávání na následujících stupních. Jednotlivé oblasti jádra obsahují několik funkčních oddílů s organizovanými sítěmi různých, funkčně odlišných neuronů (Syka 1987). Jednotlivé neurony se odlišují svou odpovědí na budící signál; některé převážně kopírují informaci na sluchovém nervu (pseudoprimární buňky) a jiné mají složitější odpovědi a lze u nich předpokládat podíl

³⁴ Prodleva schopnosti vlákna přenést další vzruch

³⁵ Angl. *Phase a envelope locking*

na rozpoznávání sluchových informací. Z hlediska zkoumaného problému je podstatná zejména činnost *chobotnicových* buněk a buněk se *zvlněnou* reakcí³⁶. Chobotnicové buňky odpovídají na signál periodickou pulzací která kóduje periodicitu či časové struktury signálu. Buňky se zvlněnou reakcí reagují převážně na začátek tónu či mají stálou reakcí po dobu jeho trvání (s různou následnou odpovědí). Uvedené buňky předávají informaci do centra *inferior colliculus*, které hraje centrální úlohu na spojnici sestupných a vzestupných drah a představuje centrální integrační místo pro informace z nižších i vyšších úrovní sluchové dráhy (včetně sluchové kůry) (Eggermont 2001). Toto centrum pak obsahuje i další sadu neuronů s odlišnými bioelektrickými funkcemi.

Přední kochleární jádro

K rozpoznávání a zpřesňování časové informace zvuku, která je přítomná na pravděpodobnostní úrovni ve vzorcích vzruchů neuronů sluchového nervu dochází ve *přední*³⁷ oblasti kochleárního jádra (Eggermont 2001). Přední část obsahuje sérii chobotnicových a zvlněných buněk, u nichž se předpokládá funkční úloha při upřesňování a následném rozpoznávání časové informace (zlepšování signálu a rozpoznávání synchronicity), a také další hvězdčovitě buňky s úzkou frekvenční selektivitou. U nich se předpokládá úloha při rozpoznávání dění uvnitř daného frekvenčního pásma. Poznatky o těchto buňkách jsou hypotetické a je žádoucí jejich další upřesnění.

Další centra

Axony na výstupu nervových buněk směřují z kochleárního jádra do dalších oddílů a center na sluchové dráze. Je to zejména *nucleus olivaris superior*, kde se setkávají dráhy z obou uší (buňky jsou zde funkčně organizovány k rozpoznání časového rozdílu obou signálů). Počet buněk se složitější reakcí postupně na sluchové dráze narůstají. Na úrovni *inferior colliculus* jsou již převážně zpracovávány sekundární sluchové informace (převažují zde buňky se složitější reakcí bez přímé návaznosti na periodicitu původního podnětu). Toto reflektuje i uspořádání neuronů po blocích pro celé pásmo frekvencí. Existují různé zpětnovazební korektivní adaptivní mechanismy se zpětnou vazbou až na úroveň vnějších vláskových buněk. Sluchový systém takto může například kompenzovat charakteristické vlivy místnosti či potlačit efekt maskujícího tónu.

Sluch a čas

³⁶ Angl. *Chopper cell*

³⁷ Lat. *Ventrální*

Pravděpodobnostní charakteristika počtů nervových vzruchů zhruba sleduje průhyb basilární membrány i jeho časovou proměnnost a tak vytváří nad sledem vzruchů strukturu reprezentující časovou strukturu zvuku. Citlivost sluchu na časovou změnu je značná a souvisí s optimalizacemi pro detekci a kódování časové informace na jednotlivých patrech sluchové dráhy. Specializované buňky pro přenos a zpracování časových informací se vyskytují na více místech sluchové dráhy a nejsou zaměřeny pouze na zpracování binaurálních rozdílů. Přenos časové informace však předpokládá evolučně složitou a z biologického hlediska nákladnou optimalizaci buněčných membrán pro rychlou souslednost a nízkou latenci výbojů a kompenzaci fyziologických hranic jejich komponent (hranicí jsou například omezené možnosti pro přenos frekvencí přesahující 1kHz) (Oertel et al. 2000). S přechodem na vyšší úrovně sluchového systému se však postupně snižuje zastoupení původní časové informace a postupně jí nahrazuje její reprezentace (Joris et al. 2004).

Časová informace

Část poznatků studií o rozpoznání časové informace se týká schopnosti lokalizace a její směrové přesnosti. Ta souvisí s rozpoznáním časového rozdílu mezi signálem jednoho a druhého ucha a je rozpoznávána sítěmi koincidenčních neuronů v části *olivary superior* (Møler 2000). Sítě těchto neuronů jsou citlivé na různé odlišné hodnoty rozdílu mezi jedním a druhým uchem a reagují na časovou změnu několika μs . Tato doba zřejmě představuje horní mez časového rozlišení sluchové informace i sluchu³⁸. Úloha těchto sítí pro rozpoznání časových aspektů mimo lokalizaci ovšem není dosud jasná³⁹. Tuto úlohu lze naopak předpokládat u sítí neuronů kochleárního jádra, u nichž byla ověřena citlivost na časovou strukturu signálu a její změnu (frekvence i amplitudy) i časovou strukturu stabilního tónu (časové vzorce stabilního signálu). Tyto sítě mají úzkou a variabilní frekvenční selektivitu (reagují na určitý časový vzorec zvuku) a její horní hranice u zkoumaných živočichů odpovídá horní hranici pro vnímání efektů zkoumaných v této práci (100 - 300 Hz). U živočichů také jsou i další sítě reagující na délku pulzů (s délkou ms).

Jitter

Jednotlivá vlákna sluchového nervu se liší citlivostí a následkem tohoto i svou klidovou samovolnou elektrickou aktivitou. Pravděpodobnost výskytu vzruchu souvisí s úrovní výchylky na kladné části signálu⁴⁰ a více vláken z jedné a obou sousedících buněk tak může pravděpodobnostně společně popsat určitou shodnou fázi mechanického prohnutí na

³⁸ Z akustického hlediska se jedná o značnou přesnost

³⁹ Lze si jí ale představit a bude předmětem dalšího výzkumu

⁴⁰ Pokud je již dostatečná na jeho vyvolání

dané charakteristické frekvenci. Časová přesnost této pravděpodobnostní funkce souvisí se samovolnou aktivitou i saturací dané buňky a mění se s hlasitostí (dalším zdrojem nepřesnosti jsou i nestálost prahů a refrakční doby buněk řetězce). Jednotlivá vlákna sluchového nervu jsou zakončena na buňkách kochleárního jádra, u nichž se předpokládá úloha při integraci této pravděpodobnostní funkce, ale zřejmě i kompenzace odchylek od periodicity⁴¹ v časové struktuře signálu⁴². Této jejich funkci odpovídá i pozorované zlepšení fázové synchronicity (časová přesnost reakce na počátek přechodného signálu těchto neuronů přesahuje pozorovanou přesnost na sluchovém nervu) (Møler et al. 1986). Se zvyšující se hlasitostí se zvyšuje míra časové synchronicity na vláknech sluchového nervu (Joris et al. 2004).

Jemná struktura

Skupinová četnost vzduchů na sluchovém nervu je spojená s fenoménem časového kódování pravděpodobnostně odpovídá určitým časovým rysům zvuku filtrovaného bazilární membránou (případně časovému průběhu zvuku na odpovídajícím rozsahu frekvencí). Její podoba na vláknech sluchového nervu se ve studiích označuje jako časově *jemná struktura*⁴³. Může být projevem mnoha časových charakteristik objektivního zvuku (například modulací či záznějů) a označení se tak přeneseně užívá i pro popis těchto objektivních jevů (Joris et al. 2004). Časové kódování na sluchovém nervu tvoří součást jejího zpracování a navazujícího rozpoznání specializovanými neurony (Eggermont 2001). Na její přítomnost reagují různé sítě neuronů (na proměnnost jinak než na její stabilitu) a jednotlivě se odlišují na základě parametrů přenosových funkcí (Joris et al. 2004).

Detekce modulace

Časová přenosová funkce sluchového aparátu pro detekci obálkových a modulačních změn byla přirovnána k pásmové propustí napodobující polohovou filtraci na bazilární membráně a frekvenční selektivitu komponent sluchového aparátu⁴⁴ (Joris et al. 2004). Předpokládají se taktéž různé mechanismy detekce modulací mezi jednotlivými frekvenčními pásmy (demonstrováné například fenoménem mezipásmové interakce modulací a společného maskování⁴⁵). Tyto mechanismy však nejsou úplně popsány a nejsou známy jejich bližší parametry, včetně jejich frekvenční šířky (Joris et al. 2004). Informace o jemných

⁴¹ Angl. *Jitter*

⁴² Jejich časová citlivost přesahuje 1 ms (Møler et al 1969)

⁴³ Angl. *Temporal fine structure*

⁴⁴ Angl. *Envelope detector*

⁴⁵ Angl. *Comodulation masking release a modulation detection interference*

časových změnách z neuronálního kódu je interpretována na vědomé i nevědomé úrovni a má svou subjektivní reprezentaci (Eggemont 2001).

Drsnost a sluch

Psychoakustická funkce prominence modulací má maximum na 75 Hz a nepřesahuje 150 Hz. Uvedená funkce zejména odpovídá psychoakustické funkci atributu drsnost. Její registrace by mohla souviset se sérií rychlých a opakujících se přechodných dějů (Arnal et al. 2019) u neuronů označujících počátek⁴⁶ stimulace. Periodickou synchronní aktivitu s obálkou modulovaného zvuku (který lze považovat za drsný) a reakce tohoto neuronu na záněže vznikající v důsledku interference harmonických popisuje například Delgutte et al. (1999).

Časové detektory

Chobotnicové buňky v předním kochleárním jádře jsou specializované buňky se schopností reagovat na časové rysy zvukových podnětů. Chobotnicové buňky detekují koincidence výbojů napříč vlákny sluchového nervu (k překročení prahu pro výboj je nutná souběžná aktivita několika vláken sluchového nervu). Jedna buňka se napojuje na několik vláken sluchového nervu, ze kterého vzorkuje časovou aktivitu a to jak na jedné charakteristické frekvenci, tak i napříč vlákny s různými frekvencemi. K překročení prahu pro výboj se u této buňky předpokládá souběžná aktivita 1/3 vláken v časovém rozmezí 1ms. Dochází tak průměrování informace z více vláken a následné nahrazení sérií ostrých pulzů, které tuto periodicitu sledují. Tyto buňky mají velmi rychlé časové konstanty. Na periodický signál buňka reaguje sérií výbojů, které kopírují časovou informaci signálu. Tyto buňky projektují do předního jádra *laterálního leminisku* u kterého se předpokládá funkční zaměření na zpracování časové struktury (buňky zde jsou uzpůsobeny k zachování a zpracování časové informace).

Binaurální sluch

Binaurální charakter sluchu se u zvuků přirozených zdrojů podstatnou měrou podílí na výsledném vjemu (Kulkarni et al. 1999). Tvar vnějšího ucha směrově mění přenosovou funkci a amplitudovou a fázovou charakteristiku zvuku na každém uchu (v návaznosti na pozici ve zvukovém poli obklopujícího posluchače a změny slouží jako vodítka pro detekci polohy zdroje i charakteru prostoru) (Bernschutz et al. 2013). Nedostatky v reprodukci fázové informace u binaurálního záznamu mají zanedbatelný vliv na lokalizaci, ale lze předpokládat

⁴⁶ Angl. *Onset a Sustained*

vliv na barvu zvuku (Kulkarni et al. 1999). S dozvukovým ovlivněním charakteru zvuku přicházejícího na uši po odrazu zvuku v místnosti může například souviset i změna barevných vlastností *měkký tvrdý*. Časové detekce při binaurálním přesahuje problematiku této práce. Povaha binaurálního sluchu je ovšem časová a zkoumané závislosti v této práci mohou mít přesah do oblasti binaurálního sluchu i akustiky prostorů.

Dimenze barvy zvuku

Barva je mnohorozměrný atribut sluchového vnímání. Dosud plně neobjasněné množství faktorů sluchu má stabilní povahu a lze je považovat za stálé subjektivní či psychické dimenze. Jednotlivé dimenze představují základní faktory vnímání, jež jsou sdílené mezi posluchači (McAdams a Giordano 2012). Nejvýraznější dimenze barvy zvuku je popisována jako *ostrost* a *tupost* (Pratt a Doak 1976) a další obdobná dimenze je *úzkost*. Ostrost odpovídá frekvenčně nerovnoměrnému rozložení energie a *úzkost* odpovídá soustředění energie v úzkém pásmu frekvencí (spojitost objektivního parametru s určitou dimenzí je častá ale nemusí být jednoznačná). Prostor představuje rámeček pro atributy, které jím procházejí. Některé vlastnosti prochází jen napříč určitou částí prostoru a jiné jsou univerzální (případně dokonce dimenzi odpovídají či jí popisují [například kovovost a napjatost u ostrosti]). Pro příbuzné zvuky či pro určitý rozsah frekvencí lze taktéž předpokládat u jednotlivých dimenzí značnou stálost⁴⁷ (Steele a Williams 2006).

Dimenze a poznání

Současné poznání barevné rozměrnosti je příliš obecné a u mnohých nevýrazných dimenzí jsou povaha i počet neznámá [dimenzionalita nepostihuje percepční diverzitu]. Poznání rozměrů prostoru je tak základním krokem k poznání kvalitativních atributů zvuku (včetně těch prostorových). Jazykové dimenze lze také popsat u slovní sémantiky. Tyto významové dimenze však nelze považovat analogické percepčním dimenzím u sluchu. Úplný počet dimenzí doposud není plně známý stejně jako jejich původ. Jejich poznání je omezeno omezením metody i neshodností škálování velkého množství zvuků (Caclin et al. 2006)

Drsnost a textura

⁴⁷ Angl. *Invariance*

Drsnost zvuku⁴⁸ představuje atribut zvuku popisující určitou specifickou formou časové proměnnosti a obvykle spojována s časovými změnami amplitudové obálky tónu (Fastl a Zwicker 1990, Vassilakis a Kendall 2010). Její subjektivní míra se mění s jejich frekvencí (s rozmezím od 20 do 200 Hz). Skutečná podoba těchto změn u přirozených zvuků se ovšem může podstatně lišit a subjektivně lze drsnost spojit s celou řadou reprezentací jako chvění či bzučení a vícerozměrná povaha drsnosti již byla potvrzena řadou předchozích studií (Otčenášek a Otčenášek 2015). U hudebních zvuků časová proměnnost představuje důsledek složitých fenoménů či záznejů harmonických i neharmonických a meziharmonických tónů (Tsai 2004) či časových průběhů obálky (Vencovský et al. 2017). Uvedené diverzity může odpovídat i podoba *nečistot* či *příměsí* zvuku (Tsai 2010) či *šumivosti* (Kreiman 1994).

Subjektivní i objektivní povaha podob drsnosti je dosud převážně neznámá (Tramo 2001, Tsai 2004). Určité formy drsnosti jsou příjemné a preferované a mohou být pro hudební zvuk a jeho valenci obohacující (Vassilakis 2005, Jensen 2010, Tsai 2004, Orthon a Belek 2010). Mimo drsnost existuje celá škála dalších podob, jež mají s drsností obdobnou příčinu, ale jejichž subjektivní charakter standardním představám o drsnosti neodpovídá. Menší aperiodické modulace lze popsat jako příměs či příspěvek k *charakteru* zvuku (Jensen 2004, Tsai 2010) ale také jako zašuměnost, jasnost či dyšnost (Jensen 2010) a může s nimi souviset i parametr *jasnost* (Ferrand 2002). Na základě nepravidelnosti časových změn pak lze rozlišit i jednu z podob drsnosti na houslích, jež se projevuje jako *křapavost* (Otčenášek a Otčenášek 2015). U lidského hlasu i u zvuku houslí jsou taktéž přítomné změny se stabilní povahou a meziharmonické frekvenční složky. Z hlediska této práce je také podstatná pozorovaná proměnnost drsnosti s tvarem modulací obálky či změn fáze složek tří-tónového stimulu (Pressnitzer a McAdams 1999, Vencovský 2014).

Drsnost a kvalita

Drsnost byla dána do souvislosti s nelibozvučností (Pressnitzer et al. 2000) a nepříjemností zvuku (Takao et al. 1993) ale též s jeho příjemností a bohatostí (například žestě [Geringer et al. 1999], housle [Fritz et al. 2012], pěvecké techniky [Namba et al. 1991]). Jednotlivé dílčí vlastnosti mohou mít odlišné souvislosti s preferencí zvuku (Tsai 2004). Relativní důležitost jednotlivých drsností pro posouzení zvukové kvality zdroje či zvuku může též být odlišná pro různé další vlastnosti.

Bzučivost

⁴⁸ V současném významu

Na tónech v první oktávě zvuku houslí je shodně užíván k popisu specifického charakteru zvuku atribut *bzučivost* (Štěpánek et al. 1999). Prominenci tohoto atributu taktéž potvrzují předešlé studie autora (Otcenasek a Otčenášek 2015). Zde se uvedený atribut vyskytovat protiběžně k atributu křapavost (na rozdíl od tohoto atributu nesouvisel s mírou periodicity časových změn zvuku). Chvění hranového tónu bylo zmíněno u varhanní píšťaly jako příčina *bzučivosti* (Klinda 2000). Ve studii Štěpánek a Moravec (2005) byl atribut *bzučivý* hodnocen jako vhodný pro hodnocení transientní části i znění tónu.

Tvrдост zvuku

Tvrдост zvuku figuruje jako podstatná vlastnost v mnoha studiích od reproduktorů a prostorovou akustiku až po hudební nástroje (Stepánek 2006). Poznatky o této vlastnosti jsou omezené i přesto, že jsou značně důležité (Pearce 2018). V souvislosti s tvrdostí byly zmíněny vlastnosti, které s ní mohou souviset, ale příčina nebyla dosud odhalena.

Tvrдост byla částečně zastoupena několika amplitudovými parametry⁴⁹ v regresním modelu Pearce (2018) avšak predikční schopnost tohoto modelu je poměrně nízká (r^2 0.7) atribut měkký byl třetím nejčtenějším ve studii Štěpánek a Moravec (2005) a byl respondenty hodnocen jako významný pro hodnocení hudebního zvuku, způsobu hry i uměleckého výrazu.

Objektivní zvuk

Určité charakteristiky signálu mohou sloužit jako ukazatele sluchového počítku a jejich vystižení na základě různých objektivních parametrů je dlouhodobým předmětem výzkumu. Na základě empirických modelů je možné predikovat míru několika standardizovaných subjektivních atributů (například u hlavních vlastností drsnosti i hlasitosti a ostrosti či světlosti). Ostrost zvuku například souvisí s kmitočtovou polohou koncentrace zvukové energie (přičemž význam této koncentrace narůstá od 16 kritického pásma) (Zwicker a Fastl 1999). U několika spektrálních parametrů [parametry založené na spektrální analýze] byla také ověřena souvislost s univerzálními percepčními dimenzemi. Jsou to zejména čas dosažení plné amplitudy, změny obálky, sklon harmonické obálky spektra a její časová nerovnoměrnost a proměnnost (McAdams 1999). Obdobně užívá spektrální analýzu mnoho dalších indikátorů. Predikce těchto indikátorů jsou validní jen pro omezené okolnosti a pro hudební zvuk nejsou dostatečně přesné. Časové schopnosti sluchu možnosti spektrální analýzy podstatně přesahují a časové vlastnosti tak převážně nejsou postižené (fázové spektrum je u hudebních zvuků s výraznou harmonicitou a proměnlivostí nepřesné)

⁴⁹ Jedním z parametrů byla amplituda signálových komponent 2-4 kHz a tento parametr může odpovídat jevům popisovaným v této práci (Czedik-Eysenberg et al. 2018)

(Oppenheim a Magasco 2013) Pro průzkum časové informace jsou také užívána modulační spektra ovšem jejich horní hranice je omezena na 43 Hz (Thoret et al. 2016). Povaha mnoha časových atributů či dimenzí tak dosud není pro řadu z nich uspokojivě popsána.

Prostor a čas

Odražený zvuk v difuzním poli má v běžných akustických prostředích pro barvu zvuku určující roli (Theile 1984) a zabarvení zvuku místností je obecně popisovaný fenomén (*Ibid.*) Při poslechu v běžném prostoru s pevnými odrazivými stěnami přichází zvukové odrazy postupně s časovým zpožděním (obvykle od 10 až 100 milisekund) oproti přímému zvuku. Poměr odraženého zvuku od začátku zvukové události narůstá statisticky předvídatelně a postupně (za podmínek blízkých difuznímu poli z různých směrů). Tento děj se odehrává v časové oblasti a lze u něj předpokládat percepční relevanci. Příchod jednotlivých odražených vln provázejí postupné časové posuny složek původního zvuku a zřejmě související změny jemné časové struktury. Tomu odpovídají i zjištění, že rané odrazy z blízkých odrazivých ploch mají výrazný vliv na barvu zvuku a představují konkrétní problém při reprodukci prostorových formátů (Kyriakis 1998) a že se fázové odchylky v individuálních směrových přenosových funkcích se projevují sníženou kvalitou prostorové reprodukce (*Ibid.*).

Poslechové prostředí tvoří významné okolnosti zvukové tvorby i jakéhokoli kritického poslechu (Terevo et al. 2014) a adaptace na jeho podmínky (či jejich změnu) může nastat jen do určité míry (*Ibid.*). Vliv akustické funkce vnějšího ucha a hlavy na barvu zvuku představuje aktuální předmět výzkumu (Marentakis a Charalampos 2020). Také u těchto aspektů tak lze předpokládat souvislost s časovými změnami. Posuny fáze složek zvuku spojené s dozvukem místnosti výrazně ovlivňují jakost vnímaného zvuku.

Reprodukce zvuku

Projev elektroakustických komponent řetězce a okolnosti sejmutí a reprodukce zvuku (například reproduktorových soustav) lze sluchem rozeznat a projevují se jako zabarvení zvuku (Rumsey et al. 2005, Dobrucki 2011). Barva zvuku tak představuje podstatný prostředek jejich hodnocení. Pro popis zvuku elektroakustického reprodukčního řetězce (na profesionální i amatérské úrovni) se užívají obdobná slova jako pro barvu zdroje zvuku (*jasný, měkký, tmavý, tenký*). Pro reproduktory byly například stanoveny dimenze *jasnost, zřetelnost, ostrost, tvrdost, prostorovost, tenkost a blízkost* (Gabrielsson a Sjorgen 1979). Značná část jevů, které souvisí s reprodukcí zvuku, má projevy v časové oblasti a může se projevit změnou původní časové informace u reprodukováného zvuku. Například hřebenový filtr se v časové oblasti projevuje jako rané odrazy zvuku (Kyriakis 1998), hmotnost kmitající

části reproduktoru jako fázový či časový posun a elektronická filtrace jako frekvenčně závislé opoždění signálu.

Jednou z podmínek zvukové kvality u reprodukováného zvuku je reprodukce bez technických nedostatků (Lima et al. 2008). Objektivní parametry technické kvality reprodukce reprezentují subjektivní charakter zvuku zejména zprostředkovaně a nemusí být jeho příčinou (harmonické zkreslení je například nepřímý indikátor nelinearity). Několik objektivních metrik stanovují standardy Mezinárodní telekomunikační unie ITU. Pro evaluaci kvality přenosového řetězce jsou vyvíjeny různé metriky, u nichž je předpokládána souvislost se skutečnými objektivními i subjektivními ději hodnoceními (Junyong et al. 2010). Pro porovnatelné subjektivní hodnocení základní zvukové kvality audio systémů a zvukových signálů byla standardizována metoda ITU MUSHRA⁵⁰ (ITU), která se v technických oborech používá jako standard k posouzení veškerých rozdílů mezi referenčním a hodnoceným zvukem (ke srovnání originálního zvuku před průchodem technickým zařízením a po průchodu). Pro hodnocení hudebních ukázek nebo tónů není určena, protože je založena na použití kotvy⁵¹, která se nedá v hudbě objektivně vybrat. Objektivní metrika PEAQ používá pro výpočet objektivních parametrů neuronální síť trénovanou na subjektivních posluhačských datech.

Časové děje⁵² jsou také významné pro technickou kvalitu audio reprodukčního řetězce a jsou tak aktuální oblastí rozvoje objektivních metrik jejího popis. Mnoho současných modelů technické kvality řetězce včetně modelu PEAQ je založeno na filtrační bázi, která lépe popisuje děje v časové oblasti (Junyong et al. 2010). Časová informace zvukových signálů je taktéž ovlivněna zásahy ve fázi úprav záznamu a tvorby zvukového díla. Obecně se předpokládá, že tyto zásahy jsou invariantní z hlediska lidského sluchu.

Dokumentární zvuk

Za jeden z cílů dokumentárního záznamu lze považovat přenesení dojmu, který by posluchač měl na místě záznamu (Melka 2005). V kombinaci s vhodnou metodou reprodukce umožňuje sejmutí a zachování těchto parametrů binaurální záznam či jiné metody (*Ibid.*) Jednou z možných metod binaurálního záznamu zvuku je metoda záznamu umělou hlavou⁵³ (*Ibid.*) Binaurální poslech není jednou metodou záznamu zohledňující anatomické faktory sluchu (Theile 1991). Běžné metody stereofonního záznamu a reprodukce mnoho těchto vlastností nezohledňují, avšak při vhodně zvoleném postupu je možné jednotlivé nedostatky percepčně zohlednit (Otčenášek et al. 2022). Odchytky od fyziologické věrnosti přenosového řetězce nastávají ve všech případech záznamu a

⁵⁰ Angl. *Multi stimulus set with a hidden reference and anchor*

⁵¹ Angl. *Reference*

⁵² například časové maskování

⁵³ funkční replika lidských uší a hlavy s mikrofony v ústí zvukovodu

reprodukce. Při posuzování přenosového řetězce pro kritické účely je vhodné posoudit jeho vhodnost a u odchylek zhodnotit jejich význam. Oddělenou oblastí je problematika zvukové reprodukce pro účely řízených poslechů v poslechových testech. Pro kritický poslech (například pro účely provedení poslechového testu) by komponenty celého elektroakustického řetězce měly mít co nejmenší zkreslení, co nejmenší fázový posun a jejich frekvenční charakteristika by měla být kompenzována, anatomicky odůvodnitelná a kalibrována na SPL0dB (Olive et al. 2013).

Distanční interakce

Přenos podstatných vlastností zvuku má kvalitativní význam i u distančních forem hudební interakce. Ta se od prezenční situace liší přítomností elektroakustického přenosového řetězce a odlišným umístěním obou účastníků. Současná úroveň síťových technologií umožňuje distanční hudební souhru bez výrazných technických omezení i u repertoáru původně určeného pro prezenční prostředí (Ubik et al. 2020, Monache et al. 2016). Při přenosu dochází ke zprostředkování zvukové události na obou stranách a tato činnost je spojena s otázkou příhodného zprostředkování události na místě odlišném od místa akustického děje (Otčenášek et al. 2022, Stirnat a Zeimer 2017). Jednotlivé provedení přenosu a použití technik snímání a reprodukce zvukového záznamu může interakci podstatně ovlivnit. U současných technických řešení lze předpokládat podstatné účinky na výsledek (užívá se zpracování signálu či datová komprese [Kurtisi et al. 2008, Valin et al. 2013, Lutzky et al. 2004]) a vliv má i interakce dvou odlišných prostorů na obou lokalitách či místech s účastníky (Boren a Genovese 2018). U přenosu zvuku prostřednictvím běžných konferenčních služeb ovlivňuje kvalitu signálu zejména aktivní potlačení dozvuku (Habets et al. 2008), ale také nízká kvalita užívaných mikrofonů a reproduktorů (přenosová funkce těchto zařízení například posiluje oblast 2-4 kHz). Mezi kvalitativně relevantní hlediska patří i několik jevů spojených s časem. Z těch je nejlépe prozkoumané obousměrné časové zpoždění dané zpožděním signálu, ale i souběžnost mezi zrakovou a sluchovou informací⁵⁴ (Harrar a Laurence 2008).

U distančních přenosů se převážně užívá kontaktní způsob sejmутí zvuku a to značně omezuje možnosti adekvátního přizpůsobení mikrofonních a reprodukčních technik účelu. Charakter přenášeného zvuku se ve vzdáleném místě lokalitě může podstatně lišit od zvuku, který by posluchač vnímal ve vzdáleném poli v místě záznamu (dochází k neznámé ztrátě informace oproti prezenční situaci či k jejímu ovlivnění). To může být problém zejména pro účely, kdy je cílem přenosu zprostředkování zásadních vlastností zvuku či zprostředkování co možná nejuvěrnější reprezentace snímaného zvuku (například u distanční výuky hry na

⁵⁴ Angl. *Multisensory processing*

hudební nástroj či zpěvu by přenosový řetězec měl zachovat všechny potřebné vlastnosti zvuku, které pedagog hodnotí).

Schopnost hudebníků uskutečnit hudební souhru také negativně ovlivňuje obousměrné časové zpoždění přenášeného zvuku (*Ibid.*). Jeho příčinou je šíření signálu sítí a jeho digitální převod (Rottondi 2017) ale zejména různé signálové operace (od ms po s). Souběžná hudební interakce je přitom s narůstajícím zpožděním nad 25ms značně obtížná a při násobném překročení již účastníci interagují nesouběžně (Carôt 2007, Barbosa 2011). Jedná se tak taktéž o širší percepční problém (dochází k přizpůsobování a k navazujícím jevům, například nestálost tempa) a změněné podmínky se také projevují psychickou zátěží (Chafe et al. 2010, Farner et al. 2009).

