

AKADEMIE MÚZICKÝCH UMĚNÍ V PRAZE

**HUDEBNÍ A TANEČNÍ FAKULTA**

HUDEBNÍ UMĚNÍ

ZPĚV

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**VLIV KLOBOUKU NA AKUSTICKÉ CHARAKTERISTIKY  
ZPĚVNÍHO HLASU**

**Ing. Jan Janda, Ph.D.**

Vedoucí práce: MgA. Roman Janál

Oponent práce: doc. Mgr. art. Helena Kaupová

Datum obhajoby:

Přidělovaný akademický titul: BcA.

Praha, 2018

ACADEMY OF PERFORMING ARTS IN PRAGUE

**MUSIC AND DANCE FACULTY**

Art of Music

Voice

BACHELOR´S THESIS

**THE INFLUENCE OF THE HAT ON THE ACOUSTIC  
CHARACTERISTICS OF THE SINGING VOICE**

**Ing. Jan Janda, Ph.D.**

Thesis Supervisor: MgA. Roman Janál

Thesis Opponent: doc. Mgr. art. Helena Kaupová

Date of thesis defense:

Academic title granted: BcA.

Prague, 2018

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma

VLIV KLOBOUKU NA AKUSTICKÉ CHARAKTERISTIKY ZPĚVNÍHO HLASU

vypracoval(a) samostatně pod odborným vedením vedoucího práce a s použitím uvedené literatury a pramenů.

Praha, dne .....

.....  
podpis diplomanta

## **Upozornění**

Využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, nebo jakékoliv nakládání s nimi je možné pouze na základě licenční smlouvy tj. souhlasu autora a AMU v Praze.



## **Poděkování**

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří před touto prací smekli.

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá objektivizací akustických změn při zpěvu s pokrývkou hlavy. Nejprve představuje zvukový materiál použitý pro měření, detailně rozebírá jednotlivé členy nahrávacího řetězce a odůvodňuje konkrétně použitý záznamový hardware. Zaměřuje se také na následné číslicové zpracování zvukového signálu. Následně se věnuje výběru vhodných akustických charakteristik ve spektrální i časové oblasti a ozřejmuje způsob jejich výpočtu.

Na základě těchto charakteristik dochází k závěru, že klobouk ovlivňuje pěvcův tón z hlediska hlasitosti, barvy i nosnosti.

**Klíčová slova:** Hlas, zpěv, klobouk, akustická analýza

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the objectification of acoustic changes in singing with the cover of the head. Shows the sound material used for the measurement, analyzes in detail the parts of the recording system and justifies used recording hardware. It also focuses on the subsequent digital processing of the audio signal. Subsequently, focuses on the selection of suitable acoustic characteristics in the spectral and time domains and explains how they are calculated.

Based on these characteristics, it concludes that the hat influences the singer's tone in terms of volume, color and vigour.

**Key words:** Voice, singing, hat, acoustic analysis

# Obsah

<b>Abstrakt</b>	<b>3</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2 Zkoumaný materiál a metody</b>	<b>4</b>
2.1 Nahrávaný zvukový materiál . . . . .	4
2.2 Popis nahrávacího řetězce . . . . .	5
2.2.1 Mikrofon . . . . .	5
2.2.2 Mikrofonní předzesilovače . . . . .	8
2.2.3 Analogově–digitální převodník . . . . .	8
2.3 Předzpracování signálů . . . . .	9
2.3.1 Odstranění stejnosměrné složky signálu . . . . .	9
<b>3 Akustické a fonetické analýzy</b>	<b>10</b>
3.1 Energetické hodnoty . . . . .	10
3.1.1 Směrová charakteristika . . . . .	14
3.2 Spektrální charakteristiky . . . . .	15
3.2.1 Spektrogram . . . . .	16
3.2.2 Jasnost tónu . . . . .	17
3.2.3 Nosnost tónu . . . . .	19
<b>4 Závěr</b>	<b>21</b>
<b>Literatura</b>	<b>23</b>



## Seznam obrázků

2.1	Frekvenční charakteristika mikrofonu DPA 4099 s vyznačeným proximity efektem. . . . .	6
2.2	Normalizovaná směrová charakteristika mikrofonu DPA 4099. . . . .	7
3.1	Akustický výkon jednotlivých vokálů v přímém směru. . . . .	11
3.2	Akustický výkon jednotlivých vokálů ve směru na balkon. . . . .	12
3.3	Fragment směrové charakteristiky vyzařování akustického výkonu . . .	14
3.4	Percepční prostor podle [MEL95]. . . . .	15
3.5	Spektrogram vokálu u při sejmutí a nasazení klobouku. . . . .	16