Hodnocení

Hodnocení různých kvalit je praktickou složkou mnoha hudebních oborů (Thompson a Williamon 2003). Specifickou oblast představuje problematika hodnotících kritérií pro hudební vzdělávání (Parkes 2010). Jejich poznání či formalizaci omezují jednotlivé odlišnosti a nejednotnosti (formalizace rámců na vyšší úrovni kvalit je obtížná) (Frič et al. 2019) a pro jejich návrh je žádoucí praktikovat postnormální přístup. K omezení těchto odlišností lze provést standardizaci na úrovni podkladů či vstupů (úroveň primárních kvalit), u nichž nejsou odlišnosti tak výrazné (barva zvuku či technická jakost). Jejich tvorba pak může probíhat například formou náslechů, při nichž se rozšiřují znalosti o barvě zvuku a jejích zákonitostech (Letowski a Miskiewitz 2013)

Poslechové testy

Hodnocení zvuků prostřednictvím poslechových testů je jednou z možností měření navazujících obsahů. Užívá se k němu rozličných psychometrických metod⁵⁵ (Atkinson 2003). Test představuje postup vedoucí k identifikaci, ověření a měření určitých fenoménů a dějů či vjemů (nebo obecněji zkoumaných veličin) (Melka 2005). Spolu s metodami pro hledání prahů slyšitelnosti či rozlišitelnosti (jež patří k metodám s konstantními podněty odstupňovanými na fyzikální podnětové škále) patří metoda párového srovnávání a metoda seřazování podnětů k nejpřesnějším a má také největší citlivost⁵⁶ (*Ibid.*).

Při tvorbě poslechových testů je třeba zohlednit psychologickou povahu měření (například poučením respondentů či jejich zácvikem) a je nutná optimalizace sérií předběžných poslechových šetření (k ozkoušení a ověření metod dochází pro každou okolnost zvlášť). U měření s lidmi je také nutné zohlednit etické okolnosti. Provedení nemůže

⁵⁵ Škálovací metody jsou časté avšak ne jediné

⁵⁶ Zejména v kombinaci s vhodným reprodukčním řetězcem

posluchačům způsobit újmu či je omezit. Je proto třeba omezovat délku trvání testů či dlouhodobou hladinu akustického tlaku poslechu (tato opatření také vedou k omezení sluchové únavy či ke ztrátě pozornosti). Schopnosti uskutečnit a spravovat test či řízené poslechové sezení tak představují značně odbornou zvukovou činnost a obor s řadou znalostních postupů a opatření zaměřených na omezení krátkodobých změn vnímání i dlouhodobých zkreslujících okolností během poslechu.

2 Metodologická část

Metody použité k výzkumu

Tato práce k získání poznatků o vlastnostech zvuku vychází z širších kvalitativních a kvantitativních metod. Následující přehled představuje souhrn jejich základních principů:

- a) výběru zvuků (sestavení souboru zvuků s odpovídajícími charakteristikami)
- b) záznam a úprava zvuků (vytvoření poslouchaných stimulů s odpovídajícími vlastnostmi),
- c) výběr posluchačů (sestavení skupiny posluchačů)
- d) poslechové testy s posluchači (sběr hodnot a subjektivních popisů od posluchačů),
- e) analýzy subjektivních i zvukových dat (statistická zpracování výsledků).

Výběr zvukových podnětů

Experimentální části této práce jsou založeny na hodnocení vlastností zvuku během poslechu poslechů s posluchači. Soubor všech možných vlastností zvuků a jejich okolností je značně rozsáhlý a tak je pro třeba vždy pro konkrétní studii provést užší výběr. Při něm by množina studovaných vlastností měla být s ohledem na cíle výzkumu odůvodnitelná (Melka 2005, str. 62 a 63). U poslechů s posluchači je z praktických i etických důvodů třeba udržovat poměrně nízkou délku poslechu (v optimálních případech ~ 1 h), zejména proto že u ní ještě posluchači udrží pozornost a se poslechů opakovaně účastnit. Optimalizace k navýšení rozsahu zastoupeného problému či počtu zvuků se tak zejména odehrávají na straně metod a postupů předvýběru podnětů či způsobů jejich předkládání respondentům a na této rovině je také omezena (obzvláště pokud je požadována citlivost či přesnost). Obvykle se tak užívá mezi 10 až 20 zvuků (Štěpánek 2002). Před výběrem zvuků by mělo dojít k určení *znaků* upřesňujících rozsah studované vlastnosti a její *proměnné*. Ze znaků pak vyplývá, jak vytvořit nebo následně sestavit množinu zvuků, aby požadovanému rámci odpovídaly.

K vybrání nejmenšího možného počtu konkrétních zvuků z celé jejich množiny lze použít test citlivosti posluchače na změnu podnětové proměnné (Melka 2005, str. 63). To lze provést posouzením zvuků v předběžném testu z hlediska postřehu určité. Takto lze nahradit zástupné zvuky se podlimitní mírou odlišností a případně též dosáhnout rovnoměrného pokrytí studované vlastnosti. V této práci je výběr podnětů podřízen cílům jednotlivých dílčích studií. Tabulka 1 představuje příklad, jak byly s ohledem na cíle (cíl) definovány znaky (znak)

pro každý pokus či studii (pokus) u úloh poslechoých testů, jejichž data⁵⁷ jsou užitá v této práci (k jejich spojení s množinou zvuků).

Tab. 1: Příklad výběrových znaků a provedení výběrů

Dataset:	Dataset	Cíl:	Znak pro výběr:	Provedení výběru
Housle.	Sekundární	Slovník atributů a jejich vztahů pro množinu různých houslí	Odlišnost kvalit	Záznam houslí od mistrovských až po školní tovární
Struna	Primární	Slovník atributů odpovídající odlišnému ostružení a technikám hry	Odlišnost zvuku	Záznam zvuku různého ostružení a přítlaku smyčce
Intonace	Primární	Slovník atributů pro intonační nastavení varhanní píšťaly	Odlišnost zvuku	Záznam píšťaly s proměnným intonačním nastavením
Sluch	Primární	Slovník atributů pro zkoumaný sluchový jev	Náhodnost	Generování tónu s náhodným posunem fáze harmonických
Hlas	Směšovaná	Hodnocení interpretace	Dostupnost	Různé interpretace dvou částí shodné skladby

Výběr posluchačů

Kvalita a hodnocení zvuků poslechem závisí na fyzikálních vlastnostech zvukových podnětů i psychologických okolnostech a rysech posluchače⁵⁸ (Bodden 1997). Individuální hodnocení mohou ovlivnit jak kvalitativní aspekty (afektivní povaha podnětu, účel posuzování či vztah hodnotitele k předmětu a další asociace) (Genuit 2002). Širší rámec obsahuje zkušenosti hodnotitele s poslechem, jeho odbornost a schopnost rozpoznat některé vlastnosti či rozdíly a pak je i slovně popsat.

Z časových či organizačních důvodů je žádoucí provádět poslechové testy s relativně malou skupinou pokusných osob⁵⁹ z větší množiny osob připadajících pro danou problematiku v úvahu⁶⁰. Na výsledek poslechoých testů mají také vliv kognitivní schopnosti osob. Lidé se liší citlivostí ke studovaným detailům a také užitím svého jazyka. U diskriminačních testů⁶¹ zaměřených na základní výzkum charakteristik zvuku lze úlohu respondentů zjednodušit na *měření* a tomuto účelu by měl být uzpůsoben i jejich výběr (Melka 2005, str. 64). Měli by to být uvážliví lidé se schopností dlouhodobě udržet pozornost i zájem (*Ibid.*) a schopní podat co nejvýstižnější, nejúplnější a nejpřesnější popis studované vlastnosti.

Pro účely této práce je tak vhodný záměrný výběr posluchačů (*Ibid.*). Vhodným kritériem pro výběr posluchačů z hlediska jejího záměru je zkušenost s poslechem či

⁵⁷ Primární i sekundární

⁵⁸ Objektívni zvuk je příčinou *intenzity* a osobní proměnné jí moderují

⁵⁹ Výběrový soubor

⁶⁰ Základní soubor, populace

⁶¹ Populace zde není základním kritériem

profesionálně vytvořená schopnost vnímat vlastnosti zvuku a používat k jejich popisu kvalifikovanou slovní zásobu (vhodní jsou odborníci z hudebních oborů: hudebníci, zvukoví mistři, tvůrci hudebních nástrojů). Tento nenáhodný výběr je pak také předurčen dostupností a ochotou daného odborníka (*Ibid.*). Při užití přísnějších kritérií shody posluchačů může být dosaženo značné zobecnitelnosti výsledků i na malém výběrovém souboru (10–20 posluchačů). Shoda respondentů je proto užívána jako jednotící kritérium napříč touto prací a i na menších souborech⁶². Počty odborných posuzovatelů u této práce limitovala zejména jejich dostupnost. Ke zvýšení přesnosti i výpovědní hodnoty byla jejich hodnocení statistiky zpracovávána a byl nastaven spodní limit shody respondentů na daném aspektu či deskriptoru. Soubor posluchačů navíc průřezově přes všechny studie této práce čítá přes 40 posluchačů.

Záznamy a úpravy zvuků

U zvuků, které nejsou hodnoceny při jejich skutečném znění, musí být proveden záznam a reprodukce. Pro záznamy zvuků lze užít značně rozdílné metody a jejich vhodnost by měla být posuzována z hlediska jejich cíle a určení. Časová struktura bez vlivu dozvuku může být například zachována záznamem v bezodrazové místnosti, ovšem prostorové aspekty vnímání je třeba anatomicky zohlednit binaurálním záznamem či ověřeným záznamem na dvojici mikrofónů. Záznam zvuku lze provést různým umístěním mikrofónů ve vzdáleném poli (obvykle v 5-ti násobku rozměrů hudebního nástroje. Po ověření lze například užít polohu v hlavních směrech vyzařování (Špelda 1978) nebo obvyklé umístění mikrofónu používané ve zvukové tvorbě k záznamu konkrétního typu nástroje.

U digitalizovaných zvukových stop určených pro poslechové hodnocení se provádí série úprav. Jejich nejčastější formou je zkrácení záznamu na optimální délku. U posuzování vhodné doby trvání jednoho *podnětu* či *ukázky* je důležité, aby za tuto dobu posluchač došel k subjektivnímu soudu a dokázal jej následně vyjádřit (představuje-li sluch *měřicí* systém, posluchač nemá mít pocit, že má hodnotit uspěchaně). Trvá-li však významně déle, posluchač ztrácí soustředění⁶³ a projevuje se u něj brzy únava (Melka 2005). V publikovaných studiích se nepotvrdilo, že by u zvuků delších než 1 s hodnocení ne/příjemnosti či celkové barvy bylo závislé na délce podnětu nebo průměr ze součtů dílčích hodnocení jednotlivých úseků odpovídal celkové vnímané příjemnosti (Geissner a Parizet 2008). Emoční odezvy posluchačů na dlouhé (30 s) a krátké (do 3s) si jsou velmi podobné (Bigand a Poulin-Charronnat 2006). Je-li to pro cíl/účel poslechu postačující, je vhodné používat zvuky kratší než 3 s (kritérium psychologické současnosti) (Nilsson 2007). Hudební úryvky, které přesáhnou kapacitu sluchové paměti, posluchači mohou hodnotit na základě

⁶² Univerzálně stanoven spodní limit shody respondentů

⁶³ *Nudí se* (Melka 2005, str. 63)

jiných kritérií či mohou dle okolností hodnotit jen závěrečné části. Pro párové srovnávání barvy zvuku jsou používány kratší zvuky (typicky ~ 1 s) (Caclin et al. 2005, Vastfjall et al. 2002), což zároveň snižuje vliv psychologických subjektivních faktorů (zkušenosti, profese, motivace) na výsledky (Genuit 2002).

Signály, u nichž byla upravena délka, dále možné modifikovat či standardizovat (vyčlenění zakmitaných či tranzientních částí, doplnění umělých pozvolných počátků a zakončení (zesílení a zeslabení), frekvenční filtrace, unifikace hlasitosti či výšky.

Technické provedení záznamu (ale i reprodukce při poslechových testech) je dáno účelem experimentu a možnostmi, které má experimentátor k dispozici a uvádí se jako součást popisu experimentu). Problematikou má přesahy do tématu reprodukce zvuku ke kritickému poslechu, které je zmíněno v předchozí teoretické části práce.

V této práci byly prováděny záznamy či používány archivní nahrávky a druhotná data jak pro účely kritického poslechu (dokumentační záznamy věrně zachycující barvu), tak pro hodnocení uměleckého vyznění hudebních ukázek (zpěvu). Vytvořeny byly i uměle generované zvuky. Případné úpravy (délka, začátky/konce, filtrace, fázové posuny) jsou uvedeny u jednotlivých experimentů. Jejich reprodukce byla z důvodů standardizace a přenositelnosti na jiná místa vždy na sluchátka.

Poslechové testy

Hodnocení zvuků prostřednictvím poslechových testů je jednou z možností měření psychologických obsahů. Užívá se k němu rozličných psychometrických metod⁶⁴ (Atkinson 2003). Test představuje postup vedoucí k identifikaci, ověření a měření určitých jevů a dějů či vjemů (nebo obecněji zkoumaných veličin) (Melka 2005). Spolu s metodami pro hledání prahů slyšitelnosti či rozlišitelnosti (jež patří k metodám s konstantními podněty odstupňovanými na fyzikální podnětové škále) patří metoda párového srovnávání a metoda seřazování podnětů k nejpřesnějším a má také největší citlivost⁶⁵ (*Ibid.*).

Při tvorbě poslechových testů je třeba zohlednit psychologickou povahu měření (například poučením respondentů či jejich zácvikem) a je nutná optimalizace sérií předběžných poslechových šetření (k ozkoušení a ověření metod dochází pro každou okolnost zvlášť). Před prováděním poslechových testů je všem respondentům shodně vysvětlena jejich úloha (případně účel, pro zvýšení motivace), na cvičných podnětech předvedeny očekávané minimální/maximální vlastnosti, které je mohou čekat (obvykle vybrány v předběžném testu) a jsou zacvičováni v provádění poslechů i ve způsobech poskytování odpovědí. U všech poslechových testů, které trvají déle (obvykle více než 10 min.), jsou zařazovány vynucené nebo volitelné přestávky v poslechu (omezení sluchové

⁶⁴ Škálovací metody jsou časté avšak ne jediné

⁶⁵ Zejména v kombinaci s vhodným reprodukčním řetězcem

únavy a ztráty pozornosti); po přestávce následují „zahřívací“ poslechy, které se do výsledků nezapočítávají (omezení krátkodobé změny vnímání vlivem přestávky například opětovným předvedením zácvikových zvuků, nebo zopakováním několika zvuků prezentovaných před přestávkou).

Všechny hlavní výsledky prezentované v této práci byly dosaženy pomocí poslechových testů. Jejich provedení bylo administrováno vždy podle uvedených pravidel, včetně etických principů. Texty standardních úvodních seznámení účastníků s účelem a postupy testu, dokumentace o průběhu administrace (časové harmonogramy a přestávky) a software a design obrazovek použitých k provádění testů jsou k nahlédnutí uloženy v archivu autora a z důvodů jejich rozsáhlosti nejsou součástí této práce.

Metoda konstantních podnětů

Prostřednictvím metod konstantních podnětů je možné na kontinuu gradace míry studované vlastnosti ověřit, při které hodnotě posluchač určitou vlastnost slyší či neslyší (práh pro vnímání či nerozeznatelnost) nebo nerozezná, že nastala změna vjemu proti předchozí hodnotě (práh pro odlišnost) (*Ibid.*).

V této práci je metoda využita ke zjištění prahů a citlivosti posluchače při změnách fázových posunů spektrálních složek zvuku.

Metoda párového srovnávání

Metodou párového srovnávání jsou hodnoceny rozdíly mezi zvuky prezentovanými v párech (zvuky znějí po sobě navzájem, s malým časovým odstupem za sebou; všech n studovaných zvuků je srovnáváno se všemi $n-1$ zbývajících). Respondent označuje, který zvuk v páru je v určitých vlastnostech dominantní (vyvolává vjem, který druhý v páru nevyvolává), případně identifikuje, zvlášť u prvního a zvlášť u druhého v páru, které vlastnosti má (jaké dominantně vyvolává vjemy). Obvykle se vyžaduje nucená volba (musí být jeden z páru dominantní), ale může se stát, že se v některých ze svých vlastností lišit nebudou (neutrální volba), pak ke snížení stresu hodnotitele může být přípustné samostatně označit takovéto neutrální posouzení určité vlastnosti (respondent upřesní, že jí mají oba zvuky). Jako výsledek jsou obvykle používány četnosti dominance dané vlastnosti, ale může to být upřesněno i škálováním dominance (párové posuzování, při kterém se hodnotitel vyjadřuje jak k vlastnosti, tak i k míře její dominance na vhodné škále) (*Ibid.*).

K minimalizaci Fechnerovy chyby místa (zvuk může být vnímán na první pozici jinak než na druhé) a času (u zvuku, který je prezentován v krátkém odstupě od předchozí prezentace, zůstává jeho účinek a použité hodnocení v paměti respondenta, posouzení je

pak jiné, než při delším odstupu) je výhodné využít algoritmus vytvářející pseudonáhodné pořadí výskytu zvuků v párech, při kterém určitý zvuk má ve sledu párů před jeho dalším výskytem největší počet výskytů zvuků jiných a pravidelně střídá svůj výskyt na první a druhé pozici (Ross 1939).

Při párovém srovnání je možné výsledek považovat za metrický (Bradley a Terry 1952) a předpokládá se stabilita výsledků jak z hlediska rozpoznání vlastností barvy zvuku, tak i vyvolaných vjemů (Eerola et al. 2012, Moore 1995). Nevýhoda testů párového srovnávání spočívá v jejich délce (poslouchán je $n(n-1)/2$ počet párů). Metoda je při srovnávání podnětů přesná, zejména pokud délka stimulů nepřekročí délku krátkodobé sluchové paměti.

Metoda párového srovnání je základní používanou metodou k rozpoznávání vlastností/rysů zvuků a vjemů v této práci.

Metoda seřazování podnětů

V metodě seřazování podnětů je hodnotitelem sestaveno pořadí mezi n podněty dle míry přítomnosti studované vlastnosti na daném podnětu (intenzity vjemu vyvolaného danou vlastností). Seřazení může mít hodnoty uspořádané buď sestupně (podle čísla pořadí, nejvíce = 1) nebo vzestupně (dle pořadové hodnoty, nejvíce n) (*Ibid.*). Protože při zařazení do pořadí je srovnáván zvuk s potenciálními sousedními zvuky, jde částečně o obdobu párového srovnávání. Je při tom ale potřebný menší počet párových kombinací poslechů, jelikož odpadá potřeba srovnávat s potenciálně velmi vzdálenými (odlišnými) zvuky. Seřadit lze však obvykle jen podle jedné vlastnosti, takže pro další vlastnost se seřazování musí provést opakovaně a samostatně. Jako míra vlastnosti může být použita pořadová hodnota, ale pro jemnější odstupňování gradace vlastnosti napříč seřazenými zvuky bývá výhodnější jim přiřadit hodnotu míry doplňujícím poslechem s dodatečným škálováním dané vlastnosti (buď vyjádřením rozdílu v míře gradace mezi sousedy, nebo ke každému zvuku uvést jakou míru má v rámci gradace mezi krajními hodnotami nejméně a nejvíce).

V práci je tato metoda použita při škálování vlastností na zvucích, u nichž byla měněna fáze jednotlivých spektrálních složek.

Škálování

V psychometrickém výzkumu jsou ke stanovení míry u studovaných vlastností běžně užívány škály. Při posuzování respondent buď vnímanou míru vyjádří na škále hodnot⁶⁶, nebo ji přiřadí do jedné z vhodně odstupňovaných kategorií (slovní škála: málo, středně,

⁶⁶ Například umístí bod na přímku grafické škály

hodně; numerická škála: 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5) (*Ibid.*). Při slovním popisu krajních bodů nebo i dalších vnitřních slovních ukotvení (Hayes et al. 2013) je podstatná shoda na významech i mírách kotvících slov (*Ibid.*), které mají odpovídat senzoričké zkušenosti respondentů.

U všech poslechových testů, ale zejména při použití kotvících slov (kategorií), je potřebné seznámit respondenta s rozsahem škály (nejlépe na příkladech při zácvičce). Individuální chápání jejích stupňů by mohlo zkreslit či odchýlit odpovědi daného posluchače od ostatních a ovlivnit validitu takto získaných poznatků. Pro škálování subjektivních vlastností lze však užít i kvalitativní metody konstrukce a interpretace slovních dat (citace) a převodu kvalitativních slovních dat do podoby kvantitativních atributů pomocí vhodných metod statistické analýzy. Výsledky kvantitativního převodu u subjektivních proměnných (včetně barvy zvuku) patří k základním metodám psychometrického škálování. Některé zákonitosti zvuku a sluchu byly nalezeny právě na základě těchto škálovacích metod (Zwicker a Fastl 1999, Kaplanis et al. 2014).

V této práci jsou různé formy metody škálování použity u všech prezentovaných experimentů. Pro účely ověření vhodnosti kotvících slov na použitých škálách byl proveden samostatný experiment (uvedený v experimentální části této práce).

Ukotvení škál

Spontánní sběr popisných slov představuje otevřenou výzkumnou metodu a z hlediska povahy otázek také i otevřenou otázku. Tím je značně omezeno zkreslení při sběru dat spojené s fenoménem omezení odpovědi i interakce s měřicí škálou (Krossnick 2009). Interakce respondentů s požadovanou stupnicí nastává zejména na numerické škále (jak převést míru vjemu na číslo vyjadřující hodnotu dané vlastnosti) a v souvislosti s interpretací slovního ukotvení škály (*Ibid.*). Škála by měla zajišťovat uniformní gradaci, ukotvení by mělo být vzájemně nezástupné a mít co největší shodu mezi hodnotiteli (Krossnick 2009). Jednoznačné slovní ukotvení škály podstatně zvyšuje reliabilitu či i shodu respondentů oproti číselnému. Užití ověřené slovní zásoby či její samostatné ověření je tak žádoucí (Lietz 2010, Krossnick 2009). Zkreslení omezení odpovědi nastává, pokud nesprávně stanovená nabídka škál strhává pozornost na nepodstatné rysy zvuků nebo pozornost naopak omezuje (Melka 2005).

Sémantické škály

Sběr slovních popisných adjektiv je podstatným podkladem pro konstrukci jednodušších sémantických škál. Standardní metody předpokládají dotazníkové šetření (se zvukovým podkladem či bez něj). Použití bipolarity škál či faktorů (například tmavý - světlý) je výhodné pro snížení počtu položek dotazníku (ale bipolaritu je nutné důkladně ověřit,

jelikož při nevhodně vybraných antonymních pólech při užití metody sémantického diferenciatu to může být zdrojem systematické chyby). Frekvenční slovník představuje seznam adjektiv seřazených podle četnosti výskytu do pořadí. Umožňuje analyzovat shodu hodnotitelů i rovnoměrnost gradace přítomnosti hodnocených vlastností na použitých zvukových podnětech.

Sémantické a frekvenční slovníky jsou v této práci součástí většiny prezentovaných experimentů.

Spontánní popis

Slovní vyjádření přítomnosti vlastnosti (její pojmenování) je aktem (*judgement*) a jeho četnost na určitém podnětu v párovém srovnávání lze kvantitativně sčítat, obdobně jako četnosti jiných aktů (voleb), například při použití binárního srovnávacího schématu (Melka 2005). Nejpřesněji lze přítomnost rozdílů zachytit volným⁶⁷ slovním popisem. Spontánní slovní odpovědi zachycují individuální povahu problému nezávisle na měřicí škále. Výsledky míry určité vlastnosti získané pomocí slovních deskriptorů odpovídá míře získané jiným škálováním (Tversky 1977). Používány jsou jak postupy, kdy posluchači popisují zvuk zcela volně (při zpracování je náročné nalézt společné pojmenování téhož různými respondenty), tak, kdy jsou omezeni volbou z předloženého seznamu získaného na základě předvýběru (takto jsou eliminovány synonymní a gramaticky totožná pojmenování). Výběrem odpovědi na odpověďové škále ze seznamu je ale popis předem determinován, účastníci tak mohou předložený škálovací konstrukt chápat odlišně od skutečně vnímané vlastnosti. Po zpracování výsledků je výhodné ověřit synonymitu a individuální významovou shodu slovních deskriptorů dodatečným sezením, na kterém dojde ke spojení popisu s prezentací podnětů posluchačům (neshoda tak může být zpětně upravena). Slovní data lze užít i k systematickému popisu obsahů vědomí.

V této práci je metoda spontánního popisu používána k sestavení frekvenčních slovníků.

Psychologický prostor

Smyslové vnímání a následné zpracování je založeno na tvorbě abstraktní reprezentací vnímaných objektů, jejich vlastností a vzájemných vztahů (v barvě, čichu či témbu). Pro studium těchto vztahů lze jejich strukturu zobrazit jako psychologickou mapu, která má povahu prostoru základních kategorizačních dimenzí. V psychologických měřeních lze subjektivní data, na základě hodnocení rozdílů (například nepodobností) mezi vnímanými objekty, sestavit do psychologického prostorového útvaru vystihujícího zjištěné rozdíly.

⁶⁷ Angl. *Spontaneous*

Psychologické prostory lze dále interpretovat na pomoci vnoření externích dat (například vnořit popisy vjemů, které rozdíly způsobily, nebo charakteristiky z fyzikálních příčin) (Štěpánek 2005). Například hodnocení nepodobnosti zvuků pomáhají odhalit skryté kvalitativní mechanismy a principy sluchového systému (Kurtz et al. 2000). V této práci má psychologický prostor podobu konkrétních percepčních prostorů sestavených metodou faktorové nebo MDS analýzy.

Percepční prostor

Percepční prostor zvuků představuje geometrické znázornění psychologických vztahů vytvořený na základě dat hodnocených nepodobností, které reprezentují vzájemné vztahy mezi zvuky vnímané a hodnocené posluchači v poslechovém testu. Tento prostor je také posléze možné interpretovat vnořením dalších popisných dat souvisejících s jednotlivými podněty. V případě interpretace percepčního prostoru metodou lineární vícerozměrné regrese je možné stanovit souvislosti mezi vnořenými a jejich vzájemnými úhly. Na základě úhlů a progresse regresních přímek lze indikovat spojitost či nezávislost mezi takto vnořenými atributy a interpretovat vztahy i v prostorech se značným množstvím dimenzí (Susini et al. 1999, Caclin et al 2005). Interpretovatelnost (úhly a souvislosti vlastností) je obvykle také kritériem pro posouzení, zda byl u percepčního prostoru určen správný počet dimenzí (Borg a Lingoes 1987).

V této práci jsou geometrické prostory nepodobností v barvě zvuku interpretovány metodou vícenásobné regrese a vnořovány jsou četnosti slovních atributů získaných metodou spontánního popisu.

Zpracování dat

Metody používané při prvotním zpracování dat z poslechových testů mají za cíl identifikovat, kvantifikovat a případně minimalizovány rozdíly mezi výsledky jednotlivců. Ty mohou mít příčiny jak systematické (například způsobeny rozdílnými zkušenostmi, poškozením sluchu, jiným modelem hodnocení či mohou být důsledkem optimalizace a záměrného usnadňování a také rozdílnými individuálními pořadími podnětů nebo víceznačností a nejednoznačností otázek) (Břicháček 1981), tak nahodilé (momentální ztráta pozornosti, okamžitý zdravotní či psychický stav, únava) (Melka 2005). Metodicky jsou proto individuální data nejprve zobrazována (krabicové grafy využití škál či četností slovních deskriptorů) a analyzována základními statistickými metodami (korelace, shluková analýza, faktorová analýza). Následně jsou hledány skupinové shody výsledků (vnitrotřídní koeficient korelace, koeficient reliability Cronbachovo α) (Cronbach 1970, Tavakol a Dennick 2011) a pak teprve jsou individuální hodnoty nahrazovány skupinovými (průměry, mediány, *k - mean*

clustering). Uvedené postupy mají za cíl zlepšení souběžné validity (aby metoda měřila to, co měřit má) (Melka).

V této práci jsou použity všechny uvedené postupy. Validita výsledků jednotlivých experimentů je potvrzována také závěrečným porovnáním naměřených výsledků s daty získanými na jiném kontextu a s jinými respondenty napříč experimenty.

Standardizace

Standardizace je metoda, kterou lze sjednotit variabilitu dat k jednotnému standardu normálního rozložení při zachování skutečného rozložení. Při této transformaci je provedeno centrování dat (od jednotlivých hodnot je odečten průměr souboru) a následně je každá z hodnot vydělena ukazatelem proměnlivosti souboru (například směrodatnou odchylkou).

V této práci je standardizace použita u dat, která jsou porovnávána z hlediska rozložení hodnot (použito při sledování vlivu změny fáze spektrálních složek).

Shluková analýza subjektivních dat

Shluková analýza patří mezi statistické metody, která u množiny m objektů hledá jejich blízkost (ne/podobnost) a blízké objekty seskupuje do shluků. Nepodobnost je při tom považována za vzdálenost mezi shlukovanými objekty, kterou lze stanovit z řady n hodnot (obvykle vlastností), které charakterizují každý objekt. Vzdálenost každé dvojice z m objektů může být vypočtena jedním z následujících postupů: euklidovská vzdálenost (odmocnina ze součtu kvadrátů rozdílů mezi každou dvojicí z n hodnot), city blok vzdálenost (součet jejich rozdílů), vzdálenost daná procenty nepodobnosti (součet neshod mezi každou dvojicí z n hodnot), korelační vzdálenost (1-hodnota korelace mezi dvěma řadami n hodnot). Na základě zvolené metody shlukování (nejbližší soused: postupně jsou spolu seskupovány objekty/shluky objektů mající mezi sebou nejmenší vzdálenosti; nejvzdálenější soused: postupně jsou oddělovány objekty s největší vzdáleností; Wardova metoda: postupně jsou seskupovány objekty tak, aby vykazovaly minimální součty čtverců vzdáleností) vzniká stromová struktura⁶⁸ v níž se postupně (na řadě úrovní vzdáleností) mezi sebou propojují slučované objekty (na nejvyšší úrovni pak existují dva shluky) (Statistica).

Pro účely této práce (seskupování respondentů podle podobnosti jejich výsledků, seskupování synonymních popisných slov) je používána vždy nejnižší úroveň seskupení.

Korpusová analýza

Metoda kvalitativní korpusové analýzy je postup zpracování větších slovních seskupení používaná k obsahovému rozboru celých vět formou jejich kódování do menších

⁶⁸ Angl. *tree*

četnostních jednotek. Kódování četnostních jednotek je prováděno na základě jejich jazykové formy. Převedení jednotlivých vět na vhodná zastupující slova (odvozená metodou CATA) (Short et al. 2010) probíhá po stanovení jejich významových souvislostí expertní validací. Vzniklé jednotky pak mohou být užity v následné kvantitativní analýze (Chapelle 2013).

Pro účely této práce byla metoda použita při analýze dat získaných z popisu hudebních ukázek zpěvu.

Faktorová analýza

Faktorová analýza je vícerozměrná statistická metoda pomocí níž lze pro množinu m objektů, z nichž každý je charakterizován řadou n hodnot (obvykle vlastností), vytvořit modelový vícerozměrný prostor ($f < m$), který umožňuje studovat skryté vztahy mezi těmito objekty a strukturu, kterou společně tvoří. Osy prostoru tvoří faktory, na kterých se objekty řadí podle toho, jak jejich jednotlivé hodnoty přispívají k celkové variabilitě dat (sycení faktoru). Faktory jsou číslovány podle svého podílu na celkové variabilitě (1. faktor vyčerpává největší díl variability) a jednotlivé faktory tvoří hlavní osy prostoru (*principal component*), které jsou vůči sobě ortogonální, přičemž počátek (bod 0) leží v těžišti celé prostorové konfigurace objektů. Jsou-li si objekty (analyzované proměnné) svými hodnotami podobné, seskupí se spolu v jednom faktoru a je možné tak zredukovat počet proměnných (další využití faktorové analýzy). Potřebný počet faktorů, který by po redukci byl ještě postačující k vystižení skryté struktury, se určuje ze strmosti poklesu vlastních hodnot (například prostřednictvím grafu *scree plot*). Na něm jsou k jednotlivým faktorům zobrazeny hodnoty vlastních čísel matice používané k výpočtům při této analýze. Jednotlivé hodnoty klesají s klesající variabilitou vyčerpanou každým dalším faktorem. Použití faktorové analýzy předpokládá u proměnných normální rozdělení a existenci lineárních vztahů (Statistika, Melka 2005). V případě analýzy dat z poslechových testů (zejména u spontánních popisů) může být obtížné zajistit normalitu a může se stát, že popíší-li respondenti nedůležitou vlastnost mnoha významově příbuznými deskriptory, vytvoří tato variabilita samostatný nedůležitý faktor (nebo je připojí k jiným, důležitějším deskriptorům a změní tak jejich skutečnou konfiguraci). Je-li i po redukci faktorů použito faktorů více ($f > 3$), je obtížné zobrazit výslednou konfiguraci a rozložení objektů v ní. Pro snadnější orientaci ve výsledném modelu je proto používána rotace souřadnic faktorového prostoru. Nejčastější je použita metoda *Varimax*, při které jsou na nové osy rotovaných faktorů umísťovány objekty, které nejvíce přispěly k variabilitě vyčerpávané jednotlivými faktory (algoritmus hledá minimum součtu všech středních kvadratických odchylek od jednotlivých nových os). K obdobnému účelu slouží i rotace *Qvarimax* (minimalizuje počet faktorů potřebných k vysvětlení variability všech objektů/proměnných) (Statistica). Pro zobrazení faktorové konfigurace lze užít 2D řezy,

v nichž se objekty z jiných faktorů obvykle zobrazí v blízkosti středu. I po rotaci však vztahy mezi objekty (v této práci mezi vlastnostmi zvuků nebo vjemů) nemusejí odpovídat smysluplným reálným souvislostem (Melka 2005). Seskupení objektů do určitého faktoru je potřebné analyzovat i z dalších racionálních hledisek (například na základě sémantické, významové, fyzikální odlišnosti) a propojovat se závěry získanými na jiném kontextu.

V této práci je faktorová analýza (spolu s MDS analýzou) použita k hodnocení vztahů mezi základními a vynořujícími se vlastnostmi a jejich souvislostí s kvalitou.

Vícerozměrné škálování MDS

Technika vícerozměrného škálování (*Multidimensional Scaling* MDS) je vícerozměrná statistická metoda pomocí níž lze množinu m objektů, mezi nimiž je nadefinována vzdálenost ($m \times m$ matice vzdáleností δ_{ij} každého objektu s každým) uspořádat do modelového d dimenzionálního geometrického prostoru (Statistica), který následně umožňuje vnořovat do něj studované vlastnosti a hledat skryté vztahy mezi těmito vlastnostmi (nebo strukturu, kterou společně tvoří). Pro tento účel je každý objekt nositelem n vlastností a u každé této vlastnosti je charakterizován nějakou její mírou (ta může mít i hodnotu = 0). Výhodou MDS metody je, že nevyžaduje normalitu a vzdálenosti nemusí být metrické (postačují pořadové) (Coxon 1982).

Praktický postup pro užití této metody pro subjektivní poslechová data obnáší sběr posuzovaných vzdáleností mezi zvuky nebo vjemy (nepodobností mezi objekty) a jejich následnou interpretaci. Pro účel interpretace může být například zjištěna míra vnímaných vlastností pro každý z objektů⁶⁹. Obvykle je k získání uvedených informací použito párové srovnávání nebo metoda seřazování (míra každé z popsaných vlastností pak může být spočtena z četnosti výskytu vlastnosti na jednom ze zvuku v páru). Do nepodobnosti zahrnuje respondent podvědomě souhrn vjemů, které si sám ani nevybavuje (jde o percepční vzdálenosti), a tak prostor představuje distanční model, který souhrnně zahrnuje i ty percepční vlastnosti, které nemají svou verbální asociaci.

Zvolení správné dimenzionality. Při použití malé dimenzionality prostorů však nejsou správně vystiženy podíly těch všech vlastností, které vnímanou hodnotu vzdálenosti vytvořily (v prostoru se pak uplatňují jen dominantní vnímané vlastnosti), a při větší dimenzionalitě se začnou projevovat chyby v určení vzdálenosti jednotlivými respondenty (*šum* v hodnotách vzdáleností). Pro stanovení potřebného, ale ještě přípustného počtu dimenzí, a určení vlivu přítomnosti *šumu* je používáno několik postupů a kritérií.

Vhodný počet dimenzí, při nichž se objekty v modelovém prostoru rozmístí tak, aby mezi nimi byly co nejlépe zachovány vzdálenosti ve vstupní matici, se určuje ze strmosti

⁶⁹ Objekt je představován podnětem

poklesové křivky na *scree plot* grafu. V něm jsou k jednotlivým počtům dimenzí (1D až dD) vyneseny hodnoty stresu (stres hodnota je úměrná součtu odchylek jednotlivých vzdáleností mezi objekty ve vypočteném d dimenzionálním MDS prostoru od originálních). Se zvyšující se dimenzionalitou hodnota stresu obvykle klesá, protože více dimenzí dokáže lépe dodržet trojúhelníkové vzdálenostní vztahy mezi všemi trojicemi objektů. Ve *scree plot* grafu je pak hledána úvrať, kde strmý pokles stress hodnot se změní na malý (snížení hodnoty derivace).

Soulad jednotlivých vzdáleností mezi objekty ve vypočteném d dimenzionálním MDS prostoru s těmi originálními se standardně zobrazuje v *Shepard diagramu* (původní vzdálenosti jsou v něm na x ose, vypočtené na y ose, obě zobrazeny vzestupně) (Statistica). U nemetrické MDS analýzy jsou při malé dimenzionalitě vypočtené vzdálenosti v *Shepard diagramu* výrazně rozptýleny od přímky, při nadbytečné dimenzionalitě je velký počet vypočtených vzdáleností identických a klesá vystižení gradace originálních vzdáleností (vzestupný trend je pak velmi hrubě schodovitý).

Citlivost na chybu náhodným *zašuměním* vzdálenostních dat lze například ověřit přidáním umělého šumu do matice vzdáleností (každá původní hodnota může být změněna například přičtením podílu součinu z této hodnoty a kladného či záporného náhodného čísla od 0 do 1) a jsou porovnávány hodnoty *scree plot* s původními (bez zašumění) (Wagenar a Padmos 1971). Uvedený proces s náhodným zašuměním se opakuje a porovnává se histogram získaných hodnot stresu. Počet dimenzí, při kterém jsou původní a náhodně generované hodnoty stresu srovnatelné, již není použitelný (při zvýšení na tento počet sice snížení stres hodnoty nastává, ale přidané dimenze již nevystihují reálné vzdálenosti, ale jen umělé vzdálenosti dané chybami).

V této práci jsou v jednotlivých experimentech MDS prostory použity k hodnocení vztahů mezi základními a vynořujícími se vlastnostmi a k určení jejich souvislostí s kvalitou. Jako vzdálenosti byly použity nepodobnostní data z nových poslechových testů i z archivu (data byla analyzována nemetrickou metodou MDS). Při použití MDS na archivních datech bylo za použití *scree plot*, „zašumění“ a *Shepard diagramů* ověřeno, že je možné uvažovat o řešení s více než 3 dimenzemi, které bylo zvoleno v původní studii (Stepanek 1999). Testovány byly 4D až 9D řešení. Strukturovaná data a interpretovatelné vztahy vnořovaných vlastností byly ještě nalezeny u 8D řešení (viz dále).

Interpretace prostorů vnořením

Smyslem vytvoření MDS prostorů není jen zobrazení konfigurace objektů, ale identifikování příčin, proč jsou takto uspořádány (identifikování struktury vztahů a jejich propojení ve smysluplný výklad). Metoda je označována názvem *interpretace percepčních prostorů* (n rozměrných konfigurací/řešení výsledků MDS) (Melka 2005). Způsobů interpretace je více. Vždy však mají jako základ přiřazení objektům tvořícím konfiguraci

hodnoty jejich vlastností. Hodnoty jednotlivé vlastnosti se do prostoru vnořují, tzn. po vnoření je každý objekt nositelem určité míry dané vnořované vlastnosti (míra vlastnosti na každé objektu představuje jeho váhu). Zda je vlastnost v n dimenzionálním prostoru soustředěná do určitého místa, nebo graduje napříč prostorem, se interpretuje nejčastěji metodou těžišť (výhodné v případě, že je výskyt vlastnosti v prostoru lokalizován na určité místo) nebo lineární regresí (při gradaci vlastnosti prostorem). Používána je i obecnější metoda paprsku procházejícího prostorem tak, že součet čtverců odchylek od tohoto paprsků je při daném směru minimální, nebo, je-li zdrojem hodnot vnořované vlastnosti párové srovnávání, lze rozdíl míry vlastnosti mezi každými dvěma objekty považovat za vektor a nalézt tak směr gradace jako jejich vektorový součet. Metody vnoření vysvětluje například Štěpánek (2005) nebo Melka (2005).

V této práci je k interpretaci percepčních prostorů použita metoda vícerozměrné regrese. Porovnávána byla metoda lineární a logaritmické regrese. Pro přizpůsobení gradace dat logaritmickému charakteru slyšení se vždy ukázalo jako vhodnější upravit míru vlastnosti přerozeným logaritmem \ln (použita proto byla logaritmická regrese).

Zobecnění interpretací prostorů

Obě metody (multidimenzionální škálování faktorová analýza) jsou si při identifikaci psychologických souvislostí z map percepčních prostorů do značné míry podobné. Výsledek faktorová analýza ovlivňuje počet a charakter vstupních proměnných (je třeba je proto předem omezit na základě nějakého kritéria). Pokud ale hodnocené atributy (a použité škály) dobře popisují zkoumaný fenomén, bývá interpretace výsledků faktorová analýza (prostoru z faktorů) snazší, protože z faktorů (zejména po rotaci) je přímo patrné, které důležité objekty je sytí a s jakou váhou (Melka 2005). U vnoření do MDS prostoru je nutné až dodatečně hledat souvislosti a sycení potenciálních dimenzí, a to až na základě úhlů mezi směrnicemi přímků vystihujících gradaci jednotlivých vnořených vlastností. Je proto vhodné používat obě tyto metody. Nalezené souvislosti jsou u obou metod silně závislé na použitém kontextu (*Ibid.*) a je tak nezbytné, před jejich zobecněním, porovnávat závěry z různých kontextů.

V této práci jsou používány jak interpretace faktorová analýza, tak i metoda multidimenzionálního škálování a výsledky jsou srovnány na kontextu několika typů zdrojů zvuku získaných v samostatných experimentech.

Manipulace signálu

Uměle generované zvuky a manipulace s jejich amplitudami, frekvencemi, fázemi či modulacemi mají podstatnou roli při poslechových výzkumech. Metoda syntézy tónu z jeho jednotlivých složek umožňuje vložení do signálu konkrétních změn na přesně určená místa

tak, aby bylo možné systematicky sledovat jejich vliv na vjemy, které následně popisují posluchači v poslechovém testu.

V této práci byla metoda použita při generování umělých signálů, které měly ověřit hypotézy o důsledcích časových změn v mikrostruktuře signálu (typicky jejich vliv na vjemy popisované atributy tvrdost, měkkost, bzučivost, drnčivost). Generovány, manipulovány a poslechově testovány byly tóny vždy se základní frekvencí $f_0 = 200$ Hz. Manipulovány u nich byly fáze jeho spektrálních složek s frekvencemi $i \times f_0$ ($i =$ celé číslo).

V této práci byly použity různé kombinace manipulací fáze. Základním efektem a cílem této manipulace s fází jednotlivých harmonických bylo vytvoření požadované změny charakteru zvuku. Ta byla posléze dána do souvislosti se součtem složek spadajících do jednotlivých kritických pásem, kde dochází k interferencím a změnám modulační obálky (a jejímu předbíhání či opožďování v čase).

Obecná výzkumnou otázka:

Jaké jsou aspekty barvy a kvality hudebních zvuků?

Cílem dílčích studií sestávajících v této práci bylo posoudit význam barvy zvuku pro různé okolnosti hudebního zvuku. Studie jsou zejména zaměřené na jeho kvalitativní posuzování. Souběžně bylo cílem odhalit doposud neprozkoumané obecné souvislosti a zákonitosti související s příčinou těchto aspektů. Studie se také zaměřila zejména souvislosti spojené s časovými okolnostmi zvuku a se zaměřuje na ty vnímané vlastnosti zvuku, které souvisejí s jeho časovou složkou.

Cílem sady dílčích výzkumu byl zjistit relevanci jednotlivých vlastností pro hodnocení jednotlivých okolností a jednotlivé aspekty či jejich zákonitosti. Souběžně také probíhal výzkum zaměřený na jejich sluchové okolnosti. Ten tvoří druhou dílčí část této práce. První studie měla za cíl prozkoumat fenomén barvy zvuku a jejího popisu na zvuku. Speciálně se studie zaměřila na srovnání a okolnosti popisů u transientní a zakmitané část a na obecné slovníky užívané pro popis intonace varhaní píšťaly. Vzhledem k širšímu záměru posoudit obecnou i percepční důležitost jednotlivých aspektů barvy zvuku na tuto část bezprostředně navazuje srovnávací část s okolnostmi jiného hudebního nástroje. Cílem studie pak bylo zjistit povahu daných charakteristik.

3 Praktická část

3. 1 Předchozí práce

Předkládaná práce navazuje na poznatky publikované v předchozích studiích autora, a tyto studie také představují pro směřování této práce širší badatelská východiska [autor se problémem aspektů zvuku zabývá dlouhodobě a téma disertační práce na tuto předchozí poznání a činnost navazuje]. Cílem následujících odstavců je shrnout relevantní obsah doktorandských a předchozích publikací. *Doktorandské paralelní publikace* představují především studie na subjektivní povahu a kvalitu hluku a ruchů, které autor řešil v rámci svého doktorského studia ale nebylo možné z tematického hlediska zahrnout do této práce (nejedná se o poznatky o hudebním zvuku). *Předchozí práce* pak představují přehled předcházejících publikací a poznatků autora, které této práci i tomuto záměru předcházely a práce na ně navazuje. Je to zejména autorská část práce Otčenášek a Otčenášek [2015]) která se zaměřila na okolností a objektivní i subjektivní povahu časové nepravidelností kmitání strun hudebních nástrojů a dvě práce na kvalitativní aspekty hluku a jejich souvislosti s obtěžováním (Otčenášek 2019 a Otčenášek 2019b). Podstatné náležitosti obou prací jsou shrnuty v samostatné části této práce.

Předchozí práce

Spojitosť s příčinou není pro řadu jevů barvy zvuku známa a mají často z hlediska hudebního zvuku příznak záhad [problém je blíže představen v předchozí části]. Na jejich poznání autor zaměřoval i předchozí práci. Z hlediska této práce jsou podstatné zejména studie projevů neperiodického kmitání struny houslí kterou shrnuje Otčenášek a Otčenášek (2015) a tabulka Tab. 1 níže. Na základě podkladů poslechového šetření se ukázala souvislost aperiodicit na struně a několika souvisejících atributů (křapavost, bzučivost a zastřenost), které ovšem nebylo možné rozlišit na základě standardních signálových parametrů a i navrhovaná metrika podobnosti po sobě jdoucích částí časového průběhu zvuku [hodnota korelace signálu s následujícím úsekem signálu po délce odpovídající f_0 tónu] (Orazio et al. 2011) pouze odpovídala křapavosti.

Hodnota korelace s následujícím úsekem vyjadřuje míru podobnosti a pravidelnosti cyklu s bezprostředně navazujícím a míru časových změn harmonického signálu. Její hodnoty na houslových zvucích z Otčenášek a Otčenášek (2015) dle zastoupení hlavního atributu ukazuje Tabulka č. 2. Uvedené hodnoty ukazují na periodickou povahu časových změn u bzučivosti.

Tabulka č. 2 Rozdíl autokorelačních hodnot mezi skupinami, statistická významnost rozdílu (Kruskall-Wallis H)

	Autokorelace (r)				Kruskall-wallis H		
	Průměr	Minimum	Maximum	Sm. Odch	Prům. pořadí	H	Asymp. Sig.
Bzučivost	0.99	0.92	1.00	0.02	145.70		
Zastřenost	0.97	0.79	1.00	0.03	101.30	125.70	0.00
Křapavost	0.67	-0.03	0.95	0.29	24.60		

Souběžné práce

Paralelně v doktorském studiu byl také proveden výzkum reprezentativních popisných charakteristik leteckého hluku (hluk letadel při vzletu) a byl navržen model jeho nepříjemnosti pro měřený kontext. Tato práce byla publikována ve studiích Otčenášek (2018) a Otčenášek (2019b). Souhrn poznatků o modelu nepříjemnosti, který je v uvedené studii ověřen a mohl by mít i souvislost s hudebním zvukem, je představen v závěru této kapitoly. Souběžně probíhal i výzkum distančních přenosů zvuku při hudební interakci a tento byl publikován v Otčenášek et al. (2022).

3. 2 Disertační studie

V této studii bylo provedeno několik dílčích experimentů s cílem zjistit jednotlivé odpovědi na výzkumné otázky. První část je založena na výzkumu popisných charakteristik barvy zvuku u přirozených zdrojů hudebního zvuku (hudební nástroje), druhá ověřovací část má za cíl výzkum konkrétních atributů spojených s časovou strukturou zvuku a je založena na syntetických zvucích a zkoumá fenomén z percepčního a sluchového hlediska.

Studie disertační části mají za cíl průzkum za účelem odhalení mechanismů percepce a odhalení základních atributů užívaných ke slovnímu slovní popisu zdrojů zvuku. Práce má také dílčí aplikované přínosy pro okolnosti zkoumaných zdrojů zvuku. Z tohoto důvodu lze studie následujících kapitol rozlišit do dvou částí. Studie zaměřené na *barvu zvuku* a jeho *posuzování* a studie na související *mechanismy sluchu a percepce*

a) Barva zvuku a jeho posuzování:

Cílem této části práce je rozšíření poznatků o struktuře hodnocení barvy zvuku prostřednictvím slovního popisu a dalších metod. Práce má povahu základního a popisného výzkumu barvy zvuku. K tomu jsou zde užity metody analýzy poslechových a slovních dat statistickými metodami (vícerozměrné škálování a faktorová analýza). Účelem je upřesnění kvalitativních poznatků o attributech zvuku či jejich latentní struktuře a také jejich propojení s vnímanou kvalitou zvuku.

b) Mechanismy sluchu a percepce

Cílem této části práce je ověřit poznatky předcházející části a rozšířit je na problematiku percepčních příčin a sluchu. Práce užívá syntetizovaných zvuků či manipulace parametrů signálu u nichž lze předpokládat teoretickou souvislost s atributy z předchozí části studie.

3. 3 Barva a posuzování zvuku

Popis problému

Společné rysy studií

Rozměrnost faktorového prostoru byla posuzována na základě vlastních hodnot a stálosti (bez přeskupování deskriptorů s přibývajícím rozměrností faktorů).

Byly uvažovány deskriptory s celkovou standardní četností 0.3 a shody $\frac{1}{4}$

Slovní data tak byla pro účely další analýzy standardizována.

Přirozené zvukové záznamy hudebních nástrojů

Podněty

a) Zvuk houslí

K této části byly využity záznamy zvuků a výsledky z poslechových testů z předchozího projektu kvalitu zvuku houslí⁷⁰. Archiv zahrnuje záznamy zvuků 30 houslí různé zvukové kvality a výsledky celé série poslechových testů prováděných s nimi na 5-ti tónových výškách, které byly v průběhu let 1991 až 1993 získány společně týmem výzkumných pracovníků Zvukového studia HAMU a výzkumného ústavu VUZORT.

Z archivních dat byly využity záznamy tónu h hraného na struně g (H3 v americké notaci, dále označovaného HG), které byl provedeny v bezodrazové místnosti technikou *détaché*, dynamikou *mezzoforte* (SPL 65 až 70 dB) v poloze smyčce *naturale*. Výška tónu uvedených záznamů byla dodržena s přesností ± 5 centů. Všem tónům byla následně pro poslech zkrácena doba trvání na 1.135 s a funkcí fade in a fade out jednotně upraveno rozeznění na 0.115 s a doznění na 0.17 s (úprava má efektivní důsledek na eliminaci vlivu různého provedení nasazení tónu). Jelikož různě kvalitní nástroje byly získávány a nahrávány postupně, nebylo možné zajistit unifikované nasazení tónu hudebníkem, když na ně hrál v různých časových odstupech (nahrávání těchto zvuků bylo rozloženo do 2 let).

b) Intonace píšťaly

⁷⁰ GAČR 202/93/2522 Percepční prostory barvy hudebního zvuku a jejich slovní popis. Otevřený dataset dostupný v MARC HAMU Data bylo možné vhodně využít k úvodní studii při řešení téma této disertační práce.

Jednotlivé zvuky reprezentují intonační nastavení, která představovala celkový rozsah možných intonačních parametrů na dané píšťale.

Zdroj zvuku představovala nastavitelná píšťala s elektronicky ovládanou vzdušnicí. Na píšťale byl upravován intonační parametr výšky výřezu (od 12 - 20 mm) a šířka průlinky (0.6 - 2 mm). Zvuk byl zaznamenán v bezodrazové místnosti, prostřednictvím interface Steinberg UR-44 (F_{vz} 98 kHz), na binaurální hlavu KU100 umístěnou od píšťaly v předním směru ve vzdálenosti 1,5 metru (umístění reprezentující obvyklou poslechovou polohu intonéra u intonační lavice). Záznamy dokumentují množství změn intonačních nastavení (výška výřezu, šířka průlinky a změna tlaku). K výběru z větší množiny zvuků (92 zvuků) bylo použito kritérium rozdílnosti barvy zvuku (shoda 3 posluchačů na nepodobnostech).

Každý záznam byl rozdělen na dva úseky. První úsek obsahoval část nasazení (určena jako část signálu od okamžiku nárůstu SPL_{RMS} nad SPL_{RMS} šumu pozadí a trvajícím po okamžik dosažení plného SPL_{RMS} v celém souboru [0.350 s]) a druhý úsek část zakmitaného stavu, který byl získán stříhem 1s dlouhého časového úseku počínaje 2s po nasazení zvuku. Zvuky byly opatřeny lineární fade-out a fade-in částí. Následné stimuly byly užity jako reprezentující pro obě části poslechového testu.

d) Struna houslí

Tato část využívá vlastní dataset autora vzniklý při předchozím výzkumu. Dataset je užit pouze v závěrečné srovnávací studii slovních hodnocení různých zvukových okolností (porovnání deskriptorů s nadprůměrnou četností mezi jednotlivými zvukovými okolnostmi)

Tuto část reprezentuje 9 podnětů o délce 1s. Ty byly náhodně vybrány ze stabilních částí znění tónu u záznamů prázdné struny G houslí buzené odlišnou rychlostí a přítlakem smyčce. Záznamy byly provedeny umělou hlavou KU100 v akusticky upravené místnosti (ČSN 73 0526). Tyto záznamy pak tvořily podmnožinu 27 zvukových záznamů u niž byl redukován v předtestech počet zvuků na základě shody tří posluchačů na jejich nejmenší nepodobnosti.

d) Hlas

Poslech byl proveden se 17 zvuky, které představují dvě části vybrané z 21 záznamů provedení árie *Donna Anna* z opery *Don Giovanni* (Mozart 1787). První část podnětů pocházela z rozmezí prvních 20. až 27. taktu⁷¹ a druhá část z rozmezí 81 - 93 taktu⁷² identických záznamů 17 různých provedení. Obě části tvoří identické a srovnatelné úseky ze shodných záznamů a představují část koloraturní a část s neseným hlasem. U nich lze čekat

⁷¹ Část *Recitativo e rondo* (...) s „neseným zpěvem (*sotto voce*)“ (Frič et al. 2019)

⁷² Část *Sentira pieta di me* (...)

odlišný charakter i podíl časových změn a liší se i širším obsahem hudebních částí (v první části jsou přítomny dlouhé tóny neseného zpěvu a ve druhé kolorатурní části změny mezi intervaly⁷³). Z hlediska zaměření této práce je tak část první nazývána stabilní a část druhá dynamická.

Poslechové testy

a) Housle

Tato část disertace využívá sekundární data ze dvou datových sad z poslechových testů zaměřených na jakost houslí a jejich zvuk. Těch se účastnilo celkem 20 posluchačů (pedagogové a studenti hry na housle). Posluchači v prvním testu hodnotili nepodobnost zvuku u 17 nástrojů předběžně vybraných na základě kritéria jejich rozdílné kvality. Ve druhém testu, jehož se zúčastnilo 10 posluchačů, pak posluchači hodnotili 11 zvuků vybraných na základě výraznější nepodobností barvy zvuku. Oba testy užívají metodu párového srovnávání s uspořádáním podnětů Ross (1939). U prvního testu byla metodou párového srovnávání hodnocena odlišnost mezi zvuky (rozmezí škály 0-11, 0 *žádná nepodobnost*) ve druhém testu posléze posluchači slovně hodnotili barvu zvuku a preferenci jednoho ze zvuků v páru. K poslechu byla užitá sluchátka Sennheiser HD 424.

U těchto poslechových dat již byla historicky ověřena shoda respondentů a byly sestaveny tři rozměrné percepční prostory získané multidimenzionálním škálováním. Cílem této studie bylo tyto výsledky dále rozšířit a původní rozbor již nebyl opakován. Předchozí studie na těchto datech identifikovaly 3 základní polární dimenze barvy zvuku (světlý-tmavý, úzký-široký, drsný-jemný) a jejich spektrální příčiny. V původní studii byla na základě spektrálních charakteristik pomocí těchto tří dvojic vlastností následně predikována preference vnímané kvality zvuku (Štěpánek a Otčenášek 2001).

b) Intonace píšťaly

Slovník je založen na sezeních s intonéry a varhanáři, kteří komentovali intonační kroky na retné varhanní píšťale.

Poslechový test proběhl poslechem *in-situ* s varhanáři. V poslechovém testu byly použity sluchátka HE60 a převodník RME ADI-2 pro. Hladina akustického tlaku ve sluchátkách byla kalibrována tak, aby odpovídala průměrné hladině akustického tlaku v místě záznamu. Poslechové testy určené ke sběru slovních dat vyplnilo 14 posluchačů (10 varhanářů a 4 posluchači se zkušeností posuzováním varhanního zvuku). Jednotliví

⁷³ Provází jí požadavek na *pohyblivost a zdobnost* (Frič et al. 2019)

respondenti test vyplnili odděleně v oddělených sezeních. Poslechový test byl naprogramován v software LiTEd (Lited). Administrátor testu respondenty informoval o okolnostech testu, jeho délce a účelu výzkumu. Samotný test měl dvě oddělené části:

Cílem první části bylo určit atributy a vlastnosti vhodné pro hodnocení zvuku varhanní píšťaly a samostatných částí jejího transientu a zakmitaného stavu. Respondenti měli za úkol popsat nejvíce vhodnou vlastnost na základě, které by bylo možné daný zvuk hodnotit. Test byl vykonán metodou párového srovnávání. Na každé obrazovce testu měli respondenti uvést jedno popisné slovo ke každému zvuku, které by vystihovalo rozdíl mezi zvuky. Na základě předchozích zkušeností bylo pro větší linearitu získaných odpovědí také dovoleno respondentům hodnotit zvuky absolutně. U získaných slov byla spočítána četnost výskytu a vyhodnocen význam získaných vlastností. Výrazně četné vlastnosti byly posléze užity ve druhém z testů, kde byly hodnoceny na hodnotící grafické škále.