## Seznam tabulek

3.1	Pokles výkonu I . . . . .	13
3.2	Pokles výkonu II . . . . .	13
3.3	Porovnání úbytku jasnosti tónu jednotlivých vokálů vlivem klobouku. $f_1$ je frekvence 1. harmonické, $f_{tb}$ je frekvence spektrálního těžiště bez klobouku, $f_{ts}$ je frekvence spektrálního těžiště s kloboukem a $J_b$ resp. $J_s$ jsou jasnosti tónů bez klobouku resp. s kloboukem podle definice 3.5 .	18
3.4	Ovlivnění nosnosti hlasu útlumem v pásmu pěveckého formantu. $P_b$ je výkon signálu v pásmu pěveckého formantu bez klobouku, $P_s$ je výkon signálu v pásmu pěveckého formantu s kloboukem . . . . .	19

# Seznam použitých symbolů

$n$	index vzorku
$s(n), x(n)$	diskrétní signál indexu $n$
$\mu_s$	střední hodnota signálu $s$
$N$	celkový počet uvažovaných vzorků
$E$	energie signálu
$P$	výkon signálu
$f_s$	vzorkovací kmitočet
$X(k)$	diskrétní spektrum signálu $x$
$h_k$	velikost $k$ -té harmonické složky
$J$	míra jasnosti tónu
$f_t$	frekvence spektrálního těžiště
$f_1$	frekvence 1. harmonické složky
$T_i$	délka $i$ -té periody
$F_i$	$i$ -tý formant

# 1 Úvod

*„...a pane režisére, nemohl bych si alespoň na árii sundat ten klobouk? Víte, ono mi to bere zvuk.“<sup>1</sup>*

*„Nesmysl!!!“*

Nesmysl?

Opravdu snižuje klobouk dynamiku zpěvu? A není to jen subjektivní pocit, který řeší každý pěvec při zhoršených akustických podmínkách? A pokud ne, mění se s pokrývkou hlavy i barva a srozumitelnost hlasu? A jak je to s nosností hlasu, ponese se se stejnou lehkostí i na poslední místa na balkonech, nebo je opravdu lépe smeknout?

V hudební praxi je často patrná snaha objektivně posoudit zvukové vlastnosti daného hlasu nebo hudebního nástroje. Je proto užitečné pozorovat souvislosti mezi měřitelnými akustickými charakteristikami a subjektivním vjemem zvukové kvality. Exaktní zhodnocení alespoň základních akustických kvalit umožňuje porovnat různé hlasy za různých vnějších podmínek. Objektivní zhodnocení je v čase stálé a může být prováděno nezávisle více lidmi.

Cílem práce bude navrhnout některé metody vedoucí k objektivizaci základních akustických charakteristik při zpěvu s kloboukem a bez něj.

Hudební signál nese ze subjektivního pohledu informaci o výšce, síle a barvě. Percepce výšky tónu je odrazem vnímání objektivního parametru zvuku – frekvence. Hlasitost vnímaného tónu zase velice silně koreluje s akustickým výkonem zvukové vlny v místě poslechu. Vjem barvy už je poměrně komplikovaný kvůli své vícerozměrnosti, ale lze konstatovat, že úzce souvisí se spektrální strukturou tónu.

---

<sup>1</sup>Oblékaná zkouška v divadle

Matematický aparát pro výpočet akustických parametrů je samozřejmě naprosto objektivní. Choulostivý na dodržení konstantních podmínek je však celý řetězec předtím – od generování tónu až po jeho sejmutí, zesílení a digitalizaci. Proto je těmto úkonům věnována v příslušné kapitole velká pečlivost.

Rozvoj takovýchto metod má velký význam i při posuzování hlasových patologií a může být nápomocný při diagnostice hlasových poruch.