Druhá část testu představuje aplikovanou rovinu této práce a byla zaměřena i na zhodnocení schopnosti respondentů škálovat dané vlastnosti na škále. Cílem bylo posouzení rozdílů mezi hodnocením transientu a zakmitaným stavem (hodnotící škála 0-100). V této části byly hodnoceny vlastnosti s vysokými četnostmi v první části.

c) Struna houslí

Test absolvovalo 20 osob (posluchači Univerzity Karlovy a HAMU), z toho 10 hudebníků a 10 hudebních laiků. V práci jsou užita pouze data ze sběru slovních atributů z testu provedeného metodou párového srovnávání (36 kombinací, Rossovo uspořádání podnětů). Úkolem posluchačů bylo popsat každý podnět na základě jeho odlišnosti od druhého předkládaného. Úloha byla pořadím první⁷⁴.

d) Hlas

Test byl administrován prostřednictvím aplikace Psychotest editor (Psychotest) v tiché místnosti na Hudební a taneční fakultě, sluchátek Sennheiser HD600. Jeho část probíhala formou volných komentářů ke každému zvuku v sekci poznámky. Úkolem hodnotitelů bylo také posoudit u každého stimulu dalších pět vlastností (míru *světlých* a *tmavých* složek, *vibrato*, *mohutnost* a *vhodnost* hlasu, hudební provedení, *pohyblivost*, kvalitu *vokalizace*⁷⁵) na vizuálně analogových škálách. Zesílení zvuku ve sluchátkách měl každý respondent nastavit na vhodnou a příjemnou a úroveň. Podnět bylo dovoleno přehrávat opakovaně. Test absolvovalo 24 osob (20 respondentů slouží k další analýze) s různou mírou pěvecké

⁷⁴ lze předpokládat nezávislost slovních hodnocení na dalších úlohách

⁷⁵ U slovních dat tak mohlo dojít ke vzájemnému ovlivnění s těmito kritérii; z hlediska výsledků ovšem lze předpokládat pouze význam pro *pohyblivost* a *tmavost* (*lehkost* škálována nebyla).

zkušenosti (pedagogové HAMU či jiných škol a amatérští zpěváci). Tato práce užívá data z volné části (slovní popis a hodnocení formou komentářů). Mimo to, poslechový test obsahoval i část škálovací i část otevřeného slovního hodnocení. Ten byl vždy sbírán společně s hodnocením na škálách a sestával z následujících, náhodně předkládaných částí s jedním podnětem na jedné obrazovce. Vedle slovních komentářů respondenti hodnotili ještě dalších 7 interpretačních kritérií (tyto části v této práci nebyly využity).

Postupy

a) Housle

K dosažení cíle této části práce byly použity na archivních datech metody představené v metodické kapitole (faktorová analýza a multidimenzionální škálování s ověřením dimenzionality). V návaznosti na účel této analýzy (identifikace percepčních dimenzí ze získaných vlastností zvuku a jejich spojitosti s kvalitou/preferencí) byla následně použita metoda vnořování jednotlivých vlastností a míry preference do percepčního prostoru pomocí vícenásobného regresního modelu. V tomto modelu byl zohledněno logaritmické gradování deskriptorů (vnořované proměnné). K získání informací o vztazích mezi vnořenými atributy v mnohadimenzionálním prostoru musely být využity úhly mezi regresními přímkami.

b) Intonace píšťaly

K vyhodnocení slovních dat byla užitá metoda slovní analýzy na jejímž základě byla stanovena četnost deskriptorů. Ta byla jednak následně užitá k určení unipolárních vlastností i k další analýze jejich významu a k tvorbě frekvenčních slovníků uživatelů. Nejčetnější atributy jsou považovány za reprezentanty nejvíce významných vlastností vhodných pro hodnocení či posouzení daného zvuku. Atributy a závislosti byly identifikovány jak pro nasazení, tak i pro zakmitaný tón, a jejich užití na obou částech bylo předmětem zhodnocení.

Zde byly považovány za vlastnosti souběžně užívané k hodnocení obou částí zvuku deskriptory s vysokými četnostmi u obou částí (porovnání bylo provedeno na základě faktorové analýzy i standardizovaných hodnot F_{std}). Výsledky analýzy slovních dat byly také užity ke zhodnocení shody respondentů. Z hlediska optimálního slovníku a shody na něm jsou pro většinu výstupů užívány deskriptory, které uvedla většina respondentů ($> 1/2$). Individuální odchylky byly také předmětem ověření v samostatném škálovacím testu ve druhé části výzkumu. Numerické hodnoty z druhého škálovacího testu byly užity k vypočtu vnitřitřídních korelačních koeficientů mezi respondenty (ICC 3.1) a Cronbachova α .

c) Struna houslí

Analýza slovních dat z poslechových testů pro účely souběžné prezentace v závěrečné části této studie zahrnovala součet četností (F_{abs}) jednotlivých deskriptorů a jejich následnou standardizaci pro porovnatelnost s daty ostatních zvukových okolností.

d) Hlas

Subjektivní popisná data z poslechového testu (doslovné komentáře respondentů získané v popisné části testu) byly dále předmětem analýzy pomocí metody kvalitativní obsahové analýzy a textové analýzy. Text byl rozčleněn na jednotlivé a samostatné části na základě oblastí s výskytem jednotlivých slovních přívlasků. Následně byly vypočteny jejich četnosti na každém podnětu a tyto hodnoty byly užity k indikaci míry označované vlastnosti. Veškeré atributy spojené s evaluativními soudy byly zároveň sloučeny do jednotlivé samostatné proměnné, která značila kvalitativní aspekty hodnocení. Takto kódovaná adjektiva byla zároveň také přiřazena k jedné z pěti rozvíjených druhotných kategorií, kterými byla označena jejich doména.

Statistická analýza byla provedena v software statistika (Statistica). Faktorová analýza (PCA) byla užita k odhalení faktorů struktury atributů a korelace mezi četnými atributy.

Zvuk houslí

Cílem této studie bylo znovu interpretovat sekundární data ze starších poslechových testů s novým přístupem, šířeji je srovnat s dalšími výsledky v této práci a posléze identifikovat vztahy mezi barvou zvuku posluchačskými preferencemi i mezi jednotlivými atributy vzájemně

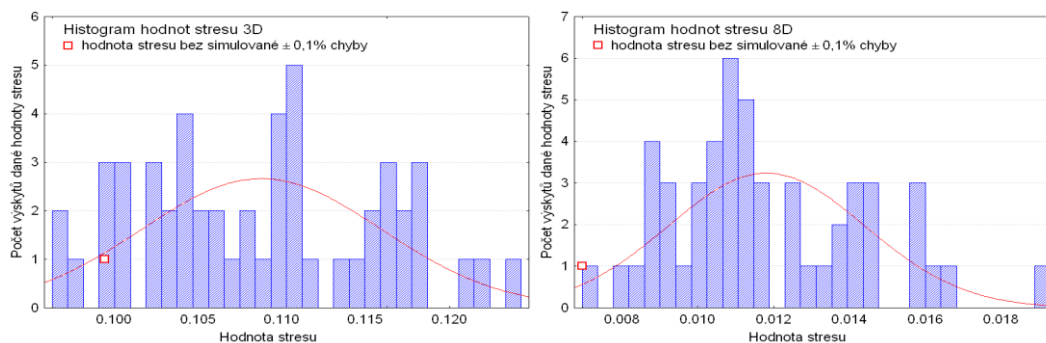
Interpretace dat

Jedním z přínosů této nové interpretace dat je snaha o zvýšení přípustné rozměrnosti řešení na základě jejího empirického ověření metodou náhodné chyby. Metoda byla také užitá v Otčenášek (2019).a je dále rozvedena v Kapitole 2. K výpočtu náhodně změněných vzdáleností byl použit vztah:

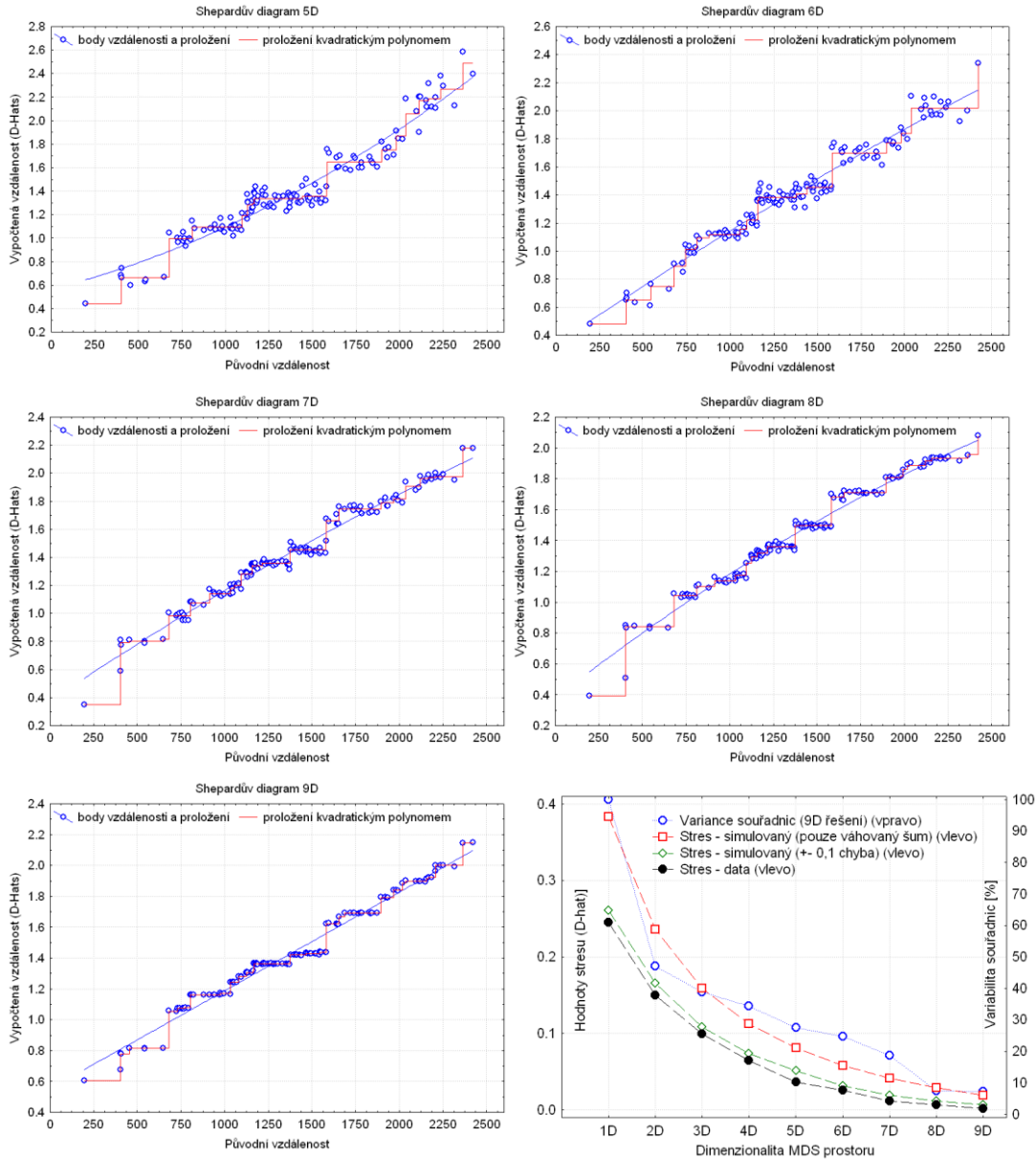
$$\delta_{ij} = \delta_{ij} + 0,2 \cdot \delta_{ij} \cdot (Rnd(1) - 0,5) \quad (Rnd = \text{náhodné číslo od 0 do 1})$$

Vývoj hodnot stresu náhodných prostorových konfigurací byl srovnán se stresem skutečného řešení prostřednictvím histogramů stresových hodnot 50 matic s náhodnou chybou vzdálenosti. Příklad srovnání rozložení četností stresových hodnot pro 3 (vlevo) a 8 (vpravo) dimenzí je uveden na Obr. 1 (červeně je vyznačena hodnota stresu z původních vzdáleností). Srovnání histogramů ukazuje jednoznačný a postupný úbytek hodnot stresu, které nedosahují původní vzdálenost (a tyto označuje poloha červeného bodu). Od 6D se již nevyskytuje žádná nižší hodnota.

Shodu vypočtených a původních vzdáleností pro narůstající počet dimenzí ze zkoumaných dat zobrazují také *Shepardovy diagramy* (viz Obr. 2). Od 6D nastává postupný pokles odchylek hodnot vypočtených vzdáleností od těch původních. U 9D se vyskytuje již velký počet vzdáleností stejnou hodnotou.



Obr. 1 Histogramy rozložení četností hodnot stresu 3 dimenzionálního (vlevo) a 8 dimenzionálního (vpravo) řešení při simulovaných chybách ve vzdálenostech (50 opakování)



Obr. 2 Shepardovy diagramy (vypočtené vzdálenosti vůči původním vzdálenostem) pro 5D až 9D řešení a (vpravo dole) hodnoty stresu pro původní vzdálenost (černě), simulovanou náhodnou chybou (zeleně), váhovaný náhodný šum (červeně) s váhami dle poklesu variance souřadnic (modře)

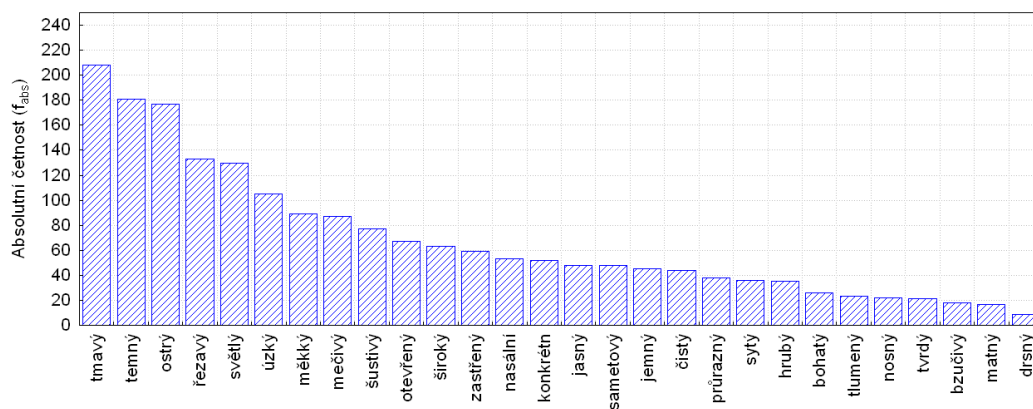
Pokles stresu řešení lze pozorovat i na grafu *scree plot*. (Obr. 2 vpravo dole). Jeho hodnoty byla při volbě vhodného řešení také posouzeny. Na grafu lze pozorovat výrazný pokles stresu až po 7D řešení (na Obr. 2 vpravo dole černě) a jeho hodnoty z původních vzdáleností jsou vždy nižší než u vzdáleností s náhodnou chybou (zeleně a červeně). Obdobně lze také pozorovat pokles variability dat souřadnic zvukových objektů (modře). Ten lze pozorovat od 7D řešení a je zejména patrný u 9D prostoru. Uvedené parametry tak indikují nenáhodná a strukturovaná data u těchto dimenzionalit a představují oporu pro jejich užití ke studiu vztahů mezi popsány vlastnostmi zvuků.

Četnost atributů

Četnosti popisných slovních atributů byly vypočteny nově vyvinutým algoritmem výskytu deskriptorů v párových slovních datech poslechového testu. Před jejich výpočtem byla u archivních slovních popisů z párových testů provedena analýza sémantické příbuznosti a společného výskytu na stejných zvucích metodou shlukové analýzy (nejbližších sousedů). Další analýza se omezuje pouze na sloučené atributy se shodou alespoň ¼ respondentů a minimální F_{abs} 11 (na 11 zvucích). Sloučení atributů proběhlo na základě výsledků shlukové analýzy spojením následujících popisů:

otevřený, znělý; čistý, průzračný; temný, hluboký; matný, zamlžený; zastřený, pod dekou; tlumený, přidušený, zavřený, utápnutý, hluchý; šustivý, zaprášený, žíně, kalafuna, šumí; hrubý, pískový, drhne, zrněný; řezavý, pronikavý, plechový, vysoký; mečivý, mečí; průrazný, agresivní; sytý, obsažný, střední, ozevný; široký, plný; bohatý, barevný

Přehled četností těchto atributů a jejich hodnoty představuje Obr. 3. Kritéria uvedená výše splnilo 27 popisných atributů⁷⁶. Uvedené četnosti výskytu na jednotlivých zvucích pak byly užity k vnoření jednotlivých atributů do společného percepčního prostoru metodou regrese.



Obr. 3 Absolutní četnosti slovních atributů se shodou alespoň >¼ respondentů (připojen je i atribut drsný, který uvedlo ¼ respondentů).

Faktorový prostor

K zjištění vztahů mezi atributy byla provedena faktorová analýza četnosti deskriptorů na každém zvuku (metoda *principal component* s rotací *varimax raw*). Dle hodnot vlastních čísel (uvedených pod každým faktorem na spodním řádku Tabulky č. 3) se jeví jako

⁷⁶ Do výběru je též z důvodu srovnání zařazený atribut *drsny* s F_{abs} 9

potenciálně vhodná 3, 6 a 8 faktorové řešení. Faktorový prostor atributů pro 8 faktorů a jeho uspořádání ukazuje Tabulka č. 3

Tabulka č. 3 Uspořádání a popis faktorů u zakmitaného stavu (popisná slova s vysokým sycením a ½ shodou respondentů).

Faktor	1	2	3	4	5	6	8		
	úzký	zastřený	syťý	zastřený	konkrétn	-	jemný		
+	světlý		bohatý						
	temný	otevřený	tlumený	bzučivý	šustivý	drsný	řezavý		
-	tmavý	nosný						č.	p
úzký	.96	.13	-.18	.01	.00	.06	.03	1	*
světlý	.93	-.03	.01	-.03	.13	-.22	.06	1	*
ostrý	.91	-.17	-.09	-.20	-.19	.03	.04	1	*
mečivý	.83	.14	-.17	-.22	-.17	.14	-.21	1	*
sametový	-.79	.28	.37	.24	-.09	.12	.07	1	*
tlumený	-.79	.34	-.41	.13	.10	-.12	.02	1,3	*
měkký	-.83	.25	.16	-.05	.13	.10	.10	1	*
tmavý	-.88	.12	.35	.19	.06	.02	.19	1	*
temný	-.89	.25	.11	.20	.05	.10	.25	1,8	*
jasný	.40	-.85	.14	.13	.22	-.07	.13	2	*
průrazný	.46	-.85	.12	.07	.06	-.08	.07	2	*
čistý	-.28	-.74	.47	.12	.09	-.09	.02	2	*
nosný	-.06	-.87	-.09	-.33	.28	-.17	.04	2	*
otevřený	.06	-.97	.09	.09	-.02	.15	-.10	2	*
syťý	-.08	-.36	.85	.21	.31	.02	.01	3	*
bohatý	-.34	-.04	.91	-.02	.06	-.09	.15	3	*
bzučivý	.35	.26	-.34	-.82	-.05	.03	-.08	4	*
zastřený	-.31	.45	-.39	.65	-.08	-.23	.13	4,2	
šustivý	.14	.19	-.19	.01	-.95	.03	-.03	5	*
konkrétní	.54	-.60	.12	.24	.49	-.02	-.02	5	
drsný	.09	-.04	.05	.07	-.04	-.99	.04	6	*
jemný	-.69	.14	.33	-.12	.26	.01	.23	7,8	
tvrdý	.40	-.61	-.30	-.14	.31	-.08	-.26	7	
řezavý	.61	.10	-.27	-.23	-.03	.12	-.67	8	
Vlastní hodnota	12.2	7.1	2.2	1.8	1.7	1.2	0.5		
Variabilita (%)	43.4	25.2	7.9	6.5	5.9	4.5	1.8		

Provedená faktorová analýza neslouží redukci proměnných a tak je zde dále zvolen prostor pro 8 faktorů. Výsledky umístění slovních atributů do jednotlivých faktorů a jejich sycení shrnuje Tabulka č. 3.

Preferenci lze ve faktorovém prostoru zohlednit přidáním této proměnné do faktorové analýzy. To je sice spojeno s mírnou změnou hodnot sycení faktorů jednotlivými atributy o variabilitu přidané proměnné, ale zároveň lze na základě hodnot faktorového sycení preference dále interpretovat souvislosti atributů jednotlivých faktorů s preferencí (kvalitou houslových tónů). Souvislost atributů syťících jednotlivé faktory s mírou preference je uvedena v Tabulka č. 4.

Tabulka č. 4 Hodnoty sycení jednotlivých faktorů mírou preference

faktor	1	2	3	4	5	6	7	8
sycení preference	0.83	0.35	0.35	0.04	0.20	0.02	0.06	0.13

Interpretace prostoru

Interpretaci percepčních prostorů byla provedena metodou vícenásobné regrese (pro představený prostor je užitá její logaritmická varianta) do 1D až 9D prostorů. Na zkoumaných nepodobnostních řešeních jsou základní vlastnosti⁷⁷ reprezentovány již percepčním prostorem s nižší dimenzionalitou, avšak při zvyšování dimenzionality prostoru lze pozorovat postupné zlepšení úspěšnosti vnoření i u dalších atributů. Příklad tohoto jevu je vyobrazen u atributu *řezavý* (zde je regrese úspěšná již při nízké dimenzionalitě) či atributu *bzučivý*, (s úspěšnou regreseí až od 8D) na Obr. 4 (*řezavý* atribut je vlevo a *bzučivý* vpravo). U obou atributů jsou patrné odchylky hodnot dané vlastnosti od její regreseí přímky (červeně). Úspěšnost vnoření všech deskriptorů lze také hodnotit i pomocí R^2 . Tento parametr je na grafech uveden v pravém dolním rohu a zároveň jej znázorňuje i vyobrazený konfidenční interval ($p .95$, modře). Příklady regreseí koeficientů jsou uvedeny na grafech vpravo dole. Jejich hodnoty byly použity⁷⁸ pro výpočet úhlu mezi všemi dvojicemi vnořených atributů a dané úhly pak slouží k identifikování jejich vzájemných vztahů v n -dimenzionálním prostoru. Rozdíl polohy zvuku (modré body) od hodnoty dané regreseí přímkou (červeně) indikuje neshodu pozorované četnosti atributu na daném zvuku od četnosti predikované regreseí přímkou.

Prostorové vztahy mezi atributy

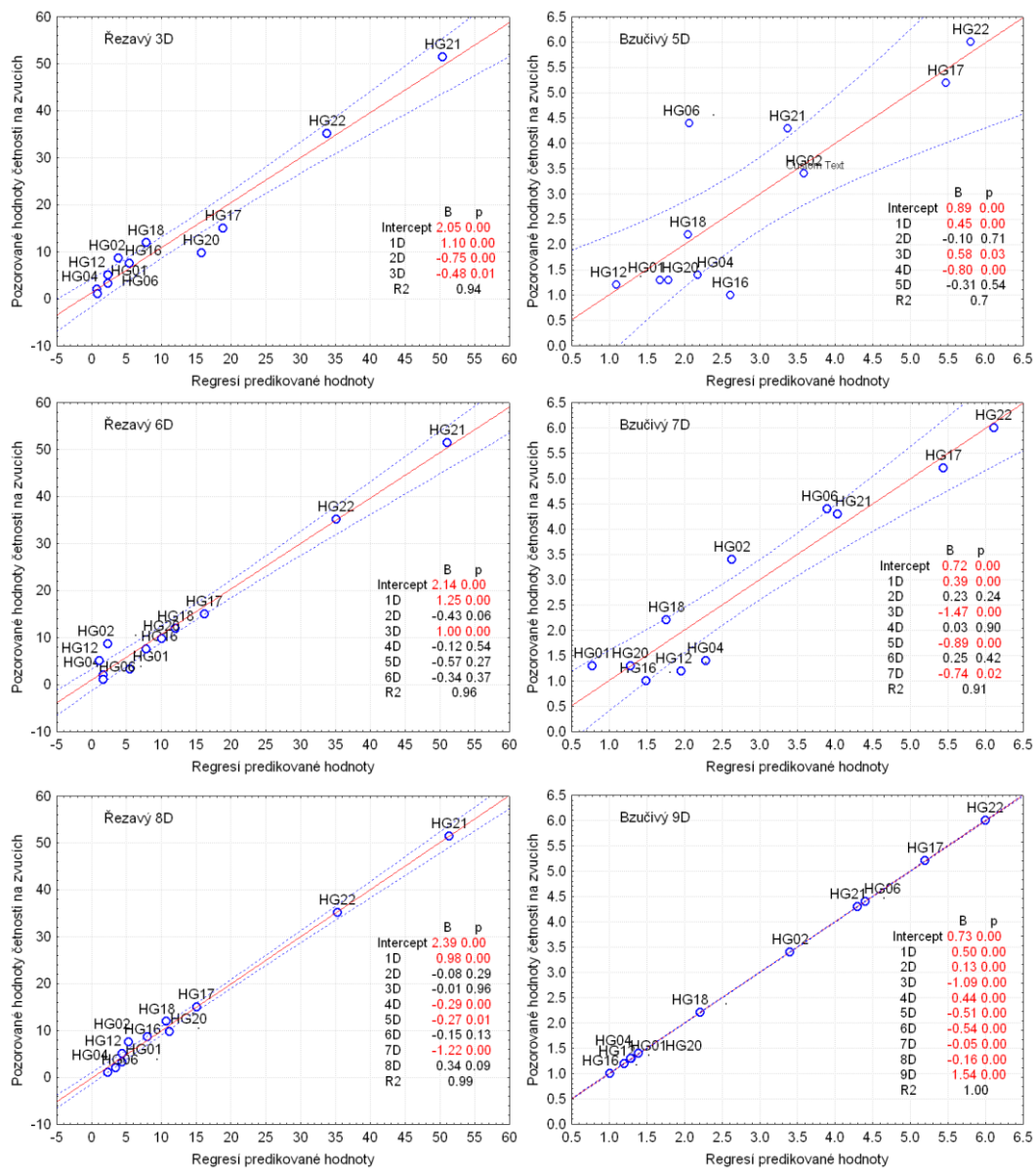
Vzájemné úhly mezi regreseími přímkami jednotlivých atributů a gradace preference shrnuje Tab. 5 (pro 7D MDS prostor). V tabulce jsou barevně odlišeny podobnostní vztahy mezi atributy. Při souběžném směřování gradace obou atributů (oba podobným směrem gradují) je úhel podbarven černě, při protiběžném (míra jednoho klesá a druhého proti němu stoupá) je podbarven modře. Ortogonální (nezávislé gradování prostorem je podbarveno červeně. Černě a modře podbarvené úhly představují souvislost. Ta může být způsobena podobností psychologické reprezentace zvuku, vzájemnou provázaností fyzikálních příčin na zvuku, ale i provázaností na jazykové úrovni, pokud několik vlastností tvoří vjem, u kterého respondent použije samostatné slovní pojmenování (vynořující se vlastnost). To je zde patrné u atributu *nosný*. Nosnost souvisí kladně s *jasností* i *tmavostí*, *měkkostí* a *ostrotí* a naopak záporně s *tlumeností* i *bzučivostí*, *sametovostí* i *řezavostí*.

Na základě toho lze diskutovat o tom, že hodnocením neměnného charakteru zvuku v rozličných vzdálenostech (jeho *nesení*) může souviset s určitou kombinací základních vlastností, přičemž tento vjem může obdobě provázet protiběžné vlastnosti (například *měkký*

⁷⁷ Vlastnosti, které jsou pro nepodobnost zvuku zásadní

⁷⁸ Mimo hodnotu interceptu

či *ostrý* tón). Děje vyvolávající *bzučivost* či *sametovost* naopak nemusí být se vzdáleností sluchem rozeznatelné (nepřispívají k nosnosti). Toto je námět pro nadcházející studie, jejichž rámec je naznačen v teoretické části této práce, ale zde tato závislost nebyla předmětem výzkumu.



Obr. 4 Příklad zlepšení úspěšnosti vnoření slovního atributu *řezavý* (vlevo) a *bzučivý* (vpravo) se stoupající dimensionalitou percepčního prostoru (shora dolů)

Výsledné vzájemné úhly mezi regresními přímkami jednotlivých atributů a gradace preference pro 8D MDS prostor shrnuje Tab. 6. V tomto prostoru se vývoj úhlů mezi vlastnostmi jeví jako ukončený. Vstupní matice nepodobností již nedovoluje smysluplnou vyšší dimensionalitu.

Tabulka č. 5 Úhly (°) regresních přímk v 7D percepčním prostoru mezi jednotlivými atributy. Barvy vyznačují souběžnost úhlů (černá <0° až 80°>, ortogonalitu červená <80° až 100°>, modrá <100° až 180°>. Spodní řádek uvádí je úhel atributů s preferencí.

	úzký	světlý	konkrétní	nosný	otevřený	jasný	čistý	jemný	sametový	měkký	tmavý	temný	matný	zastřený	tlumený	nasální	šustivý	bzučivý	hrubý	drsný	ostrý	řezavý	mečivý	průrazný	tvrdý	syť	široký	bohatý
úzký	0	39	65	85	86	73	97	93	123	97	108	113	92	93	114	72	94	96	74	81	40	65	53	70	74	87	86	87
světlý	39	0	76	82	105	71	83	81	94	80	90	99	79	89	119	91	75	116	67	73	56	77	90	79	81	78	74	71
konkrétní	65	76	0	54	39	49	66	70	123	69	74	87	75	76	97	38	112	122	112	94	46	99	73	29	45	55	66	81
nosný	85	82	54	0	70	24	53	42	117	46	59	74	56	91	119	65	98	102	104	73	62	123	95	48	66	37	32	49
otevřený	86	105	39	70	0	67	94	83	130	85	95	85	79	66	93	32	100	107	107	109	57	101	67	33	53	83	79	99
jasný	73	71	49	24	67	0	63	35	120	41	64	65	43	76	132	55	88	115	95	87	49	128	95	39	74	41	20	39
čistý	97	83	66	53	94	63	0	58	74	49	24	74	79	100	79	91	120	110	121	70	98	110	114	83	76	23	64	61
jemný	93	81	70	42	83	35	58	0	100	13	45	36	23	61	125	79	82	121	83	80	76	152	115	63	101	41	33	24
sametový	123	94	123	117	130	120	74	100	0	91	69	82	104	100	58	129	86	96	99	95	143	88	138	135	112	91	105	92
měkký	97	80	69	46	85	41	49	13	91	0	35	35	30	61	116	83	85	128	87	79	82	149	122	66	98	36	38	29
tmavý	108	90	74	59	95	64	24	45	69	35	0	52	64	81	84	95	109	119	109	77	105	129	127	86	94	30	62	52
temný	113	99	87	74	85	65	74	36	82	35	52	0	32	42	108	86	73	125	80	100	97	160	128	79	120	65	58	46
matný	92	79	75	56	79	43	79	23	104	30	64	32	0	44	138	77	62	126	68	89	70	150	114	60	106	62	38	35
zastřený	93	89	76	91	66	76	100	61	100	61	81	42	44	0	110	75	64	134	63	104	77	126	101	66	106	89	78	74
tlumený	114	119	97	119	93	132	79	125	58	116	84	108	138	110	0	103	128	78	126	98	131	66	90	118	83	98	134	130
nasální	72	91	38	65	32	55	91	79	129	83	95	86	77	75	103	0	101	107	114	124	45	103	69	32	59	75	65	84
šustivý	94	75	112	98	100	88	120	82	86	85	109	73	62	64	128	101	0	105	45	95	82	102	113	88	108	113	78	78
bzučivý	96	116	122	102	107	115	110	121	96	128	119	125	126	134	78	107	105	0	96	81	108	65	64	120	97	116	113	113
hrubý	74	67	112	104	107	95	121	83	99	87	109	80	68	63	126	114	45	96	0	70	80	90	88	97	119	115	94	83
drsný	81	73	94	73	109	87	70	80	95	79	77	100	89	104	98	124	95	81	70	0	93	81	85	99	85	78	92	85
ostrý	40	56	46	62	57	49	98	76	143	82	105	97	70	77	131	45	82	108	80	93	0	89	61	34	60	80	62	77
řezavý	65	77	99	123	101	128	110	152	88	149	129	160	150	126	66	103	102	65	90	81	89	0	57	110	70	123	136	140
mečivý	53	90	73	95	67	95	114	115	138	122	127	128	114	101	90	69	113	64	88	85	61	57	0	76	70	109	111	120
průrazný	70	79	29	48	33	39	83	63	135	66	86	79	60	66	118	32	88	120	97	99	34	110	76	0	53	66	53	74
tvrdý	74	81	45	66	53	74	76	101	112	98	94	120	106	106	83	59	108	97	119	85	60	70	70	53	0	77	85	108
syť	87	78	55	37	83	41	23	41	91	36	30	65	62	89	98	75	113	116	115	78	80	123	109	66	77	0	45	45
široký	86	74	66	32	79	20	64	33	105	38	62	58	38	78	134	65	78	113	94	92	62	136	111	53	85	45	0	28
bohatý	87	71	81	49	99	39	61	24	92	29	52	46	35	74	130	84	78	113	83	85	77	140	120	74	108	45	28	0
Preferenc e	101	89	68	59	94	69	9	60	72	51	21	72	81	98	73	93	125	108	123	72	104	111	114	87	80	28	70	64

Tab. 7 zobrazuje vývoj úhlů od 4D do 8D řešení mezi jednotlivými atributy a preferencí zvuku. U nižších dimenzionalit byla úspěšnost vnoření obvykle nižší. Barevně je proto odlišeno, zda je úhel ovlivněn tím, že nebylo možné najít správně směr přímk, kudy daná vlastnost v prostoru graduje (úhly černě), nebo, že byly ve více dimenzích lépe vystiženy nepodobnostní vzdálenosti. Úspěšné vnoření (a tudíž úhel vystihující skutečnou gradaci obou vlastností prostorem) je vyznačeno zelenou barvou ($R^2 > .9$) a modrou ($R^2 < .8$ až $.9$). Ve 4D a 5D prostoru nebylo příliš úspěšné ani vnoření míry preference zvuků (poslední řádek Tab. 7 uvádí hodnoty preference R^2 (R^2 pro 4D a 5D = $.67$ a $.7$). Vztah atributů s preferencí má proto výpovědní hodnotu až od 6D řešení.

Tabulka č. 6 Úhly (°) regresních přímk v 8D percepčním prostoru mezi jednotlivými atributy. Barvy vyznačují souběžnost úhlů (černá <0° až 80°>, ortogonalitu červená <80° až 100°>, modrá <100° až 180°>. Spodní řádek uvádí je úhel atributů s preferencí.

	úzký	světlý	konkrétní	nosný	otevřený	jasný	čistý	jemný	sametový	měkký	tmavý	temný	matný	zastřený	tlumený	nasální	šustivý	bzučivý	hrubý	drsňý	ostrý	řezavý	mečivý	průrazný	tvrdý	syťý	široký	bohatý
úzký	0	59	113	130	128	117	128	97	115	83	103	102	76	50	71	51	88	100	33	91	97	63	39	117	102	122	141	122
světlý	59	0	70	93	82	76	72	98	85	111	96	109	109	98	115	105	80	108	70	73	49	63	82	74	77	71	85	77
konkrétní	113	70	0	44	19	17	38	88	81	120	83	98	118	133	143	120	105	100	133	89	37	89	104	17	42	33	53	55
nosný	130	93	44	0	38	38	42	77	88	103	77	93	103	140	128	119	108	74	140	65	67	100	112	39	49	51	50	60
otevřený	128	82	19	38	0	18	36	86	72	122	79	93	120	141	149	129	96	94	139	87	44	95	111	16	48	34	41	46
jasný	117	76	17	38	18	0	40	75	75	110	70	87	106	131	149	120	98	99	131	88	38	100	105	6	48	42	48	48
čistý	128	72	38	42	36	40	0	81	62	111	73	87	115	137	134	144	94	102	131	70	48	101	135	40	60	23	33	39
jemný	97	98	88	77	86	75	81	0	66	50	15	26	43	75	100	88	88	112	89	90	85	151	101	78	104	93	81	63
sametový	115	85	81	88	72	75	62	66	0	91	52	54	93	100	119	135	51	117	93	94	67	124	131	74	109	69	47	34
měkký	83	111	120	103	122	110	111	50	91	0	61	51	18	56	56	65	91	96	76	107	109	129	94	114	118	125	104	104
tmavý	103	96	83	77	79	70	73	15	52	61	0	22	54	81	109	99	80	117	92	90	79	154	109	73	105	85	71	50
temný	102	109	98	93	93	87	87	26	54	51	22	0	47	68	91	89	81	119	88	103	94	163	108	90	119	96	82	63
matný	76	109	118	103	120	106	115	43	93	18	54	47	0	49	63	57	90	100	70	105	109	129	82	110	115	130	110	103
zastřený	50	98	133	140	141	131	137	75	100	56	81	68	49	0	49	40	85	116	44	109	120	100	61	134	119	137	139	121
tlumený	71	115	143	128	149	149	134	100	119	56	109	91	63	49	0	49	101	83	68	103	140	87	79	153	115	134	132	145
nasální	51	105	120	119	129	120	144	88	135	65	99	89	57	40	49	0	114	89	64	105	126	85	39	124	100	136	158	141
šustivý	88	80	105	108	96	98	94	88	51	91	80	81	90	85	101	114	0	101	62	96	77	93	98	94	107	104	70	75
bzučivý	100	108	100	74	94	99	102	112	117	96	117	119	100	116	83	89	101	0	102	71	111	71	84	97	90	101	93	108
hrubý	33	70	133	140	139	131	131	89	93	76	92	88	70	44	68	64	62	102	0	88	105	77	57	129	120	134	127	113
drsňý	91	73	89	65	87	88	70	90	94	107	90	103	105	109	103	105	96	71	88	0	96	78	95	87	81	76	84	79
ostrý	97	49	37	67	44	38	48	85	67	109	79	94	109	120	140	126	77	111	105	96	0	87	104	35	60	51	51	54
řezavý	63	63	89	100	95	100	101	151	124	129	154	163	129	100	87	85	93	71	77	78	87	0	61	97	69	91	108	120
mečivý	39	82	104	112	111	105	135	101	131	94	109	108	82	61	79	39	98	84	57	95	104	61	0	104	86	124	143	127
průrazný	117	74	17	39	16	6	40	78	74	114	73	90	110	134	153	124	94	97	129	87	35	97	104	0	48	42	46	47
tvrdý	102	77	42	49	48	48	60	104	109	118	105	119	115	119	115	100	107	90	120	81	60	69	86	48	0	61	72	88
syťý	122	71	33	51	34	42	23	93	69	125	85	96	130	137	134	136	104	101	134	76	51	91	124	42	61	0	47	45
široký	141	85	53	50	41	48	33	81	47	104	71	82	110	139	132	158	70	93	127	84	51	108	143	46	72	47	0	38
bohatý	122	77	55	60	46	48	39	63	34	104	50	63	103	121	145	141	75	108	113	79	54	120	127	47	88	45	38	0
Preferenc e	125	93	61	53	62	58	41	54	68	78	52	59	82	108	108	114	111	108	127	78	73	131	134	62	81	50	57	51

Kladný vztah atributu s preferencí znamená nárůst míry preference s nárůstem určité vlastnosti. Z 8D řešení v Tab. 7 je patrné, že souběžný a kladný vztah s preferencí (a tedy i kvalitou) mají u studovaného tónu atributy barvy: *čistý*, *jasný*, *jemný*, *sametový*, *měkký*, *tmavý*, *temný*, *široký* (tyto atributy se jako pozitivní vyskytují i u dalších zvukových okolností), *drsňý*, *ostrý*, *průrazný* (souvislost těchto atributů s kvalitou nelze obecně předpokládat, je zajímavým výstupem a může souviset s požadavky posluchačů na specifickou ostrost houslového zvuku), *konkrétní*, *syťý*, *bohatý*, *nosný*, *otevřený* (tyto atributy mají výrazně hodnotící charakter a u preferovaných houslových zvuků jsou požadovány). Protiběžný (negativní) vztah s preferencí mají atributy: *úzký*, *zastřený*, *tlumený*, *nasální*, *šustivý*, *hrubý* (tyto atributy se vyskytují i u dalších zvukových okolností), *bzučivý*, *mečivý*, *řezavý* (na houslovém zvuku je tak bzučivost vnímána negativně). Jako ortogonální (neutrální) vůči preferenci se zařadil atribut světlý (u studovaného tónu nemusí být světlost požadována).

Uvedené souvislosti jako také námětem k širšímu zobecnění a měly by být námětem navazujících výzkumů.

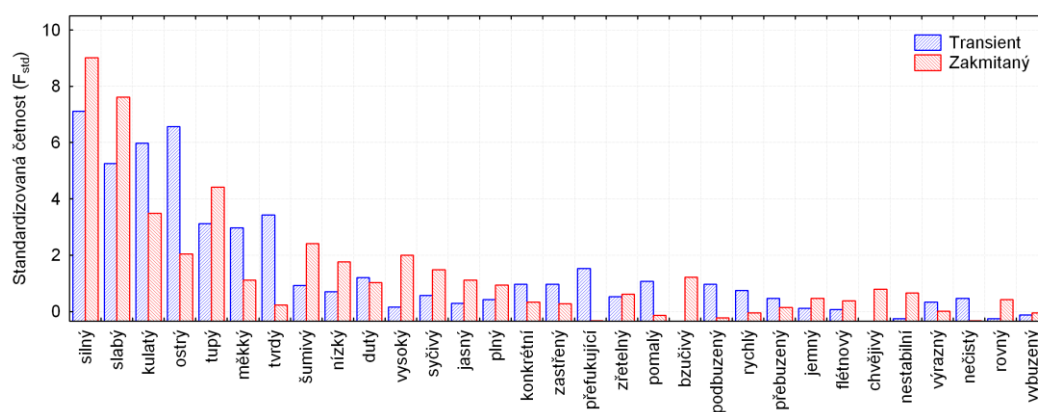
Tabulka č. 7 Úhly (°) regresních přímek v n -dimenzionálním percepčním prostoru pro tón H mezi jednotlivými atributy a preferencí. Barvy vyznačují úspěšnost regrese atributu: černá $R^2 < 0.8$, modrá $R^2 < 0.8$ až 0.9 , zelená $R^2 > 0.9$ (u preference jsou uvedeny přímo hodnoty R^2).

dimenzionalita	4D	5D	6D	7D	8D
úzký	115	107	109	101	125
světlý	117	98	97	89	93
konkrétní	98	71	60	68	61
nosný	100	83	53	59	53
otevřený	122	103	97	94	62
jasný	120	74	65	69	58
čistý	87	67	17	9	41
jemný	37	43	67	60	54
sametový	44	83	54	72	68
měkký	35	90	102	51	78
tmavý	30	48	40	21	52
temný	42	40	64	72	59
matný	56	98	116	81	82
zastřený	82	76	95	98	108
tlumený	62	73	87	73	108
nasální	84	76	81	93	114
šustivý	130	133	127	125	111
bzučivý	99	112	107	108	108
hrubý	128	135	127	123	127
drsný	121	95	69	72	78
ostrý	130	116	112	104	73
řezavý	127	115	114	111	131
mečivý	128	120	116	114	134
průrazný	129	101	92	87	62
tvrdý	109	91	78	80	81
sytý	43	35	15	28	50
široký	71	100	29	70	57
bohatý	54	69	14	64	51
Prefer. R^2	0.67	0.7	0.93	0.96	0.97

Intonace píšťaly

Tato část studie se zaměřila na aspekty barvy zvuku u nasazení a zněním tónu a na další souvislosti. Daný experiment se zaměřil na zvuk varhanní píšťaly o stejné frekvenci tónu jako zvuk ostatních částí této práce.

Obr 5. představuje hodnoty standardizované četnosti pro deskriptory se ¼ shodou respondentů (odděleně pro transient a zakmitaný stav). Jejich převažující část je shodně a s obdobnou relativní četností užívána pro popis transientu i u zakmitaného stavu (s výjimkou vlastnosti *bzučivý*). Nejvíce čtené vlastnosti zároveň tvoří významové protějšky, které také odpovídají protiběžným atributům faktorového prostoru.



Obr. 5 Srovnání standardizované četnosti výskytu deskriptorů (F_{std}) u transientu a zakmitaného stavu (seřazeno dle průměrné hodnoty).

Nejčetnější slova z analýzy slovních popisů užívané k hodnocení nasazení a tónu také uvádí Tabulka č. 8 níže. Na základě významu i výsledků faktorové analýzy níže na okolnostech tohoto zdroje tvoří komponenty unipolárních škál. Tyto vlastnosti představují na daných zvukových okolnostech nejvýznamnější vlastnosti a hodnotitelé se při jejich odděleném škálování také významně shodují (Tabulka č. 9). Z hlediska navazujících částí této práce i jejího zaměření je třeba zdůraznit význam deskriptoru *měkký* a *tvrdý*, který u transientu tvoří komponentu prvního nejvýznamnějšího faktoru faktorů⁷⁹.

Tabulka č. 8. Četnosti atributů kombinaci nasazení a zněním tónu; unipolární vlastnosti odpovídající atributům (vrchní část tabulky). Procento respondentů užívajících daný atribut (podíl, spodní řádka)

	Tvrdost		Kulatost	Ostrost		Síla		
	měkký	tvrdý	kulatý	ostrý	tupý	silný	slabý	
F _{abs}	Transient	33	33	62	68	33	69	53
	Zakmitaný	11	6	34	23	46	93	82
	Součet	44	39	96	91	79	162	135

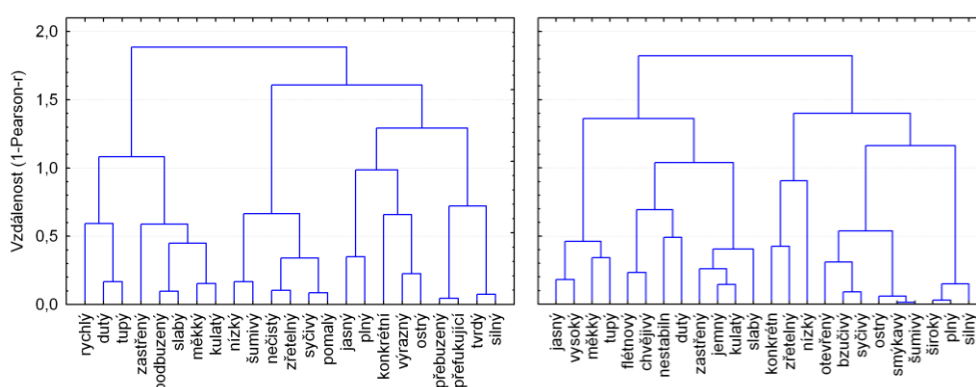
⁷⁹ nerotovaný faktor vysvětluje 37% variability dat

F_{std}	Transient	75	75	62.5	87.5	50	87.5	87.5
	Zakmitaný	62.4	50	75	50	75	100	100

Tabulka č. 9 Shoda hodnotitelů na posouzení atributu (transient a znění tónu) (Cronbachova α pro zakmitaný stav a transient)

Cronbachova α	Tvrký		Kulatý		Ostrý		Silný	
	Zakmitaný	Transient	Zakmitaný	Transient	Zakmitaný	Transient	Zakmitaný	Transient
	0.97	0.98	0.96	0.95	0.98	0.98	0.99	0.98

Výsledky shlukové analýzy na Obr. 6 představují přehled užívaných slovních atributů pro transient (vlevo) a zakmitaný stav (vpravo) a jejich souvislosti ($F_{std} > .4$). Z hlediska této práce je taktéž podstatná značná vzdálenost vlastnosti *bzučivý* od vlastnosti *měkký*



Obr. 6 Uspořádání deskriptorů (clusterová analýza): transient (vlevo) a zakmitaný stav (vpravo)

Tabulka č. 10 představuje faktorové uspořádání slovních dat pro transient i zakmitaný stav (deskriptory s $> .6$ sycením a $\frac{1}{2}$ shodou respondentů). S přibývajícím rozměrností faktorového prostoru nedochází k podstatnému přeskupování prostoru či vyčlenění faktorů (průměrná změna sycení faktoru nepřesahuje .1). U transientu i zakmitaného stavu se objevují obdobné deskriptory a i struktura faktorového prostoru je částečně obdobná (Tabulka č. 11). Z tohoto pravidla se vyděluje vlastnosti *bzučivost* v prvním faktoru zakmitaného stavu a vlastnost *tvrdost* u transientu.

Tabulka č. 10. Společné deskriptory s vysokou mírou shody ($\frac{1}{2}$) pro zakmitaný stav a transient (nahore). Další podstatné deskriptory (*bzučivý* a *tvrdý*)

	Transient			Zakmitaný		
	Faktor	Polarita	Sycení	Faktor	Polarita	Sycení
Nízký	4	-	0.66	3	-	0.61
Měkký	1	-	0.89	3	-	0.66
Slabý	1	-	0.85	2	-	0.86
Silný	1	+	0.82	2	+	0.91
Plný	3	+	0.85	2	+	0.9
Kulatý	1	-	0.8	1	-	0.61
Tupý	2	-	0.65	1	-	0.67
Šumivý	2	+	0.87	1	+	0.91

Syčivý	2 +	0.95	1 +	0.8
Ostrý	2 +	0.64	1 +	0.85
Bzučivý			1 +	0.86
Tvrký	1 +	0.91		

Tabulka č. 11 Uspořádání hodnotících faktorů u odděleného hodnocení transientu (vlevo) a zakmitaného stavu (vpravo) (popisná slova s vysokým sycením a ½ shodou respondentů, faktor, polarita, deskriptor a míra sycení).

Faktor	Polarita	Deskriptor	Sycení	Faktor	Polarita	Deskriptor	Sycení
1	+	silný	.82	1	+	šumivý	.91
1	+	tvrdý	.91	1	+	smýkavý	.88
1	-	kulatý	.80	1	+	ostrý	.85
1	-	slabý	.85	1	+	bzučivý	.86
1	-	měkký	.89	1	-	tupý	.67
2	+	ostrý	.64	1	-	kulatý	.56
2	-	pomalý	.81	2	+	silný	.91
3	-	dutý	.69	2	-	slabý	.86
3	-	podbuzený	.66	3	+	vysoký	.81
4	-	nízký	.66	3	+	jasný	.79
5	+	přefukující	.93	3	-	nízký	.61
5	+	přebuzený	.85	4	+	flétnový	.75
6	+	rychlý	.80	6	-	dutý	.80

Výsledky hlavního poslechového testu je možné posoudit na Obr. 6 a také v Tabulce č. 12. Jednotlivé zvuky se odlišují v průměrných hodnotách hodnocených vlastností mezi nasazením a zakmitaným stavem. Daný rozdíl je zde uveden jako rozdíl hodnocení a je prezentován v Tabulce č. 13 (výsledky Mann-Whitneyho testu statistické významnosti rozdílu a jsou označeny ve sloupci Sig.). Tabulka č. 12 ukazuje hodnoty Cronbach α pro škálované vlastnosti z hlavního poslechového testu. Tyto hodnoty jsou vysoké a indikují výraznou shodu respondentů na hodnocených vlastnostech. (tímto byla také posouzena shoda respondentů obecně).

Tabulka č. 12 Hodnota korelačního koeficientu deskriptoru pro oba intonační parametry (korelační koeficient, název deskriptoru a intonační parametr pro každou část zvuku)

Zakmitaný										Transient														
Tlaku ve vzdušnici					Výška výřezu					Tlak ve vzdušnici					Výška výřezu									
slabý	zastřený	jemný	vzdálený	kulatý	plný	široký	tvrdý	silný	bzučivý	jasný	tupý	slabý	zastřený	pozdní	měkký	přefukující	přebuzený	tvrdý	silný	pomalý	syčivý	šumivý	dutý	tupý
-0.9	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	-0.7	0.8	1.0	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	-0.8	-0.7	-0.6	0.8	0.8

Tabulka 13. Průměrný rozdíl, nejvyšší rozdíl a směrodatná odchylka rozdílu mezi hodnocením transientu a zakmitaného stavu, kondiční parametr pro závislost hodnot zakmitaného stavu a transientu, jejich korelace, a rozsah škály

	Kulatost	Ostrost	Tvrkost	Síla
Průměrný rozdíl	7.3	8.9	12.1	8.6
Nejvyšší rozdíl	18.5	35.0	27.0	18.6

Směrodatná odch.	5.1	8.3	7.6	5.5
Kondiční parametr	3.9	4.9	2.8	4.1
Rozsah škály	65	48	72.6	62.9
Korelace	.74	.81	.89	.84

Tabulka č14 Průměrná hodnota a rozdíl míry vlastnosti každého zvuku u transientu a zakmitaného stavu, statistická významnost tohoto rozdílu (p.)

Tvrдост			Kulatost			Ostrost			Síla		
Průměr	Rozdíl	p.	Průměr	Rozdíl	p.	Průměr	Rozdíl	p.	Průměr	Rozdíl	p.
59.5	11.0	*	13.5	4.0		72.1	8.2		62.5	3.0	
51.8	5.5		19.5	2.6		59.3	2.4		51.8	5.5	
38.3	8.5		25.8	12.5	*	43.6	4.1		35.4	1.8	
26.4	16.2	*	40.3	0.5		23.2	9.1		22.0	9.0	*
13.3	1.5		49.5	9.0		13.3	1.9		15.7	8.4	*
58.8	3.5		14.3	3.5		65.0	6.4		54.4	6.3	
45.6	15.2	*	19.3	9.5		54.4	7.2		45.2	15.7	*
20.6	12.2	*	46.5	15.0	*	22.2	35.0	*	19.1	1.2	
30.1	25.9	*	37.5	7.0		22.4	2.0		23.7	18.6	*
15.0	8.0	*	49.3	15.5	*	12.7	1.7		17.8	9.1	*
48.5	21.0	*	21.5	2.0		51.7	5.3		45.9	10.2	*
46.3	23.5	*	27.8	5.5		43.4	6.3		40.9	12.2	*
32.9	17.2	*	33.3	4.5		33.8	5.5		28.2	13.7	*
23.5	19.0	*	46.8	5.5		13.9	8.2		17.1	8.4	*
8.0	0.0		59.0	4.0		2.3	2.6		9.3	6.4	*
29.3	11.5	*	31.5	3.0		29.8	9.2		27.5	16.0	*
32.0	17.0	*	32.3	13.5	*	27.7	4.3		29.1	14.8	*
25.8	17.5	*	44.0	1.0		18.6	18.0	*	21.7	9.2	*
13.5	4.0		52.8	5.5		9.6	5.4		13.6	1.1	
7.0	8.0	*	59.0	2.0		5.1	1.2		8.5	2.1	
45.5	27.0	*	15.0	4.0		52.4	26.7	*	43.8	18.5	*
32.2	14.7	*	27.5	9.0		38.4	17.1	*	31.5	13.0	*
20.8	7.5		38.0	13.0	*	20.2	22.3	*	21.7	1.6	
6.8	4.5	*	42.3	18.5	*	6.3	5.2	*	9.0	6.1	*
1.5	3.0	*	24.8	13.5		4.2	8.4	*	2.3	2.4	

Popisné statistiky na zkoumaných zvucích a jednotlivé vlastnosti (průměrné hodnoty rozdílů hodnocení, jeho směrodatná odchylka a rozsah mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou a hodnota kondičního indexu a vzájemné korelace mezi nasazením a zněním tónu pro každou vlastnost jsou uvedeny v Tabulce č. 13. U žádné z uvedených vlastností nejsou hodnoty nulové. U *ostrosti* a *tvrđosti* jsou rozdíly největší (to také i vzhledem k celkovému rozsahu hodnocení) ale ve srovnání s *kulatostí* a *sílou* nejsou statisticky významné (to indikuje nižší shodu posuzovatelů na těchto rozdílech a jejich větší rozptyl). Naopak *kulatost* a *síla* mají značný počet statisticky významných rozdílů. Vhodnost těchto atributů k hodnocení varhanního zvuku ovšem podporuje vysoká shoda posluchačů při nezávislém škálování.

Popisná slova uvedená v této části studie představují přehled vlastností pomocí nichž lze popsat zvuk dané písky při procesu její intonace a také možná kritéria hodnocení jejího zvuku. Respondenti tyto vlastnosti užívali s vysokou četností jak pro hodnocení začátku tónu,

tak i stabilního zvuku (viz hodnoty pro *nasazení* a *transient* v Tabulce číslo 14 Vlastnosti užívané respondenty pro hodnocení obou fenoménů jsou výrazně shodné i přesto, že se míra daných vlastností může na jednotlivých částech zvuku (nasazení a znění tónu) podstatně lišit. U některých nasazení míra rozdílu přesahuje polovinu nejvyššího rozsahu hodnocení u daného rozsahu intonačních nastavení. Hodnoty odlišností se u jednotlivých nastavení podstatně liší.

Výsledky výše lze shrnout jako demonstraci rozdílů mezi nasazením a zakmitaným stavem a důkaz užívání stejných charakteristik pro nasazení a zakmitaný stav. Jedna z obou částí se však na stejném nastavení může podstatně lišit, a to zejména v situacích, kde není oproti tomuto experimentu možné ovlivnit vliv nasazení na stabilní část tónu (například při hodnocení varhanní píšťal *in-situ*). V těchto případech by mělo docházet k praktikování metod, které by tento vliv omezily. Mezi tyto metody například patří dodržování delšího časového zpoždění mezi hodnocením tónu a nasazení. Délka této prodlevy by měla přesáhnout délku sluchové krátkodobé paměti. Při praktickém posouzení je toto možné dosáhnout držením dlouhých držených tónů. Přesná délka dané prodlevy a další spojené aspekty tohoto fenoménu by měly být předmětem dalšího výzkumu. Tyto závěry také byly publikovány v článku Otčenášek (2019).

Hlas

Účel a cíle této části studie jsou uvedeny na jejím začátku v teoretické části vymezení výzkumného problému. Následující text představuje výsledky provedené faktorové analýzy, které jsou shrnuty v Tab. 14. Rozdíl mezi částmi (dynamická či stabilní) je uveden po straně grafů.

Prostor 4 faktorů reprezentuje významnou variabilitu dat, avšak celková vysvětlená variabilita je nižší, než u předchozích studií této práce. Četnosti jednotlivých nejčetnějších deskriptorů a jejich sycení v jednotlivých faktorech jsou uvedeny v Tab. 2. Atributy s nejvyššími četnostmi výskytu měly nejvyšší hodnoty sycení faktorů. Kladné hodnoty sycení faktorů pro lehkost ve všech faktorech obou částí naznačují význam a prominenci této charakteristiky v obou částech. Vysoké hodnoty ostrosti a úzkosti v prvním faktoru jsou takéž obdobné u obou částí a představují inverzní polaritu *lehkosti* (vedle polarity *těžkosti* a *pomalosti* (v případě dynamické části) a *tmavosti* a *objemnosti* (u stabilní části). Výsledky korelací (Pearsonových r) jsou uvedeny v Tab. 15. Vysoké korelace mezi lehkým, těžkým a tmavým atributy a slovně popsanou kvalitou naznačují, že jsou tyto aspekty spojené s jejím hodnocením u obou sekcí.

Tabulka č. 14 Faktorový prostor (atributy v dynamické a stabilní části, názvy faktorů, číslo faktoru, významnost).

Atribut	1	2	3	4	Č.	Sig.
	Ostrý, úzký Vyrovnaný	Těžký, pomalý Lehký	Tmavý Světlý	Kulatý Tmavý		
Stabilní	Ostrost	-0.90	-.11	.08	-.07	1 *
	Úzkost	-0.59	.39	.07	.05	1 *
	Kulatost	.23	.46	.12	-.20	2
	Lehkost	.42	.17	.79	.16	3 *
	Světlost	-0.37	.12	.48	-.40	3
	Tmavost	-.04	-.06	-0.52	-.61	4 *
	Mohutnost	.34	-.15	.14	-0.56	4
	Úzkost	-0.91	.10	-.06	.01	1 *
	Vyrovnanost	.69	.35	.11	-.02	1 *
	Ostrost	-0.62	.07	-.36	.34	1 *
Dynamická	Lehkost	.30	.67	.10	.24	2 *
	Pohyblivost	-.21	.34	.22	.03	2
	Pomalost	.16	-0.83	-.05	-.20	2 *
	Těžkost	.26	-0.88	.13	.14	2 *
	Těžkopádnost	-.14	-0.82	-.26	-.20	2 *
	Tmavost	.29	-.16	-0.75	-.02	3 *
	Světlost	-.07	-.11	.83	.01	3 *
	Zatmavenost	.16	.11	-.06	.55	4
	Kulatost	.06	.06	-.05	-0.57	4 *
	Vlastní hodnota	4.23	3.64	2.35	2.05	
Variabilita (%)	21.15	18.18	11.73	10.26		

Tabulka č. 15. Korelace podnětů a jejich souřadnic z faktorového prostoru s kvalitou

	Atribut	Kvalita	Sig.
Obě části	Tmavý - světlý	.58	*
	Úzký ostrý	-.37	
	Kulatý	.31	
	Lehký	.74	*
Dynamická	Tmavý - světlý	.27	
	Úzký ostrý	-.56	*
	Kulatý	.36	
	Těžký - lehký	.61	*
Stabilní	Tmavý - světlý	.49	
	Úzký ostrý	-.11	
	Lehký	.56	*
	Kulatý	.36	

Tabulky vlevo ukazují souvislosti mezi atributy a hodnocením kvality vzniklé sloučením hodnotících vlastností (vlastnosti jsou sloučený konzervativně na základě významové podobnosti jako *významová synonyma*, která odpovídají nejvíce směrodatným vlastnostem v jednotlivých faktorech). Všechny uvedené vlastnosti jsou vysoce četné.

Tabulka č. 16 Korelace podnětů a jejich souřadnic z faktorového prostoru s kvalitou

	Atribut	Kvalita
Obě části	Úzký - vyrovnaný	-.16
	Těžký - lehký	.46 *
	Tmavý - světlý	.63 *
	Kulatý, tmavý	-.10

V Tab. 16 jsou korelace *vypočítaných* hodnot jednotlivých stimulů ve faktorovém prostoru s kvalitou odvozenou ze slovních hodnocení. Korelace mezi jednotlivými vypočtenými faktory a hodnocenými vlastnostmi jsou významné a podporují paralelní souvislost lehkosti a světlosti s kvalitou.

Srovnávací studie

Srovnáním výskytu deskriptorů na všech nástrojů této práce byl vytvořen seznam popisných slov (deskriptorů, atributů či přívlastků) užitých k popisu převažující většiny studovaných zvukových okolností⁸⁰ (hudebního zvuku houslí, varhanní píšťaly a zpěvu). Seznam těchto popisných slov je uveden v Tabulce č. 17 U houslí i varhan se popis týkal především barvy zvuku, a lze tak očekávat, že tato slova představují univerzální popisné charakteristiky širší barvy zvuku. Tento slovník vznikl na základě poslechu zvuků a tím se odlišuje od jiných slovníků na jazykové bázi (Štěpánek a Moravec 2005).

Tabulka č. 17. Společně užitá popisná slova při 3 zvukových okolnostech (zvuk houslí, varhan, zpěvu)

	Housle	Varhany	Struna	Zpěv	Shoda		Housle	Varhany	Struna	Zpěv	Shoda
agresivní	●	●	●	●	4	plný	●	●	●	○	3
barevný	●	●	●	●	4	plochý	●	○	●	●	3
čistý	●	●	●	●	4	průrazný	●	○	●	●	3
hladký	●	●	●	●	4	přímý	●	●	●	○	3
jasný	●	●	●	●	4	přirozený	○	●	●	●	3
jemný	●	●	●	●	4	rovný	●	●	●	○	3
konkrétní	●	●	●	●	4	rozbitý	●	●	○	●	3
kulatý	●	●	●	●	4	rozpítý	○	●	●	●	3
měkký	●	●	●	●	4	řezavý	●	○	●	●	3
ostrý	●	●	●	●	4	silný	●	●	○	●	3
světlý	●	●	●	●	4	středový	●	●	●	○	3
široký	●	●	●	●	4	syčivý	●	●	●	○	3
temný	●	●	●	●	4	syťý	●	●	●	○	3
výrazný	●	●	●	●	4	škrábavý	●	●	●	○	3
zastřený	●	●	●	●	4	šustivý	●	●	●	○	3
bručivý	●	●	●	○	3	tenký	●	○	●	●	3
bzučivý	●	●	●	○	3	teplý	●	○	●	●	3
dmčivý	●	●	●	○	3	tlumivý	●	●	●	○	3
duťý	●	●	●	○	3	tmavý	●	○	●	●	3
dyšný	○	●	●	●	3	tupý	●	●	●	○	3
hrubý	●	●	●	○	3	tvrdý	●	●	●	○	3
hutný	●	○	●	●	3	úzký	●	●	●	○	3
chrastivý	●	●	●	○	3	vrzavý	●	●	●	○	3
chrčivý	●	●	●	○	3	vyrovnaný	●	●	○	●	3
kovový	●	○	●	●	3	vysoký	●	●	○	●	3
mírný	○	●	●	●	3	vyvážený	○	●	●	●	3
nasální	●	●	●	○	3	znělý	●	○	●	●	3
nosný	●	●	○	●	3	zřetelný	●	●	○	●	3
otevřený	●	●	○	●	3	zvonivý	●	○	●	●	3
pevný	●	●	○	●	3						

Zhodnocení

Krom dalších kvalitativních atributů se v Tabulce 17 či v jednotlivých dílčích studiích, ukazují jako univerzální a zároveň významné atributy *tvrdost*, *měkčnost* a také *bzučivost*. *Bzučivost* lze považovat za prominentní hodnotící vlastnost jak u varhanního, tak i

⁸⁰ Se shodou alespoň 2 respondentů

houslového zvuku. Atribut *bzučivost* představuje komponentu faktorového prostoru posuzování zvuku obou zkoumaných nástrojů. U zvuku intonované píšťaly se vlastnost projevila pouze u pseudostacionární části tónu, což dále potvrzuje její souvislost s časovou periodicitou, jak byla studována v experimentech s umělými zvuky při ověřování významu jemné periodické časové proměnnosti.

Na dané vlastnosti se tak blížeji zaměřily aktivity v následující kapitole *sluch*. Jejich bližší směřování se zejména odvíjelo od pozorování autora o značné různosti posunů relativní fáze složek zvuku u houslí i u elektroakustických měničů, jejichž percepční projev odpovídal zkoumaným vlastnostem (*bzučivost* či *měkkost*). Při specifické formě spektrální analýzy prostřednictvím změn spektrogramu s krokem f_0 také autor při předběžných bádání u *bzučivých* zvuků pozoroval drobnou střídavou změnu rozsahem přesahující několik sousedních harmonických (jev naopak nebyl pozorován při delších časových oknech či pro jednotlivé harmonické).

3. 4 Sluch

Cílem této části práce je ověřit předchozích poznatky o časových aspektech zvuku prostřednictvím syntetizovaných zvuků a související manipulace parametrů signálu u nichž lze předpokládat teoretickou souvislost s atributy z předchozí části studie. Hlavní část studie užívá generovaných podnětů generovaných aditivní syntézou (součet sinusových časových průběhů) s proměnlivými fázovými posuny harmonických složek. Hlavním cílem bylo ověření souvislosti s časovým aspektem u atributů bzučivý a tvrdý a vedlejším cílem byl také širší průzkum tohoto druhu zvuků a jeho spojitostí s percepcí. Na základě průběžného poznání byl pokus také rozšířen o téma změn jemné časové struktury. Výzkum probíhal v několika fázích. Krom hlavního výzkumu první části byla také provedena doplňující studie zaměřená na dílčí rozšíření výsledků hlavní části.

Metody

Studie sestává ze čtyř pokusů. Jejich cíle, design a členění popisuje Tab. 18 níže.

Tab 18. Design studie (části, design, cíle)

Pokus č. 1: Ověření podmínek předpokládaného fenoménu	
Hlavní část	Design Poslechový test s tóny se změnami fáze 1 - 10 harmonické 200 Hz tónu ležících mimo kritická pásma. Označení největšího rozdílu na škále žádný, nepatrný, malý, střední, větší
	Cíl Potvrdit závislost pozorovaného efektu na ději uvnitř kritického pásma
	Parametr.. Náhodné posuny fáze 1-9 harmonické (harmonické nespádají do stejného kritického pásma)
Pokus č. 2: Hlavní průzkum slyšitelnosti změn fáze složek tónu (jejich projevů i příčin)	
Hlavní část	Design Poslechový test s náhodnou změnou fáze 10 – 27 harmonické 200 Hz tónu (škála 0-100)
	Cíl Zjistit na větším vzorku posluchačů slyšitelnost a subjektivní charakter vnímání časových změn a jejich širší sluchové souvislosti (například časová struktura a její odlišnost mezi kritickými pásmy).
	Parametr Náhodné posuny fáze harmonických v kontrolovaném rozsahu φ_{max}
Pokus č. 3: Průzkum nelineárního průběhu percepční závislosti	
Doplňující studie	Design Poslechový test s řízenou změnou fáze a jemné časové struktury
	Cíl Blížeji prozkoumat pozorovanou percepční nelinearitu a její souvislost s mechanismem zpřesňování sluchové informace
	Parametr Prezentace stimulů s postupnou změny fáze mezi třemi po sobě jdoucími harmonickými (10 – 27 harmonické 200 Hz tónu) (škála 0-100) při odlišném SPL.
Pokus č. 4: Ověřit závislost změn na dějích sousedního kritického pásma	
Doplňující studie	Design Poslechový test s řízenou změnou fáze v sousedících a nesousedících pásmech
	Cíl Ověřit souvislost jevu s proměnností jemné časové struktury v sousedícím kritickém pásmu
	Parametr Posun φ_{dif} u nichž lze předpokládat postupný a vývoj fázového zpoždění časové struktury.

Percepční reprezentaci fázových posunů potvrzenou prvním pokusem lze vysvětlit na základě interferenčního působení na bazilární membráně. Druhá část této studie⁸¹ se proto zaměřila na průzkum a ověření sluchových aspektů jevů indikovaných v první části studie. Cílem pokusu této části bylo ověřit závislost jevu na interakci více harmonických v sousedních pásmech a prozkoumat podrobněji nelineární závislosti odpověďové proměnné a jejich hypotetické příčiny⁸². Tou by mohla být funkce zpřesňujících chobotnicových buněk na sluchové dráze.

Při nižších hladinách akustického tlaku dochází ke zvýšení spontánní aktivity na vláknech sluchového nervu a s tím spojeného dřívějšího opuštění tolerančního pásma chobotnicové buňky. Z toho lze usoudit, že pozorovaná nelinearita bzučivosti a měkkosti bude menší při menších hladinách a naopak větší při vyšších.

Podněty

Hlavní část této studie je založena na poslechovém experimentu se syntetizovanými zvuky s proměnlivými fázovými posuny harmonických složek (9. - 27. harmonická 200 Hz tónu). Příslušnost jednotlivých harmonických do kritických pásem prezentuje Tab. 19. Celková podoba užitých podnětů byla předmětem předchozího rozsáhlého bádání a zkoumání daného efektu a poslechem mnoha variant s malou skupinou posluchačů (série předtestů). Konečná podoba podnětů proto odráží celou předchozí anabázi a je stanovena zejména na základě nejlepší demonstrace zkoumaného efektu: posuny v nižších harmonických nebyly žádným z posluchačů shledány jako percepčně odlišné a tak zde nejsou prezentovány.

Tabulka č. 19 Kritická pásma, Rozsah kritického pásma (střední hodnota, šířka, hranice, počet harmonických v pásmu)

Pásma	Rozsah kritického pásma				Spádové harmonické		
	Střed	Šířka	Spodní	Horní	Spodní	Horní	Počet
13	1848	272	1720	1983	9	9	1
14	2192	309	1983	2346	10	11	2
15	2693	369	2346	2877	12	14	3
16	3308	453	2877	3535	15	17	3
17	4064	566	3535	4347	18	21	4
18	4993	710	4347	5348	22	26	5

Pro zachování sklonu harmonického spektra podobného zvukům přirozeného charakteru byla každá tónová sin složka generována s poklesající amplitudou $1/f^{83}$. Pro každou harmonickou byl použit generátor náhodných čísel ke generování náhodných hodnot fázového posunu (φ) v min-max rozsahu. Minimální a maximální rozsah pro náhodný posun byl shodný pro všechny harmonické každého generovaného tónu a byl určen rozmezím

⁸¹ Zejména jemná časová struktura

⁸² Angl. *Elbow*

⁸³ Po ověření, že tento parametr nemění pozorovaný jev

stálého minima (0°) a proměnného maxima (φ_{\max}). Jeho hodnota sloužila k řízení rozptylu φ . Celkem bylo užito šest úrovní hodnot φ_{\max} (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 270°). Pro každé z jednotlivých φ_{\max} bylo vytvořeno pět tónů s tímto rozsahem (pouze u stimulu s 0° φ_{\max} nebyla odchylka žádná a tak byl vytvořen pouze jednou). Celkem bylo generováno 26 stimulů v 6 skupinách stimulů s různými hodnotami φ_{\max} (Tabulka č. 20

Tabulka č 20 Fázové posuny jednotlivých harmonických [$^\circ$] na jednotlivých zvucích (fázový úhel a frekvence posunutých harmonických; zaokrouhloeno na celá čísla)

	45°					90°					135°					180°					270°				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
2000	0	7	0	1	41	86	69	36	84	30	10	120	24	86	56	39	176	20	174	107	86	72	40	186	256
2200	38	5	34	2	9	92	45	83	3	81	114	34	26	32	50	123	131	45	11	178	80	45	94	17	249
2400	6	38	31	4	12	108	68	62	70	70	93	116	77	97	112	77	130	102	89	6	26	70	183	10	261
2600	14	17	3	28	44	61	11	54	1	3	20	1	124	98	56	94	33	11	78	132	68	71	111	20	108
2800	29	31	22	44	31	19	18	80	18	86	78	47	7	21	77	164	2	169	27	138	45	76	156	35	151
3000	24	15	7	28	42	155	13	62	30	61	17	78	114	54	14	114	172	7	103	124	61	10	164	77	56
3200	1	20	34	26	19	86	16	32	8	48	47	64	125	92	86	141	108	147	37	123	12	56	177	134	242
3400	2	41	4	11	26	128	40	87	84	22	130	57	86	36	122	58	107	41	10	164	41	34	103	5	11
3600	1	9	30	36	17	76	9	11	33	5	112	80	53	15	28	164	46	178	76	143	26	83	114	184	70
3800	15	22	35	4	26	48	67	11	90	1	129	55	133	28	130	137	2	76	25	170	140	85	265	85	226
4000	18	9	44	44	24	126	10	54	60	21	128	56	117	122	40	97	135	3	163	175	25	73	45	131	201
4200	13	43	42	43	23	67	29	18	1	49	16	83	128	70	32	91	92	73	13	58	47	159	193	31	224
4400	13	36	42	37	0	24	66	80	55	89	77	73	42	59	130	53	54	173	4	23	36	96	100	152	231
4600	27	11	43	14	13	50	72	24	23	27	82	68	45	59	42	175	5	164	58	145	28	56	177	72	196
4800	32	19	23	11	22	29	16	9	89	22	44	60	126	60	6	130	72	122	23	116	120	9	218	258	35
5000	40	7	5	42	19	91	8	46	81	46	37	35	59	134	17	129	29	31	159	17	108	27	146	140	45
5200	24	23	14	0	41	63	64	86	54	6	66	105	13	101	106	43	129	162	173	18	117	58	101	104	127
5400	41	14	33	7	3	39	1	29	83	61	92	114	50	6	75	79	81	167	70	70	140	113	96	166	37
5600	16	6	17	0	30	60	45	47	41	4	94	109	32	106	48	148	40	13	10	112	235	235	58	81	97

Pro srovnání byly také vytvořeny dva další podněty; 1kHz sinusový tón a 1kHz sinusový tón modulovaný 70Hz (1 asper). Všechny podněty byly opatřeny lineárním zesílením a zeslabením⁸⁴. Podněty byly v poslechovém testu prezentovány při hladině akustického tlaku 60 dB. Obdobně bylo také generováno 10 podnětů s náhodnými posuny φ_{\max} u harmonických v rozsahu 0-10.

V následné části jsou pak užito 17 podnětů s nenáhodným posunem fáze mezi sérií trojic po sobě následujících harmonických mezi 9. - 27. harmonickou 200 Hz tónu. Hodnoty se postupně na jednotlivých tónech zvyšují od 0° až po 180° a jsou užity ve třetím pokusu.

⁸⁴ Angl. *fade-in* a *fade-out*

Pro čtvrtý pokus bylo vytvořeno 9 podnětů s odlišným φ_{dif} u harmonických v rozsahu kritických písem 15-16, 16-17, 15-17.

Hladina akustického tlaku při prezentaci obou těchto podnětů byla zvolena ve dvou polohách lineární oblasti pro fázovou synchronizaci na sluchovém nervu (40 a 60 dB).

Poslechový test

Poslechové testy první části byly provedeny se 17 dobrovolnými posluchači (věkové rozmezí 24 - 50 let) v akusticky upravené místnosti. K zajištění všech testů byl shodně použit jakostní převodník ADI-2 pro a kalibrovaná elektrostatická sluchátka HE-60. Pro uvedený řetězec byla ověřena nízká míra elektroakustického zkreslení a zanedbatelnost rozdílů fázové přenosové funkce ve frekvenčním rozsahu zkoumaných tónů⁸⁵. Hladina akustického tlaku uvnitř sluchátek byla kalibrována a dosahovala 40 a 60 dB (v závislosti na daném pokusu). Programování a administrace poslechových testů probíhalo v prostředí LiTEd (lited). Test trval celkem 1 hodinu; účastníci byli administrátorem poučeni o dobrovolné povaze testu, jeho účelu⁸⁶, době jejího trvání a možnosti přestávky. Test se skládal ze dvou částí: Spontánní verbální úlohy, ve které respondenti popsali vhodné deskriptory pro každou ze dvou současně prezentovaných skupin podnětů s 0° a 270° φ_{max} (deskriptory byly shromážděny do textového pole). Respondenti hodnotili atributy na hodnotící stupnici ([0] nulová míra vlastnosti, [100] maximální míra vlastnosti). Mimo samotné podněty byly taktéž generovány dva referenční podněty (viz část podněty). Úkolem respondentů v hlavním hodnotícím testu bylo u všech stimulů posoudit míru⁸⁷ stanovaných atributů. Respondenti měli za úkol podněty ohodnotit na dle tří volně zvolených atributů ze seznamu deskriptorů z první části testu. Jednotlivé atributy ke škálování mohli zvolit dle libosti (seznam deskriptorů popsaných v předchozím testu sloužil pouze jako pomůcka). Jednotlivé vybrané vlastnosti byly hodnoceny ve třech samostatných úlohách *metodou seřazování a hodnocení popisných atributů*⁸⁸. Při každé úloze bylo úkolem posluchače zvuky seřadit souběžně předložené zvuky a pak je následně ohodnotit na škále od 0-100. U každého atributu byly zvuky předloženy různým respondentům v různém náhodném pořadí. Během testu také docházelo ke sběru dodatečných slovních popisů, které asistent zapisoval do protokolu.

Dodatečné dva poslechové testy byly provedeny s podmnožinou posluchačů prvního testu. Test sestával také ze dvou částí. Úkolem respondentů první části bylo ohodnotit míru daného atributu u plné sady stimulů s různými posuny z hlediska nejčtetnějších atributů z úvodního experimentu: *bzučivosti, drnčivosti, tvrdosti a měkkosti* (v libovolném pořadí). Následně při poslechu tří kombinací zvuků (na postupných obrazovkách byla respondentům

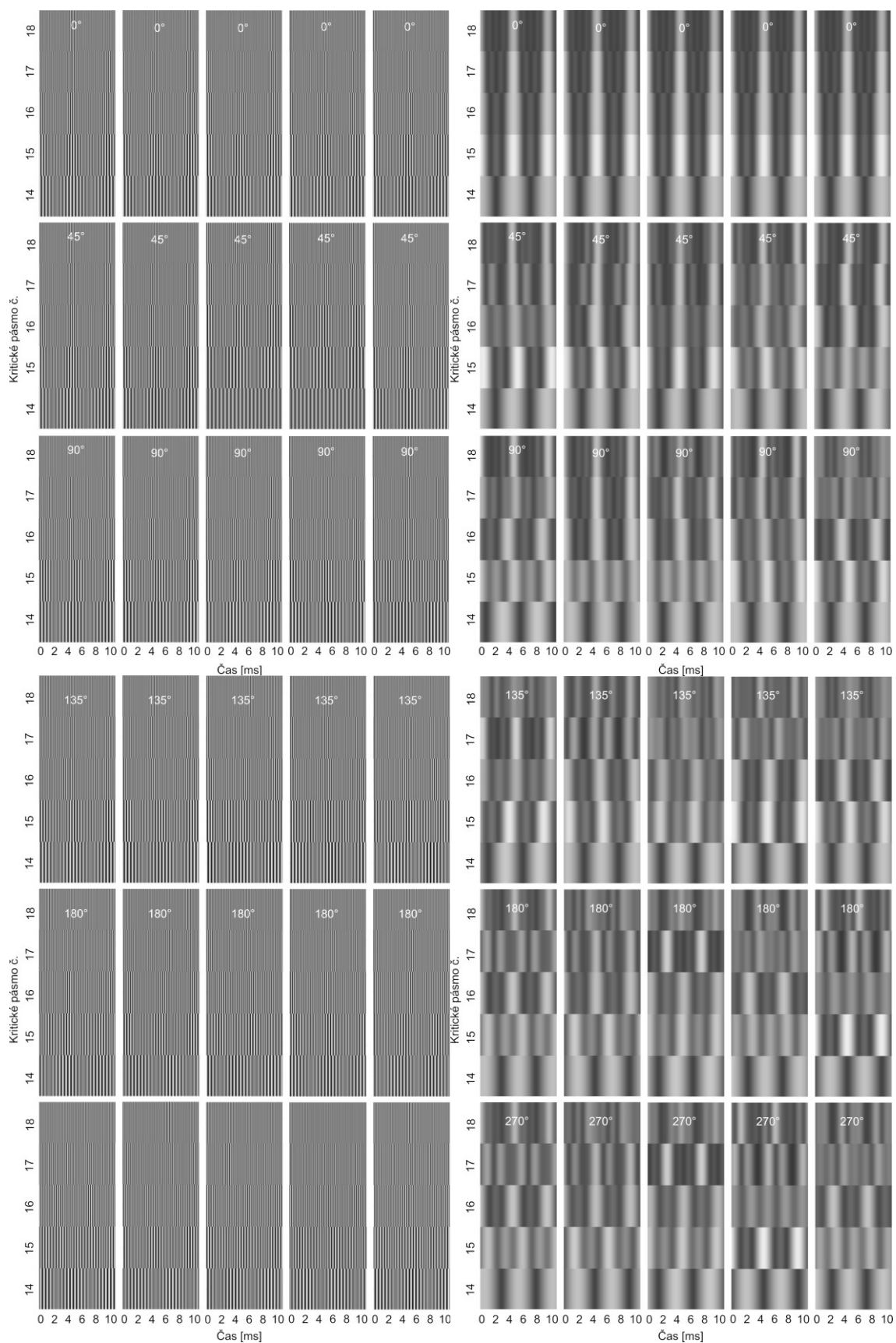
⁸⁵ Metoda mlssa a logaritmického hvizdu

⁸⁶ Získání percepčních dat k rozšíření znalostí o lidském sluchu a hudebním zvuku

⁸⁷ Angl. *Magnitude*

⁸⁸ Angl. *Verbal attribute ranking and rating*; (VARR) (Štěpánek 2002), metoda odpovídá metodám *hodnocení míry* (Hajda et al. 1997)

předkládána trojice zvuků s posunem φ_{dif} v jedné z kombinací kritických pásem (15 a 16, 16 a 17 a 15 a 17).



Obr. 7. Časové průběhy sloučených harmonických v rozsahu kritického pásma (vpravo), proložení křivkou loess (vlevo)

Analýza

Pro následující analýzy jsou užitá data z hlavních poslechových testů (data ze slovního popisu a škálování jednotlivých atributů z hlavního testu), data signálu jednotlivých harmonických i data z doplňujících studií (u těch byl při zpracování aplikován obdobný postup jako pro data z hlavní studie). U slovních hodnocení z hlavního testu byl proveden rozbor jednotlivých přívlastků a na základě jejich četnosti stanoveny nejčastější deskriptory (F_{oc}) a u hodnocení ze škálovacího testu byla zhodnocena shoda respondentů (*Cronbachovo* α ($\alpha > .91$)). Respondenti užívali u obou úkolů jen několik atributů a ty byly většinou synonymní. I další atributy byly značně korelované s nejčastějším atributem⁸⁹ ($r > .80$). Jejich hodnocení pak bylo sloučeno do jediné proměnné, zejména u *měkkosti* a *tvrdosti* (další sloučené atributy pak uvádí Tab. 18). Pro jednotlivé podněty byly vypočteny průměrné hodnoty každého atributu a synonymní atributy byly sloučené do jedné složené proměnné. Na základě individuálních skupinových hodnot byla vypočtena statistická významnost mezi skupinami podnětů v nejnižším a nejvyšším kvartilu (*Mann-Whitney test*), rozptyl a interval spolehlivosti. U podnětů s identickými hodnotami φ_{max} byl vypočten průměr a interval spolehlivosti, posouzena byla míra vzhledem k dané hodnotě (statistická významnost mezi jednotlivými byla ověřena neparametrickou Kruskal-Wallisovou anovou). Vzájemné vztahy mezi atributy a jejich vzájemná souběžnost či protiběžnost byly také ověřeny pomocí regresního modelu s jednotlivými vlastnostmi náhodně zvolenými jako závislá či predikční proměnná.

Pro navazující část analýzy pak byly pro každý tón sečteny sinusové složky signálu v rozsahu frekvencí odpovídajících jednotlivým kritickým pásmům. Kladné části takto získaného časového průběhu signálu (10ms úseky) byly proloženy lokální regresí (*loess*). Pro proložené časové průběhy v jednotlivých pásmech byla zjišťována hodnota korelace (*Spearman* ρ) hodnot její funkce s hodnotami ze sousedících pásem na stejném zvuku. Na základě interpretace těchto hodnot pak byla posouzena souvislost mezi tímto děním a subjektivními rysy zvuků.

Výsledky

Přehled četných deskriptorů ($F_{oc} > 2$) ze slovního popisu je uveden v Tab. 18. V tabulce jsou uvedeny nejčastější deskriptory, jejich alternativní označení určené respondenty, četnost výskytu deskriptoru při slovním popisu (F_{oc}) a četnosti použití deskriptoru jako atributu při

⁸⁹ Oproti přirozeným zvukům z předchozí části

hodnocení jeho míry (F_{rt}). Nejčtenějšími deskriptory (F_{oc}) u podnětů bez fázového posunu byly *drnčivý* a *ostrý*, zatímco nejčtenější deskriptory pro podnět s nejvyšším φ byly *bzučivost*, *pískavost*, *měkkost* a *hladkost* (*tvrdost*).

Tab. 18: Přehled deskriptorů u zvuků s nejmenším φ_{max} a nejvyšším φ_{max} , celková četnost (F_{oc}) a četnost užití deskriptoru při hodnocení na škále (F_{rt})

Skupina s nejnižší φ_{max}			Skupina s nejvyšší φ_{max}		
Deskriptor	F_{oc}	F_{rt}	Deskriptor	F_{oc}	F_{rt}
drnčivý	7	7	bzučivý	8	8
- řinčivý	2	2	pískavý	4	1
- vrčivý	2	2	- hvízdavý	1	-
- ryčivý	1	-	- tónový	1	-
ostrý	5	-	měkký	4	3
hlasitý	3	-	- jemný	2	3
tvrdý	2	4	úzký	4	-
			vysoký	3	-
			jasný	3	-

Nejčtenějším atributem užívaným k hodnocení podnětů (F_{rt}) je *bzučivost*, která nemá synonymní vazbu⁹⁰, a *drnčivost*. Mezi další užívané atributy patří *řinčivost* a *vrčivost* (představují zřejmě součást jedné hodnocené vyoňující se vlastnosti a popisují obdobný vjem jako *drnčivost*) a *měkkost*, *jemnost* a *hladkost* a také *pískavost* (ty výrazně korelují s *bzučivostí* na $r > .80$, ale významově i fakticky se zřejmě jedná o odlišný vnímaný aspekt). Na základě tohoto zhodnocení jsou synonymní škálované vlastnosti dále užívány v rámci jedné sloučené proměnné pod názvem hlavní vlastnosti z Tab. 18. *Drnčivost* (zastupuje *drnčivost*, *řinčivost*, *vrčivost*) a *tvrdost* (zastupuje *měkkost*, *jemnost* a *tvrdost*). Průměrné hodnoty pro každý hodnocený atribut a jejich intervaly spolehlivosti jsou uvedeny v Tab. 19.

Tab. 19: Číslo podnětu, hodnota φ_{max} , průměr (Pr.) hodnocení a konfidenční interval (.95) pro každý podnět a atribut

φ_{max}	Bzučivost			Drnčivost			Tvrdost / měkkost			φ_{max}	Bzučivost			Drnčivost			Tvrdost / měkkost		
	Konf. Int.			Konf. Int.			Konf. Int.				Konf. Int.			Konf. Int.			Konf. Int.		
	Pr..	Min	Max	Pr.	Min	Max	Pr.	Min	Max		Pr..	Min	Max	Pr.	Min	Max	Pr.	Min	Max
0	18.2	5.7	30.8	61.2	48.4	89.4	66.5	57.5	75.4	135	41.7	31.9	51.6	34.5	21.8	50.6	49.1	41.6	56.6
45	21.1	9.9	32.2	56.1	47.5	83.3	63.1	52	74.1	135	38.9	29.5	48.3	36.7	21	53	50.3	41.7	58.8
45	18.7	8.8	28.6	55.4	46.9	80.9	62.5	51.5	73.4	135	33.9	24.3	43.5	47.8	38.8	72.5	54	45.7	62.3
45	19.4	8.1	30.6	54.2	42.9	71.1	62.2	51.3	73	180	62.5	46.3	78.6	19	7	36.5	38.1	29.5	46.6
45	21.3	9.4	33.1	56.2	47.4	87.2	62.1	53.3	70.9	180	44.5	33.6	55.4	41.4	29.7	58	46.5	36.2	56.7
45	19.4	9.4	29.3	56.8	47.5	88.9	64.4	55	73.7	180	41.7	31.4	52	39.2	20.2	55.6	49.7	40.6	58.8
90	26	15.9	36.1	52.7	36.7	76.1	56.9	45.6	68.2	180	57.3	46.2	68.4	24.2	7.2	40.6	41.5	34.9	48.2
90	33.8	24.7	42.9	47.5	30.5	63.2	54.2	44.3	64.1	180	59.6	48.3	71	22.5	7.5	39.2	41.1	34.9	47.3
90	31	20.1	42	48.5	39.2	73.1	56.5	41.5	66.5	270	49.6	38	61.2	32.8	17.1	48	45.2	36.2	54.2
90	29.9	19.8	39.9	47	27.3	64.6	56.2	45.8	66.5	270	52.6	42	63.3	28.9	14.1	47.2	43.5	38.6	53

⁹⁰ pouze v datech hlavního testu se objevuje *bzíkavost*

90	34.4	23.8	44.9	44.7	28.6	61.2	52.9	43.3	62.5	270	60.6	45.6	75.7	18.6	3.8	35.9	36.1	31.2	42.5
135	49	40	58.1	30	14.8	49.1	49.7	42.2	58.4	270	49.9	37.2	62.6	24.6	8	40.7	42	33.7	50.3
135	39.8	26.4	53.2	40.5	26.5	54.4	48.4	36.2	58.3	270	58.7	45.5	71.9	19.7	6.1	39.9	41.1	34.3	47.9

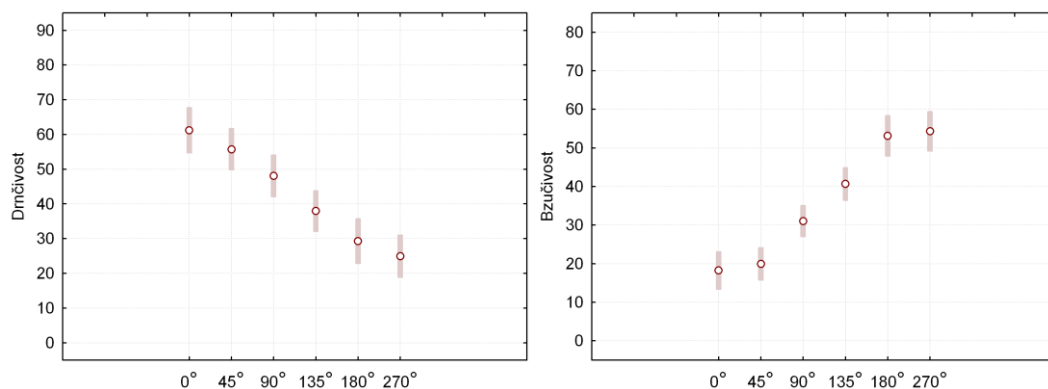
Poslechy ukázaly, že se podněty výrazně liší v míře *bzučivosti* a *drnčivosti* a *měkosti* (*tvrdosti*). Vyšší hodnoty φ_{\max} jsou spojeny s průměrnou *bzučivostí* a nižší *drnčivostí* (a *tvrdostí*) a obě hodnoty jsou vzájemně protiběžné. Vyšší φ_{\max} je též spojeno s vyššími hodnotami *hladkosti*.

Výsledky Mann-Whitneyho testu statistické významnosti rozdílů mezi hodnocením seskupených podnětů v 1. a 4. kvartilu hodnocených hodnot pro každou vlastnost (*bzučivost*, *drnčivost*, *měkkost*) jsou uvedeny v Tab. 20.

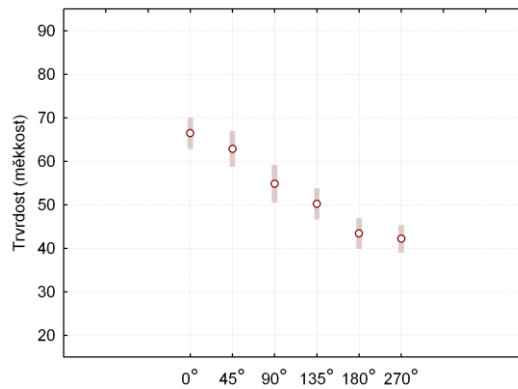
Tab.20: Mann-Whitney test rozdílů u hodnocení bzučivosti, drnčivosti a tvrdosti mezi nejnižším (Q₁) a nejvyšším (Q₄) kvantilem. Na spodních řádkách jsou uvedeny průměrné hodnoty v každém kvantilu.

	Bzučivost	Drnčivost	Tvrdost
Mann-Whitney U	627	856.5	1204
Sig.	0	0	0
Q ₁ value	26	28.9	45.79
Q ₂ value	49.86	52.7	56.9

Rozdíly jsou statisticky významné u všech hodnocených vlastností. Rozložení průměrných hodnot je dále znázorněno na Obr. 8

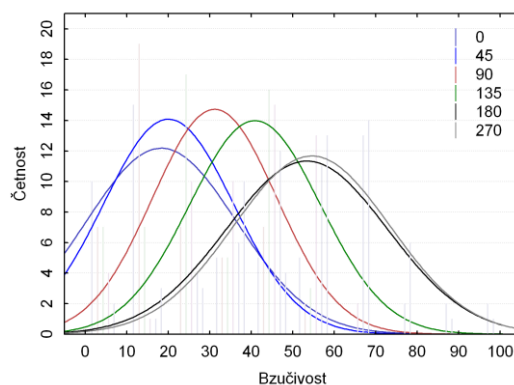


Obr. č. 8 Průměrné hodnoty míry drnčivosti (vlevo) a bzučivosti (vpravo) pro skupiny zvuků se stejnými posuny (průměr a konfidenční interval). Hodnoty fázového posunu jsou na dolní ose



Obr. č. 9 Průměrné hodnoty míry tvrdosti pro skupiny zvuků se stejnými posuny (průměr a konfidenční interval) (dolní osa: φ)

Obrázky zobrazují průměrné hodnoty *bzučivosti*, *drnčivosti* a *drsnosti* pro skupiny podnětů se shodnými hodnotami φ_{\max} . Průměrné hodnoty hodnocení *bzučivosti* a *měkkosti* jsou vyšší při vyšších hodnotách φ_{\max} a přírůstky jejich se zvyšováním φ_{\max} nejsou rovnoměrné a jsou nejvyšší při 90° a 180°. Tento trend je shodný pro všechny atributy a ukazuje jej například histogram na Obr. č 10 Pozorované rozdíly mezi skupinami se shodným φ_{\max} jsou také pro všechny zkoumané vlastnosti statisticky významné (Kruskal-Wallisův test v Tab. 21).



Obr. č. 10: rozložení bzučivosti u skupin se stejnými posuny (četnost pozorování a křivka normálního rozdělení) (vpravo)

Tab. 21: Kruskal-Wallisův test rozdílů mezi skupinami podnětů se stejným φ_{\max}

	Bzučivost	Drnčivost	Tvrdost
Kruskal-Wallis H	112.685	67	80.2
Sig.	0	0	0

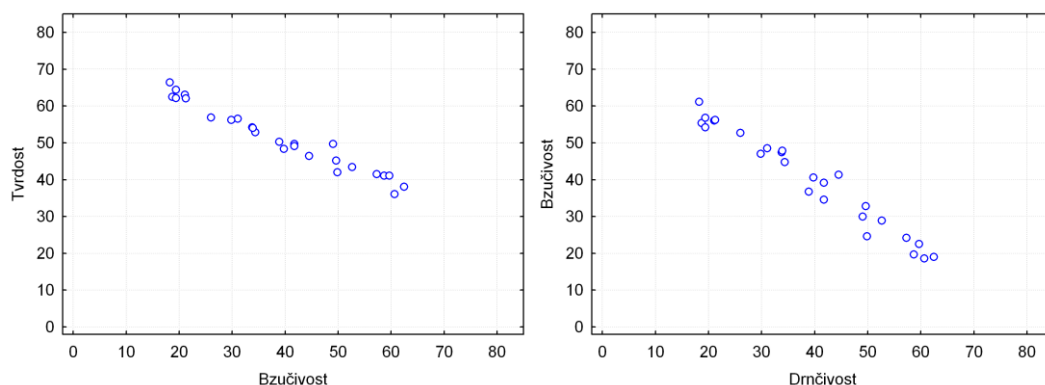
Subjektivní pohled na závislost *bzučivosti*, *drnčivosti* a *tvrdosti* představuje grafické vyobrazení průměrných hodnot jednotlivých atributů na každém zvuku na Obr. 22. Jednotlivé vlastnosti jsou výrazně protiběžné a jsou spolu výrazně spojené. To potvrzuje i faktorová analýza, kde tyto vlastnosti tvoří jeden faktor jehož sycení u *bzučivosti*, *drnčivosti* a *tvrdosti* přesahuje .98 (tento faktor také vysvětluje 97% variability dat). Dané vlastnosti jsou na těchto zvucích výrazně kolineární (Tab. 22). Tyto pozorované vztahy mezi *bzučivostí*, *drnčivostí* a

tvrdostí také potvrzují lineární regrese průměrných hodnot (Tabulka č. 22). Jednotlivé regrese jsou statisticky významné a naznačují značnou linearitu uvedených závislostí.

Tabulka č. 22 Lineární regrese průměrných hodnot atributů (závislá a nezávislá proměnná a parametry regresního modelu).

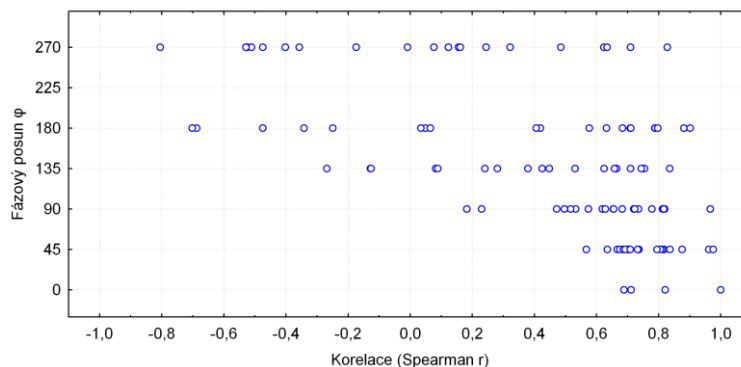
Závislá	Nezávislá	Adj. R ²	Intercept	B	F	p.
Tvrdost	Bzučivost	0.96	74.27	-0.59	635.91	***
Drnčivost	Bzučivost	0.96	75.17	-0.9	631.5	***
Tvrdost	Drnčivost	0.94	25.91	0.63	371.56	***

***<0.000

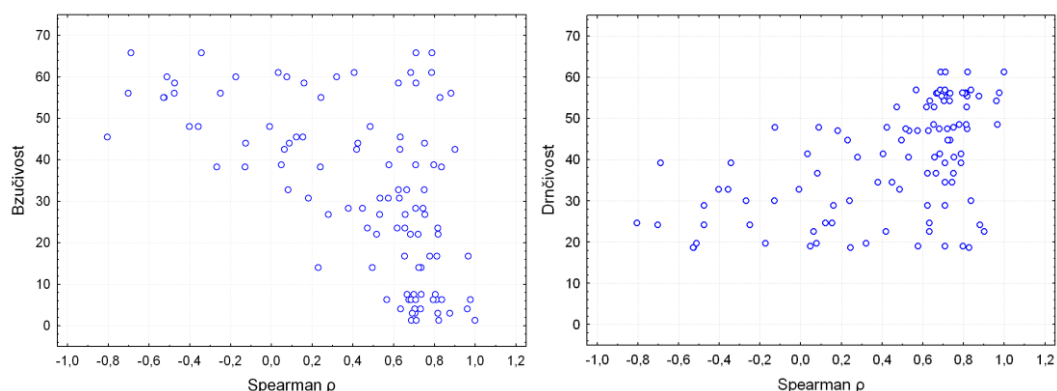


Obr. č. 11 Vzájemné závislosti hodnot drnčivosti, bzučivosti a tvrdosti

Hodnoty korelace proložených mezi průběhem křivek *loess* v sousedících kritických pásmech a její závislost na fázovém posunu φ_{\max} zobrazuje Obr. č. 11 Na grafu lze pozorovat, že s narůstajícím rozsahem možného fázového posunu jednotlivých harmonických také klesá míra korelace průběhů proloženého signálu mezi sousedními pásmy, a tato korelace je postupně u vyšších hodnot φ_{\max} zcela záporná.



Hodnoty korelace mezi křivkami *loess* pro sousedící kritická pásma a hodnota fázového posunu.



Obr 12 Hodnoty korelačního koeficientu mezi sousedícími kritickými pásmy a míra vlastnosti ze škálovacího testu

Obr. 12 zobrazuje souvislost těchto korelačních hodnot s hodnotami *bzučivosti* a *drnčivosti*. U zvuků spolu s mírou bzučivosti narůstá rozptyl ρ a jeho hodnota postupně klesá až do záporných čísel. Tento trend je pak u drnčivosti inverzní.

Následující komentáře a grafy se váží k doplňujícím poslechovým testům s menší skupinou z původních posluchačů a jiným druhem nenáhodných stimulů. Cílem těchto testů bylo rozvinout pracovní hypotézu o závislosti jevu na odlišnosti jemné časové struktury v sousedících kritických pásmech a ověřit hlasitostní souvislost průběhu pozorované nelinearity v míře zkoumaných atributů. Tabulka č. 23 dokumentuje konstantnost přírůstku skupinového zpoždění pásmového průběhu v závislosti na přírůstku φ_{dif} .

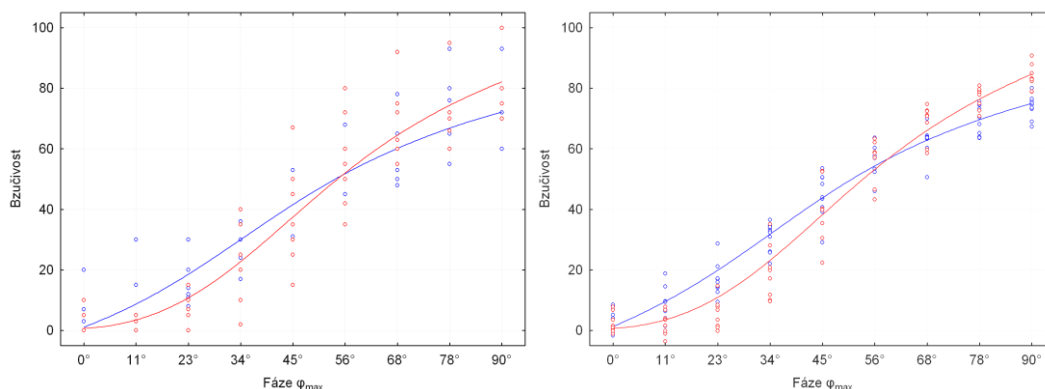
Tabulka č. 23. Čas dosažení nadprůměrné amplitudy u proloženého signálu loess pro kritická pásma 14 – 18; absolutní čas (T) relativní zpoždění (T_{Rel}) [ms]. Rozdíl zpoždění od hodnot odpovídajícím lineární regresní přímce (R).

	Pásmo 14			Pásmo 15			Pásmo 16			Pásmo 17			Pásmo 18		
	T	T _{Rel}	R	T	T _{Rel}	R	T	T _{Rel}	R	T	T _{Rel}	R	T	T _{Rel}	R
90°	3.84	-1.09	.01	4.02	0.32	.04	4.18	1.03	.04	4.29	0.79	.09	4.55	0.26	.01
78.75°	3.67	-0.92	.00	4.03	0.32	.01	4.28	0.93	-.02	4.32	0.76	.01	4.55	0.27	-.03
67.5°	3.51	-0.76	-.01	4.05	0.29	-.02	4.42	0.79	-.02	4.39	0.69	-.03	4.59	0.23	-.03
56.25°	3.36	-0.61	-.01	4.09	0.25	-.02	4.61	0.60	.01	4.48	0.59	-.04	4.69	0.12	.03
45°	3.22	-0.47	.02	4.11	0.23	-.05	4.72	0.49	-.02	4.57	0.51	-.07	4.74	0.08	.04
33.75°	3.03	-0.28	-.02	4.20	0.14	-.01	4.89	0.32	-.01	4.68	0.39	-.06	4.75	0.06	.01
22.5°	2.90	-0.15	.00	4.26	0.08	.01	5.06	0.15	.01	4.85	0.23	-.01	4.74	0.08	-.04
11.25°	2.75	0.00	.01	4.34	0.00	.04	5.21	0.00	.01	5.08	0.00	.11	4.82	0.00	.00

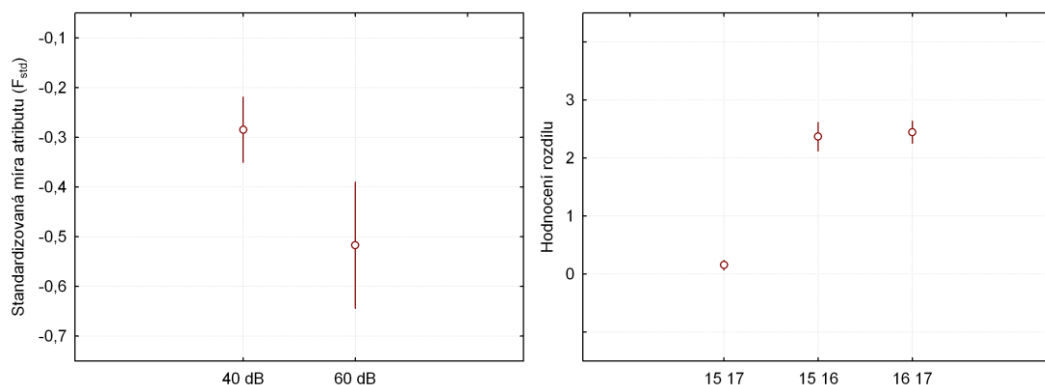
I přes značnou konstantnost posunů je průběh závislosti bzučivosti a dalších atributů nelineární. Tento průběh je shodný u standardizovaných i nestandardizovaných dat (Obr č. n) a je obdobný u jednotlivých atributů. Nelinearita se také liší s hladinou akustického tlaku podnětů (Obr č. n a Obr č. n). Při nižších hladinách je nižší než při vyšších. Druhý doplňující pokus zobrazuje Obr 13 a 14 a Tabulka č. 24. Zvuky změnami φ_{dif} mezi sousedícími kritickými pásmy se vzájemně odlišují, zatímco zvuky se změnami, které se neodehrávají v sousedním pásmu, se téměř neliší (<0.1). Uvedené rozdíly jsou statisticky významné (Tabulka č. 24).

Obr. č. 24 Kruskal-wallisův test na odlišnost rozdílů mezi zvuky mezi skupinami (sousedící a nesousedící pásma)

Kritická pásma (č)	Srovnávané skupiny		Průměr pořadí		Kruskal-Wallis H	
	1	2	1	2	H	sig
	15, 16, 17		23.5	90.2	89.8	*
	15, 17	15, 16	23.4	67.6	67.4	*
		16, 17	23.1	67.9	68.8	*



Tabulka č. 13 Individuální hodnota bzučivosti a lokální regrese (loess) při 40 dB (modře) a 60 dB (červeně). Normalizovaná data (vlevo) a nenormalizovaná data (vpravo)



Tabulka č. 14 Průměrná hodnota a konfidenční interval. Vlevo: univerzální rozdíl standardizované míry při fázovém posunu φ_{dir} 33,75 (všechny atributy). Vpravo: rozdíl hodnot rozdílů sousedících (15 16 a 16 17) a nesousedících pásem (15 17)

Diskuse

Atributy použité respondenty ke slovnímu popisu a rozdíly mezi hodnocením u podnětů s rozptylem relativního φ ukazují, že změna této časové charakteristiky je u zvuku slyšitelná a je spojená s vnímáním specifických kvalitativních vlastností zvuku. Změna relativní fáze harmonických složek se projevuje výraznou změnou vnímaného zvuku a jeho charakteru a je nejčastěji popisována jako *drnčivost* či *bzučivost* zvuku⁹¹. Obdobně je však také popisována jako *měkkost* či *tvrdost* a *hladkost*. *Měkkost* narůstá se zvyšováním rozptylu φ a doprovází jí nárůst bzučivosti. Nízká proměnnost φ naopak odpovídala *drnčivosti* a *tvrdosti* zvuku. Jednotlivé vlastnosti reprezentované deskriptory tedy odpovídají časovému jevu změny fáze

⁹¹ Ale také jako další vlastnosti

a dalším jevům odpovídajícím danému rozptylu φ . Rozdíl těchto aspektů je obdobný inverznímu vztahu *bzučivosti* a *drnčivosti* (variabilita φ má u těchto vlastností zcela inverzní efekt: zvuky s vyšším φ jsou *bzučivější* (*bzíkavější*) a méně *drnčí* (*cvrčí*). Tato závislost je velmi dobře vystižena regresním modelem (daný model ukazuje, že vztahy mezi vlastnostmi jsou lineární).

Signálová analýza interference tónů v rámci kritických pásem naznačuje možné příčiny pozorovaných změn (variabilita φ se projevuje posunem časové struktury každého pásma) a podporuje hypotézu, že tyto časové změny vnímáme prostřednictvím jemné časové struktury. Tomu také odpovídá nerozlišitelnost fázových změn u 1-9 harmonické (jednotlivé harmonické leží mimo společná kritická pásma⁹²). Pozorování naznačují že změna barvy odpovídá synchronicitě či naopak protiběžnosti této struktury v sousedních kritických pásmech (záporné hodnoty ρ). *Tvrдость* by například mohla odpovídat postupné ztrátě synchronicity a *bzučivost* protiběžnosti jemné časové struktury v sousedních pásmech (na studovaných zvucích toto ale nelze rozlišit). Studie také potvrzuje vzájemnou provázanost fenoménu relativní fáze složek zvuku s časovou strukturou (doplňující studie dále rozvedla předpoklad, že změnou relativní fáze harmonických složek lze kontrolovaně působit změnu jemné časové struktury). Uvedené poznatky také odpovídají souvislosti jednotlivých atributů se změnami obálky signálu v jednotlivých kritických pásmech u zvuků s nižší *drnčivosti* a *tvrđosti* a narůstající *bzučivostí* a *měkkostí*

Závěr

Cílem této části práce bylo teoretické ověření slyšitelnosti a subjektivního charakteru náhodných změn fáze jednotlivých harmonických složek zvuku a též i s tím souvisejících změn jemné časové struktury. Změna parametrů popisuje změnu vlastností zvuku uvedených v a je jí převážně možné popsat jako inverzní přechod od *drnčivosti* k *bzučivosti* a souběžnou změnu charakteru zvuku od *tvrđosti* k *měkkostí*. Pozorovaná změna *měkkostí* by mohla souviset a vysvětlit sníženou *drsnost* pozorovanou na studiích obdobných změn u zvuků s omezeným rozsahem harmonických (Pressnitzer a McAdams 1999 a Vencovský a Rund 2017, Mathes a Miller 1947). *Drsnost* ovšem posluchači nevnímali jako výraznou vlastnost na těchto zvucích.

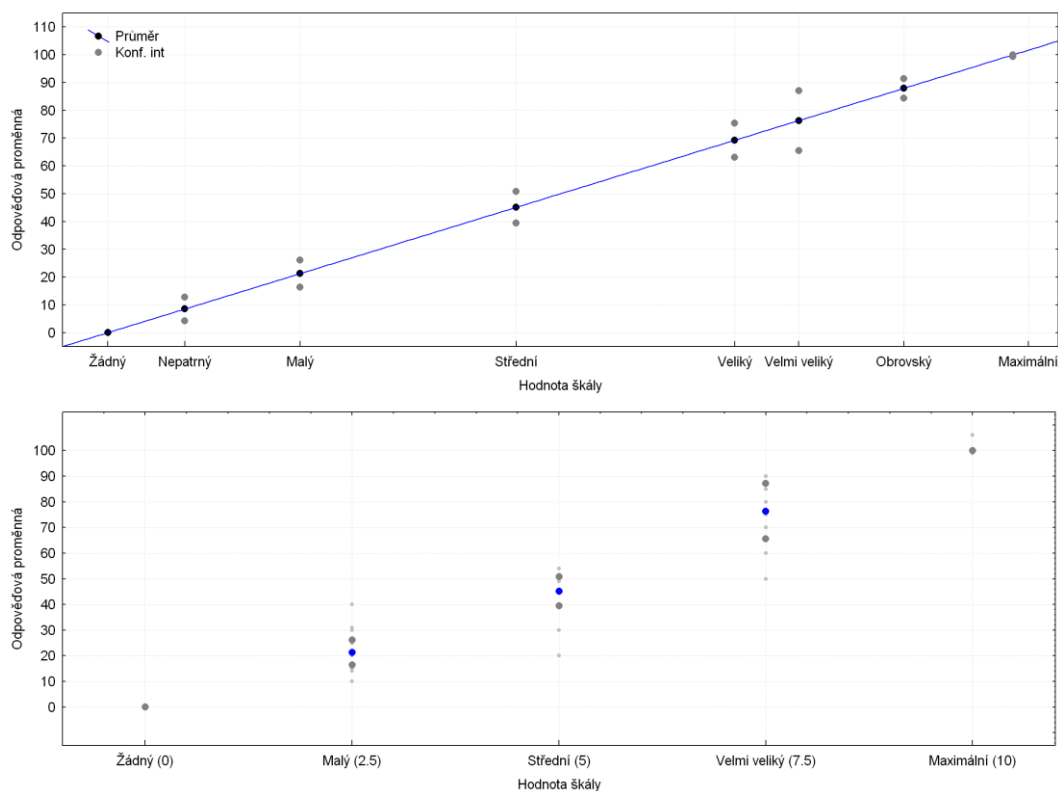
Tato studie ověřila vztah *drnčivosti*, *bzučivosti* a *tvrđosti* s časovými charakteristikami zvuku a i jejich souvislost s koherencí vrcholů obálky. Uvedená souvislost *tvrđosti* a parametru časové synchronicity by mohla být předmětem navazujících studií a tvorby pokročilých modelů. Na základě výsledků této části lze také konstatovat, že lidským sluchem lze monaurálně vnímat časové aspekty zvuku kratší, než 0.015 ms (postřehnutelnost změn při $\varphi_{\text{dif}} = 22,5^\circ$ u 4kHz harmonické).

⁹² Obdobně je i percepčně nerozlišitelná změna znaménka úhlu φ_{dif} .

Ukotvení škály

Součástí souběžných aktivit spojených se zadáním této práce představovalo i ověření a průzkum slov pro české ukotvení škály pro posouzení míry nepodobnosti daných vlastností na základě kritérií představených v úvodu této práce (shoda a nízká ambivalence).

Součástí tohoto záměru byl jak sběr slov tak i jejich následné ověření. Prvním úkolem respondentů bylo napsat slova popisující změnu rozdílu a následně označit mírou jejich vhodnosti (0-5). Na dalším sezení pak měli respondenti za úkol přidělit takto vybraným adjektivům (celkem 12 adjektiv) hodnotu, která by odpovídala míře reprezentovaného rozdílu (0-100), umístěním značky na odděleném archu na předloženou úsečku do polohy odpovídající jejich míře. Hodnoty u slovních popisů míry s podprůměrnou mírou rozptylu hodnocení u obou testů jsou prezentovány na Obr. 15



Obr. č. 15 Popisná slova pro slovní ukotvení škály (nahore) (průměrná hodnota a konfidenční interval), možná škála se střední hodnotou (dole) (průměr, konfidenční interval [šedivé body], odlehlé hodnoty [šedivé křížky])

4 Závěr a přehled

Mimo umělé zdroje zvuku může k pozorovaným relativním fázovým posunům docházet i u přirozených zdrojů zvuku (například v důsledku vazby různých rezonančních systémů či časového zpoždění šíření zvukové vlny) a u těchto jevů lze předpokládat obdobné projevy z hlediska změn jemné časové struktury. Na základě výsledků této práce lze daný jev spojit s barvou zvuku (bzučení, tónovost či měkkost) i kvalitou zvuku hudebních nástrojů, a význam této závislosti také naznačují souběžné studie zvukového designu produktů (Orhon a Belek 2010) a předchozí studie barvy zvuku na které tato práce navázala (Stepanek et al. 1999) nebo hudby (Pressnitzer et al. 2000) a protože Důsledky zjištění na přírodní zdroje zvuku a další aspekty související s vnímáním prezentovaných forem drsnosti by proto měly být náměty pro další výzkum.

Krom samotného výzkumu percepce a barvy zvuku jsou výsledky této práce také relevantní pro obor výzkumu sluchu a jeho zákonitostí. Možností dalšího bádání představuje jemné časové struktura a její souvislosti se zákonitostmi sluchu. Obdobně se také některé pozorované jevy mohou týkat sluchových buněk (chobotnicové buňky). Ty detekují koincidenci výbojů napříč vlákny sluchového nervu (k překročení prahu pro výboj je nutná souběžná aktivita několika vláken sluchového nervu). Jedna buňka se napojuje na několik vláken sluchového nerv, ze kterého vzorkuje časovou aktivitu a to jak na jedné charakteristické frekvenci, tak i napříč vlákny s různými frekvencemi. K překročení prahu pro výboj se u této buňky předpokládá souběžná aktivita 1/3 vláken v časovém rozmezí 1ms. Dochází tak průměrování informace z více vláken a následné nahrazení sérií ostrých pulzů, které tuto periodicitu sledují. Na periodický signál buňka reaguje sérií výbojů, které kopírují časovou informaci signálu. Aktivita těchto buněk by mohla souviset s pozorovanou nelinearitou v druhé části této práce.

U výzkumu varhanní píšťaly i houslí tato práce doplnila stávající výzkum jejich popisných charakteristik a charakteristik jejich intonace. Výzkum v této práci také má svou relevanci z hlediska zvukové tvorby a reprodukci zvuku (vlastnostmi tvrdý měkký označit mnoho charakter rozdílů v elektroakustickém řetězci) Dalším tématem k výzkumu může být například rozdíl měkkosti tvrdosti v důsledku binaurálním sluchu či vliv prostoru na zkoumané časové aspekty zvuku. Práce splnila všechny své vytyčené cíle.

Rozsah studovaných tónů je zobrazen také na Tab. 25

Tabulka 25. Frekvence harmonických složek jednotlivých tónů

	Frekvence harmonických složek [Hz]																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
G3	196	392	588	784	980	1176	1372	1568	1764	1960	2156	2352	2548	2744	2940	3136	3332	3528	3724
G#	208	415	623	831	1039	1246	1454	1662	1869	2077	2285	2492	2700	2908	3116	3323	3531	3739	3946
A	220	440	660	880	1100	1320	1540	1760	1980	2200	2420	2640	2860	3080	3300	3520	3740	3960	4180

Bibliografický seznam literatury

ALLURI, Vinoo a Petri Toiviainen (2010), Exploring perceptual and acoustical correlates of polyphonic timbre. *Music Perception*, 2010, 27(3), s. 223-242.

ALTINSOY, M. Ercan (2013), Identification of quality attributes of automotive idle sounds and whole-body vibrations. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 9(1,2), s. 4-27.

ANSI/ASA (2013), American National Standard on Acoustical Terminology S1.1-2013. Acoustical Society of America. Melville: New York. 86 s.

ARNAL, H. Luc et al. (2019), The rough sound of salience enhances aversion through neural synchronisation. *Nature communications*, 10(1) s. 671.

ATKINSON, Rita L. (2003), Psychologie. Praha: Portál, 751 s. ISBN 80-7178-640-3.

ATSUSHI, M.; Martens, W. L. (2005), Constructing individual and group timbre spaces for sharpness-matched distorted guitar timbres. In: *Audio Engineering Society (AES), 119th Audio Engineering Society Convention, New York. 2005.* p. 7-10.

BANNO et al. (2002), The effect of group delay spectrum on timbre. *Acoustical Science and Technology*, 23(1), s. 1-9.

BARBOSA, A. a Cordeiro J. (2011), The influence of perceptual attack times in networked music performance," in Proc. 44th Int. Conf. Audio Netw., s. 10. [Online]. Available: <http://www.aes.org/elib/browse.cfm?elib=16133>

BERNSCHUTZ, Benjamin (2013), A spherical far field HRIR/HRTF compilation of the Neumann KU 100. In: *Proceedings of the 40th Italian (AIA) annual conference on acoustics and the 39th German annual conference on acoustics (DAGA) conference on acoustics*. Berlin: German Acoustical Society. s. 29.

BIGAND, E. a B. P. Charronnat (2006): Are we "experienced listeners"? A review of the musical capacities that do not depend on formal musical training. *Journal of Cognition*, 100(1), s. 100-130.

BODDEN, M. (1997), Instrumentation for sound quality evaluation. *Acta Acustica united with Acustica*, 83, s. 775-783.

BORG, I., Lingoes, J. (1987), Procrustes Procedures. In: *Multidimensional Similarity Structure Analysis*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4768-5_19

BRADLEY, R. A., M. E. Terry (1952), Rank Analysis of Incomplete Block Designs I: The Method of Paired Comparisons, *Biometrika*, 39, s. 324-345

BŘICHÁČEK, Václav.(1978), Úvod do psychologického škálování. Bratislava : Psychodiagnostické a didaktické testy, 321 s.

CACLIN, A. et al, (2005), Acoustic correlates of timbre space dimensions: A confirmatory study using synthetic tones. *Journal of Acoustical Society of America*, 118(1), s. 471-482.

CACLIN, Anne, et al. (2006), Separate neural processing of timbre dimensions in auditory sensory memory. *Journal of cognitive neuroscience*. 18(12) s. 1959-1972.

- CACLIN, Anne et al. (2008), Interactive processing of timbre dimensions: an exploration with event-related potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(1), s. 49–64.
- CAROT, Alexander, Christian Werner (2007), Network music performance-problems, approaches and perspectives. In: *Proceedings of the “Music in the Global Village”-Conference, Budapest, Hungary*, p. 23-10.
- CARRON, Maxime et al. (2017), Speaking about sounds: a tool for communication on sound features. *Journal of Design Research*, 15(2) s. 85-109.
- CASTELLENGO, Michelle (1999), Acoustical analysis of initial transients in flute like instruments, *Acta Acustica*, 85 s. 387-400.
- CHAFE, C., J. P.Cáceres a M. Gurevich (2010), Effect of Temporal Separation on Synchronization in Rhythmic Performance, *Perception*, 39(7), s. 982-992.
- CHAPELLE, Carol [ed.] (2013), *The encyclopedia of applied linguistics*, Blackwell publishing.
- CHETAN, Sharma et al. (2020), Development of a lexicon to describe the sensory characteristics of a wide variety of potato cultivars. *Journal of Sensory Studies*, 35(4), e 12577.
- CLEVELAND, W. (1979), Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots, *Journal of the American Statistical Association*, 74, s. 829-836.
- COXON, A. P. M. (1982), *The user's guide to multidimensional scaling*, Heinemann Educational Books, London 1982.
- CRONBACH, L. J. (1970), *Essentials of psychological testing*, 2nd Edition, Harper&Row,, New York.
- DUBNOV, Shlomo a Rodet Xavier (2003) Investigation of phase coupling phenomena in sustained portion of musical instruments sound. *Journal of Acoustical Society of America*. 113(1) s. 348-358.
- EEROLA, Tuomas et al. (2012), Timbre and affect dimensions: evidence from affect and similarity ratings and acoustic correlates of isolated instrument sounds. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*. 30(1) s. 49-70.
- EGGEMONT, Jos (2001), Between sound and perception: reviewing the search for a neural code. *Hearing research*, 157(1-2), s. 1-42.
- ELLIOTT, T.M., Liberty S. Hamilton, L. S. a Theunissen, F. (2013): Acoustic structure of the five perceptual dimensions of timbre in orchestral instrument tones, *J. Acoust. Soc. Am.* 133 (1), 0001-4966/2013/133, s. 389-404.
- EMANUEL A., P. Habets et al. (2008), Joint dereverberation and residual echo suppression of speech signals in noisy environments. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 16(8), s.1433-1451.
- FARNER, S. et al (2009): Ensemble hand-clapping experiments under the influence of delay and various acoustic environments, *Journal of the Audio Engineering Society*, 57(12), s. 1028–1041.

FISCHINGER, T. (2009), Ensemble hand-clapping experiments under the influence of delay and various acoustic environments, *Journal of the Audio Engineering Society*, 57(12), s. 1028–1041.

FERRAND, C. T. (2002), Harmonic to noise ratio: An index of vocal aging, *Journal of Voice*, 16(4), s. 480-487, DOI org/10.1016.50892-1997.

FRIČ, M., A. Berti, J. Otčenášek (2019), Percepční hodnocení vlastností pěveckého provedení kolorатурní árie, *Musicologica Brunensia* 54 / 1, s. 187-222
<https://doi.org/10.5817/MB2019-1-13>.

FRITZ, C., Cross, I., Moore, B. C., & Woodhouse, J. (2007): Perceptual thresholds for detecting modifications applied to the acoustical properties of a violin, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(6), s. 3640-3650.

FRITZ, Claudia, et al. (2012), Exploring violin sound quality: Investigating English timbre descriptors and correlating resynthesized acoustical modifications with perceptual properties. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), s. 783-794.

FRITZ, C., et al (2012b), Player preferences among new and old violins. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(3), s. 760-763.

GABRIELSSON, A. a H. Sjögren (1979), Perceived sound quality of sound-reproducing systems. *Journal of the Acoust. Soc. Am.* 65 s. 1019–1033.

GABRIELSSON, Alf a Hakan Sjorgen (1979), Perceived sound quality of sound-reproducing systems. *Journal of the Acoustical Society of America*, 65(4) s. 19-33.

GEISSNER, E. a E. Parizet (2008), Relation between the overall unpleasantness of a long duration sound and the one of its event: application to a delivery truck. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5).

GENUIT, K. (2002), Sound quality aspects for environmental noise. Proceedings of the 29th International Congress on Noise Control Engineering, August 27-30, 2000. Nice, France. s. 19-21.

GONZALEZ, S., Salvi, D., Antonacci, F., & Sarti, A. (2021). Eigenfrequency optimisation of free violin plates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149(3), 1400-1410.

GREINGER, John M., Michael D. Wothe (1999), Effects of tone-quality changes on intonation and tone-quality ratings of high school and college instrumentalists. *Journal of Research in Music Education*, 47(2), s. 135-149.

GUETTLER, Knut (2004), Looking at starting transients and tone coloring of the bowed string. *Proceedings of Frontiers of Research on Speech and Music, 2004*.

GUILFORD, J. P. (1954), Psychometric methods, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.

HAILSTONE et al. (2009), It's not what you play, it's how you play it. *Quarterly journal of experimental psychology*, 62(11) s. 141-155.

HAJDA, J. M. et al. (1997): Methodological issues in timbre research. In *Deliege, I., Sloboda, J. (Ed.), Perception and Cognition of Music*, Psychology Press, 253-286.

- HANDEL, S. and M. L. Ericksson (2001), A rule of thumb. The bandwidth for timbre invariance is one octave. *Music Perception*, 19 s. 121-126.
- HARDING, Sue, Martin Cooke a Peter König (2007), Auditory gist perception: an alternative to attentional selection of auditory streams? In: *Attention in cognitive systems. Proceedings of the 4th international workshop on attention in cognitive systems. Hyderabad, India.*
- HARRAR, Vanessa a Harris Laurence (2008), The effect of exposure to asynchronous audio, visual, and tactile stimulus combinations on the perception of simultaneity. *Experimental brain research*. 186 s. 517-524.
- HAYES John E., Alissa L. Allen a Samantha M. Bennett (2013), Direct comparison of the generalized Visual Analog Scale (gVAS) and general Labeled Magnitude Scale (gLMS). *Journal of food quality and preference*. 28(1) s. 36-44.
- JENSEN, Kristoffer (2004), Irregularities, noise and random fluctuations in musical sounds. *Journal and Music and Meaning*. 2(12) et al. (2004) Neural processing of amplitude-modulated sounds. *Journal of physiological review*, 84 s. 541-577.
- JORIS, Philip, Christoph Schreiner and Adrian Rees (2004), Neural processing of amplitude-modulated sounds. *Physiological reviews*, 84(2) s. 541-577.
- JUNYONG, You et al. (2010), Perceptual-based quality assessment for audio–visual services: A survey. *Signal Processing: Image Communication*, 25 s. 482–501.
- KAPLANIS, Neofytos et al. (2014), Perception of reverberation in small rooms: A Literature Study. In: *Proceedings of the AES 55. international conference, Helsinki, Finland.*
- KENDALL, R. A., Carterette, E. C., and Hajda, J. M. (1999): Perceptual and acoustical features of natural and synthetic orchestral instrument tones, *Music Percept.* 16, 327–363.
- KLINDA, Ferdinand (2000), *Organ v kulture dvoch tisícročí*. ISBN: 80-88884-19-5
- KOELSCH, Stefan (2011), Toward a neural basis of music perception - a review and updated model. *Frontiers in psychology*, 2, s. 1-21.
- KOELSCH, Stefan (2011), Toward a neural basis of music perception—a review and updated model. *Frontiers in Psychology*, 2, s. 110.
- KOHLRAUSCH, A., D. Hermes a R. Duisters (2005), Modeling roughness perception for sounds with ramped and damped temporal envelopes. In *Proceedings of Forum Acusticum*, s. 1719-1724.
- KREIMAN J., et al (1992), Individual differences in voice quality perception, *J. Speech Hear. Research* 35, s. 512–520.
- KROSNICK, J. A., (1999), Survey research. *Annual review of Psychology*, 50(1), s. 537-567.
- KULKARNI, Abhijit, S. K. Isabele a H. S. Colburn (1999), Sensitivity of human subjects to head-related transfer-function phase spectra. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105(5).

- KURTISI, Z. a L. Wolf (2008), Using wavpack for real-time audio coding in interactive applications, In: *Proceedings of the IEEE International Conference of Multimedia Expo*, s. 1381–1384.
- KURTZ, Daniel, Theresa White a Meghan Hayes (2000), The labeled dissimilarity scale: a metric of perceptual dissimilarity. *Perception and psychophysics*, 62 s. 152-161.
- KYRIAKAKIS, C. (1998), Fundamental and technological limitations of immersive audiosystems, In: *Proceedings of the IEEE*, 86(5), s. 941-951, DOI: 10.1109/55.664281
- LAELESS, Lydia, Gail Civile (2013), Developing lexicons: A review. *Journal of Sensory Studies*, 28(4), s. 270-281.
- LALITTE, P. (2008), Aspects acoustique et sensoriel du bruit. *Filigrane*, s. 13-31.
- LAVANDIER et al. (2008), Identification of some perceptual dimensions underlying loudspeaker dissimilarities. *Journal of Acoustical Society of America*, 123, 4186–4198.
- LETOWSKI, T. (1992), Timbre, tone color, and sound quality: *Concepts and definitions*. *Archives of Acoustics*, 17(1), s. 17-30.
- LETOWSKI, Tomasz a A. Miśkiewicz (2013), Timbre solfege: *a course in perceptual analysis of sound*. *Signal Processing in Sound Engineering*, s. 83-96.
- LIETZ, P. (2010), Research into Questionnaire Design: A Summary of the Literature, *International Journal of Market Research*, 52(2), s. 249-272, <https://doi.org/10.2501/S147078530920120X>
- LIMA, A. A. et al. (2008), On the quality assessment of sound signals, In: *Proceedings of the IEEE 08*, s. 416 – 419.
- MARENTAKIS, Georgios a Charalampos Saitis (2020), Variation in timbre descriptors due to outer ear filtering. In: *Proceedings of Forum Acusticum*, s. 1047-1052.
- MASATAKA, Nobuo (2006), Preference for consonance over dissonance by hearing newborns of deaf parents and of hearing parents. *Developmental science*, 9(1), s. 46-50.
- MATHES, R. C., R. L. Miller (1947), Phase effects in monaural perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 19(5), s. 780-797.
- MAZOREAU, Jeremy et al. (2003), The dependency of timbre on fundamental frequency. *Journal of the Acoustical Society of America*, 114(5) s. 946-957.
- MCADAMS S. a Giordano B. L. (2014): The perception of musical timbre, kap. 7, V *Oxford Handbook of Music Psychology*, Oxford University Press. s.113-124, DOI.org/10.1093/oxfordhb/9780198722946.013.12
- MCADAMS, Dan P. (2012), Exploring psychological themes through life-narrative accounts. *Varieties of narrative analysis*, s. 15-32.
- MEDDIS, R. et al. [eds.] (2010), *Computational Models of the auditory system*, Springer Handbook of Auditory Research, Springer Science, ISBN 978-1-4419-5934-8.

- MELKA, Alois (1997), Analýza slovních popisů zvukových vlastností houslí. Dotazníkový průzkum v českém a německém jazykovém prostředí. *Hudební věda*, 19 s.318-327.
- MELKA, Alois (2005), Základy experimentální psychoakustiky. Akademie múzických umění, HAMU, Praha. ISBN 80-7331-043-0.
- MLČOCH, Jiří (2015), Varhany: Od teorie k praxi. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci.
- MØLLER A. R. (2000): Hearing, its physiology and pathophysiology, Academic Press, San Diego, USA, ISBN 0-12-504255-8
- MØLLER, M.B. et al (1986): Diagnosis and surgical treatment of disabling positional vertigo, *J. Neurosurgery* 64, s. 21-28.
- MONETTE, L. G. (1992): The Art of Organ Voicing, Kalamazoo, Western Michigan University.
- MOORE, Brian C. J. [ed.] (1995), Hearing. London: Academic press inc. 468 s., ISBN 0-12-505626-5.
- NAMBA, Seiichiro, et al. (1991), Verbal expression of emotional impression of sound: A cross-cultural study. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, 12(1), s. 19-29.
- NILSSON, M. E. (2007), A-weighted sound pressure level as an indicator of short-term loudness or annoyance of road-traffic sound. *Journal of Sound and Vibration*, 302(1), s. 197-207.
- OATES, M. Jennifer (2006), Development of an auditory-perceptual rating instrument for the operatic singing voice, *Journal of Voice*, 20(1) s. 71–81.
- OERTEL, et al. (2000), Detection of synchrony in the activity of auditory nerve fibers by octopus cells of the mammalian cochlear nucleus. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 97(22) s. 11773-11779.
- OLIVE, S. E., T. Welti a E. McMullin (2013), A Virtual Headphone Listening Test Methodology, In: *51 st. AES conference: Loudspeakers and Headphones*, s. 3-5, Northridge, CA, USA.
- OPPENHEIM, N. Jacob a Marcelo O. Magnasco (2013), Human time-frequency acuity beats the Fourier uncertainty principle. *Physical review letters*. 110(4) 5 s.
- OSGOOD, Charles (1952), The nature and measurement of meaning. *Psychological bulletin*, 49(3) s. 197.
- OSGOOD, Charles (1959) Semantic space revisited. *Word*, 15(1) s. 192-200.
- OTČENÁŠEK, J. (2013), Vnímání drsnosti zvuku vyvolané nepravidelným kmitáním struny houslí, Absolventská práce (Bc.), Univerzita Karlova, Praha.
- OTČENÁŠEK, J. (2016), Vnímání drsnosti zvuku a drsnost zvuku jako parameter hlukového znečištění, Diplomová práce (Mgr.), Univerzita Karlova, Praha.
- OTČENÁŠEK, J. (2018): Environmental aircraft take-off noise – Sound quality factors associated with unpleasantness, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, ISSN 1361-9209, 67(2), s. 366-374, DOI 10.1016/j.trd.2018.10.014.

- OTČENÁŠEK Jan (2019) Differences in the evaluation of an onset transient and stable tone in an organ pipe sound, *Akustika*, 33(2), s. 63-70
- OTČENÁŠEK, Jan (2019b), Environmental aircraft take-off noise—sound quality factors associated with unpleasantness. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, s. 366-374.
- OTČENÁŠEK, Jan et al (2022), The subjective relevance of perceived sound aspects in remote singing education. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 151(1), s. 428-433.
- OTCENASEK, Z. a J. Otcenasek (2015), Roughness of violin tones—the perception of irregularities. *Proceedings of the Third Vienna Talk on Music Acoustics*, s.16-19.
- OTČENÁŠEK, Zdeněk, Jan Štěpánek a Václav Syrový (2003) Influence of duration of tone stationary part on perception of starting transient. In: *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference*, August 6-9, 2003 (SMAC 03), Stockholm, Sweden.
- PARKES, Kelly A. (2010), Performance Assessment: Lessons from Performers. *International Journal of Teaching and Learning in Higher Education*, 22(1), s. 98-106.
- PATTERSON, Roy D. (1987), A pulse ribbon model of monaural phase perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82(5), s. 1560-1586.
- PEARCE, A., Brookes T. a Mason R. (2019), Modelling Timbral Hardness, *Applied Science*, 9, 466, s. 1-18, DOI:10.339.
- PEARCE, Andy, Tim Brookes a Russell Mason (2017), Timbral attributes for sound effect library searching. *Audio Engineering Society Conference: 2017 AES International Conference on Semantic Audio*, Audio Engineering Society. 8 s.
- PEARCE, Andy, Tim Brookes a Russell Mason (2018), Modelling timbral hardness. *Applied Sciences*, 2019, 9.3: 466.
- PELOWSKI, M. et al (2016), Visualizing the Impact of Art: An Update and Comparison of Current Psychological Models of Art Experience. *Front. Hum. Neurosci.* 10:160. doi: 10.3389/fnhum.2016.00160.
- PRATT, R.L. a P.E.Doak (1976), A subjective rating scale for timbre. *Journal of Sound and Vibration*, 45(3), s. 317-328.
- PREDIERI, Stefano, P. Raggazini and R. Rondelli (2005), Sensory evaluation and peach fruit quality. In: *VI International Peach Symposium 2005*, 713, p. 429-434.
- PRESSNITZER, D. et al. (2000), Perception of musical tension for nontonal orchestral timbres and its relation to psychoacoustic roughness. *Perception & psychophysics*, 62(1), p. 66-80.
- PRESSNITZER, Daniel a Stephen McAdams (1999), Two phase effects in roughness perception. *Journal of the Acoustical society of America*, 105(5).
- PRESSNITZER, Daniel; McAdams a Stephen (1999), An effect of the coherence between envelopes across frequency regions on the perception of roughness. *Psychophysics, physiology, and models of hearing*, s. 105-108.

- REGAN, Kevin (2009), Explaining what people say about sensory qualia, In: *Perception, action, and consciousness*, Oxford: OUP s. 31-50.
- RIoux, Vincent a Daniel Vastfjall (2001), Analyses of verbal descriptions of the sound quality of a flue organ pipe. *Musicae Scientae*, 5(1) s. 55-82.
- ROGALEWITZ, V. (1998), Praviděpodobnost a statistika pro inženýry, Vydavatelství ČVUT, Praha.
- ROSS, R. T. (1939), Optimal order in the method of paired comparisons. *Journal of the Exp. Psychology*, 25, s. 414-424.
- ROSSING, T. D., F. R. Moore, P. A. Wheeler (2002), The science of sound. *Third edition*, Addison Wesley, San Francisco 2002.
- ROTTONDI, Cristina, et al. (2016), An overview on networked music performance technologies. *IEEE Access*, 4, s. 8823-8843.
- ROTTONDI, et al. (2017), An Overview on Networked Music Performance Technologies. In: *IEEE Access open access journal*, DOI 10.1109.
- SAYLES, Mark and Ian M. Winter (2008), Reverberation challenges the temporal representation of the pitch of complex sounds. *Neuron*, 58 s. 789–801.
- SCHON, Daniele et al. (2010), The evocative power of sounds: Conceptual priming between words and nonverbal sounds. *Journal of cognitive neuroscience*, 22(5), s. 1026-1035.
- SETHARES, William (2005), Tuning, timbre, spectrum, scale (Springer-Verlag, London). s. 27–32. ISBN: 978-1-85233-797-1.
- SHORT, J. C. et al (2010), Construct validation using computer-aided text analysis (CATA) an illustration using entrepreneurial orientation. *Organizational Research Methods*. 13, s. 320-347.
- SIEDENBURG, Kai, Ichiro Fujinaga, a Stephen McAdams (2016), A Comparison of Approaches to Timbre Descriptors in Music Information Retrieval and Music Psychology. *Journal of New Music Research*, 45(1), s. 27-41.
- ŠPELDA, A. (1978), Hudební akustika: Pro posluchače filosofických a pedagogických fakult a akademií múzických umění. Praha: Státní pedagogické nakladatelství.
- SRIKANTA, Mishra K., Manasa R. Panda a Swapna Raj (2015), Influence of musical training on sensitivity to temporal fine structure. *International Journal of Audiology*, 54(4), s. 220-226.
- STABLES, et al. (2016), Semantic description of timbral transformations in music production. In: *MM '16, Amsterdam, Netherlands*.
- STATISTICA™ (1994), General conventions & Statistics I, Statistics II, Vol. I, III, StatSoft™, Tulsa.
- STEELE, M. Kenneth a Amber K. Williams (2006), Is the bandwidth of timbre invariance only one octave? *Music Perception*, 23(3) s. 215-220.

- ŠTĚPÁNEK, J. (2002), The Study of Violin Timbre Using Spontaneous Verbal Description and Verbal Attribute Rating, *Forum Acusticum Sevilla 2002* (ISBN 84-87985-06-8), MUS-06-008.
- ŠTĚPÁNEK, J. (2005), "Interpretation and comparison of perceptual spaces", *Inter-Noise 2005, Rio de Janeiro*, CD-ROM, file: \papers\doc_1627.pdf.
- ŠTĚPÁNEK, J. (2006), Musical sound timbre: Verbal description and dimensions. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Digital Audio Effects 2006. Montreal, Quebec, Canada*, s. 121-126.
- ŠTĚPÁNEK, J., et al (1997), Violin Tones Spectra and their Relationship to Perceived Sound Quality, In *Proceedings of the Institute of Acoustics ISMA'97*, 19 (5), Edinburgh, s. 125-130.
- STEPANEK, J. a Z. Otcenasek (2001), Psychoacoustic Aspects of Violin Sound Quality and its Spectral Relations, *17th ICA, Rome*, CD IV – Music.
- STEPANEK, J., Z. Otcenasek a A. Melka (1999), Comparison of five perceptual timbre spaces of violin tones of different pitches, *CD-ROM of Joint Meeting 137th ASA, 2nd EAA Forum Acusticum, 25th DAGA Berlin*, 5aMUb5.
- ŠTĚPÁNEK, Jan (2005), Interpretation and comparison of perceptual spaces. In: *Inter-noise and noise-con Congress and Conference Proceedings*. Institute of Noise Control Engineering, 2005. p. 3280-3288.
- ŠTĚPÁNEK, Jan a Ondřej Moravec (2005), *Barva zvuku a její slovní popis*. Praha: Nakladatelství HAMU, 47 s. ISBN 80- 7331-031-7.
- ŠTĚPÁNEK, Jan a Zdeněk Otčenášek (2003), Listener common and group perceptual dimensions in violin timbre. In: *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC 03), Stockholm 2003*, p. 663-666.
- STIRNAT, Claudia and Tim Ziemer (2019), Spaciousness in Music: the Tonmeister's Intention and the Listener's Perception. *EPiC Series in Technology*, 1, s. 42-51.
- SUSINI, Patrick et al. (2015), The effect of loudness on the perceptual representation of sounds with similar timbre. *Acta Acustica united with Acustica*, 101(6) s. 1174-1184.
- SUSINI, Patrick, et al. (2004), Characterizing the sound quality of air-conditioning noise. *Applied acoustics*, 65(8) s. 763-790.
- SUSINI, Patrick, Stephen McAdams a Suzanne Winsberg (1999), A multidimensional technique for sound quality assessment. *Acta acustica united with Acustica*, 85(5), s. 650-656.
- SUSINI, Patrick, Guillaume Lemaitre a Stephen McAdams (2011), Psychological measurement for sound description and evaluation, In: *Berglund et al. [ed.] Measurement with persons: theory, methods and implementation areas*, s. 227-253.
- SYKA, J., L. Voldřich, F. Vrabec (1981), *Fyziologie a patofyziologie zraku a sluchu*. Praha: Avicenum.
- SYLVAIN, Clement, Laurent Demany a Catherine Semal (1999), Memory for pitch versus memory for loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(5) s. 805-811.

TAKAO, H., T. Hashimoto a S. Hatano (1993), Quantification of Subjective Unpleasantness Using Roughness Level. SAE Technical Paper.

TAVAKOL Mohsen a Reg Dennick (2011) Making sense of Cronbach's alpha, *International journal of medical education*, 2, s. 53-55.

THEILE, Guenther (1991), On the naturalness of two-channel stereo sound. In: *Audio Engineering Society Conference: 9th International Conference: Television Sound Today and Tomorrow*. Audio Engineering Society, 1991.

THOMPSON, Sam a Aaron Williamon (2003), Evaluating Evaluation: musical performance assessment as a research tool. *Music Perception*, 21(1) s. 21–41.

THORET, Etienne, Philippe Depalle a Stephen McAdams (2016), Perceptually salient spectrotemporal modulations for recognition of sustained musical instruments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 140(6) s. 478 – 483.

TINIO, Pablo (2013), From artistic creation to aesthetic reception: the mirror model of art. *Psychology of aesthetics, creativity and the arts*, 7(3) (2013) s. 265.

TSAI, C. G. et al. (2010), Aggressiveness of the Growl-like Timbre: Acoustic Characteristics, Musical Implications and Biomechanical Mechanisms, *Music Perception*, 27(3), s. 209-221

TSAI, Chen-Gia, (2004), Auditory Grouping in the Perception of Roughness Induced by Subharmonics: Empirical Findings and a Qualitative Model. *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics*, Nara, Japan.

TVERSKY A. (1977), Features of similarity. *Psychological review*. 84 s. 327-352.

VALIN, J. et al. (2013), High-quality, low-delay music coding in the opus codec, In: *Proceedings of the Audio Engineering Society Convention*, 8942 s.

VASSILAKIS, P. N. (2005), Auditory roughness as a means of musical expression, "Selected Reports in Ethnomusicology", *Departement of Ethnomusicology, University of California*, 12, s. 119-144.

VASSILAKIS, Pantelis N., Roger A. Kendall (2010), Psychoacoustic and cognitive aspects of auditory roughness: definitions, models, and applications. In: *Human Vision and Electronic Imaging XV. International Society for Optics and Photonics*.

VASTFJAL, Daniel et al. (2002), Affective evaluations of and reactions to exterior and interior vehicle auditory quality, *Journal of Sound and Vibration*. 255(3) s. 501-518.

VENCOVSKÝ, V. (2014), Modeling roughness perception for complex stimuli using a model of cochlear hydrodynamics. In: *Proceedings of International Symposium of Musical Acoustics (ISMA 2014)*, p. 483-488.

WAGENAAR, W. A. a P. Padmos (1971), Quantitative interpretation of stress in Kruskal's multidimensional scaling technique, *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 24(1), s.101-110.

WALLMARK, Zachary (2019), A corpus analysis of timbre semantics in orchestration treatises. *Psychology of Music*, 47(4) s. 585-605.

WALLMARK, Zachary a Roger A. Kendall (2018), Describing Sound: The Cognitive Linguistics of Timbre.

WINTER, Bodo (2019), Sensory Linguistics: Language, Perception, and Metaphor, 2019, xiv, 289 pp ISBN 9789027203106

ZACHARAKIS, Asterios, Konstantinos Pasiadis, Joshua D. Reiss (2012), An interlanguage study of musical timbre semantic dimensions and their acoustic correlates. Music Perception: *An Interdisciplinary Journal*, 31(4), s. 339-358.

ZWICKER, Eberhard a Hugo Fastl (1999), Psychoacoustics: facts and models. Heidelberg:Springer-Verlag Berlin. 463 s. ISBN 978-3-540-23159-2.