## 2 Zkoumaný materiál a metody

### 2.1 Nahrávaný zvukový materiál

Pro potřeby tohoto výzkumu byly pořízeny zvukové nahrávky ve studiových podmínkách. K nahrávání byli přizváni dva pěvci. Pěvec barytonového a pěvkyně mezzosopránového oboru. Vzhledem k tomu, že by bylo neobjektivní posuzovat zvláště nahrávky tónů pořízených s kloboukem a tónů znovu nasazených bez klobouku, byli pěvci požádáni, aby klobouk smekli a znovu si nasadili během drženého vokálu.

Instrukce zněly tak, že má pěvec dbaje stálosti intenzity, intonace a dalších parametrů drženého vokálu v duchu napočítat do tří, sejmut klobouk, znovu napočítat do tří, klobouk znovu nasadit a opět napočítat do tří. Celý úkon tedy vyžadoval cca devět sekund fonace. Takto se nám do zkoumaného materiálu promítly i cenné tranziční jevy, ke kterým dochází během sundávání a nandávání klobouku. Porovnáním obou úseků fonovaných s nasazeným kloboukem co do akustických parametrů, se můžeme přesvědčit, zda během celého úkonu nedošlo ze strany pěvce k porušení onoho pravidla stálosti. Pokud k tomu přeci jen došlo, byla nahrávka vyřazena z výzkumu.

Barytonista nahrál držené vokály /a/, /e/, /i/, /o/ a /u/ ve středu svého rozsahu, tedy na tónu malé *a* (220 Hz):



Mezzosopranistka nahrála tytéž vokály na tónu *a1* (440 Hz):



Oba poté ještě stejným způsobem nahráli drženou sykavku /s/ a /š/. Pěvci pro potřeby nahrávání použili tentýž pánský klobouk obvyklého typu, neb jest předpoklad, že při použití větších a módně propracovanějších divadelních klobouků se případný efekt na akustice hlasu jen zvýší.

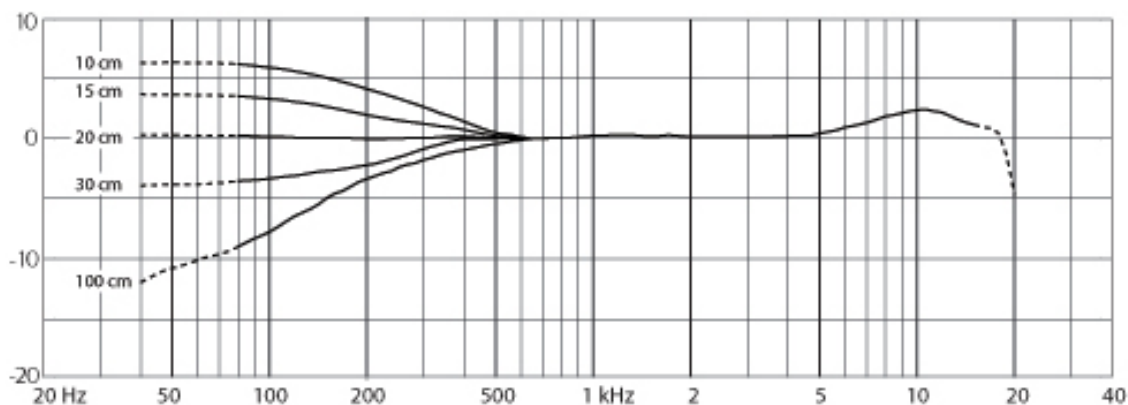
Samotné snímání bylo provedeno dvěma mikrofony v různé výšce. První mikrofon byl od pěvce vzdálen 1 metr a byl ve výšce jeho úst. Tím byl simulován filtrační efekt klobouku směrem k posluchačům přímo před pódiem. Druhý mikrofon byl z důvodu zachování podmínek měření vzdálen od pěvce rovněž 1 metr, avšak byl umístěn o půl metru výš než první. Pěvce tedy snímal pod úhlem  $30^\circ$  ( $\arcsin(0.5) = 30$ ) a simuloval tak směr k posluchačům na balkóně.

V dalším textu tedy budeme používat termíny přímý směr a směr na balkón. Požitím dvou mikrofonů získáme alespoň v náznaku kus vertikální směrové charakteristiky a odhalíme případnou směrovost klobouku jako filtru.

## 2.2 Popis nahrávacího řetězce

### 2.2.1 Mikrofon

Pro nahrávání zpěvního hlasu můžeme použít dynamický, malomembránový kondenzátorový nebo velkomembránový kondenzátorový mikrofon.



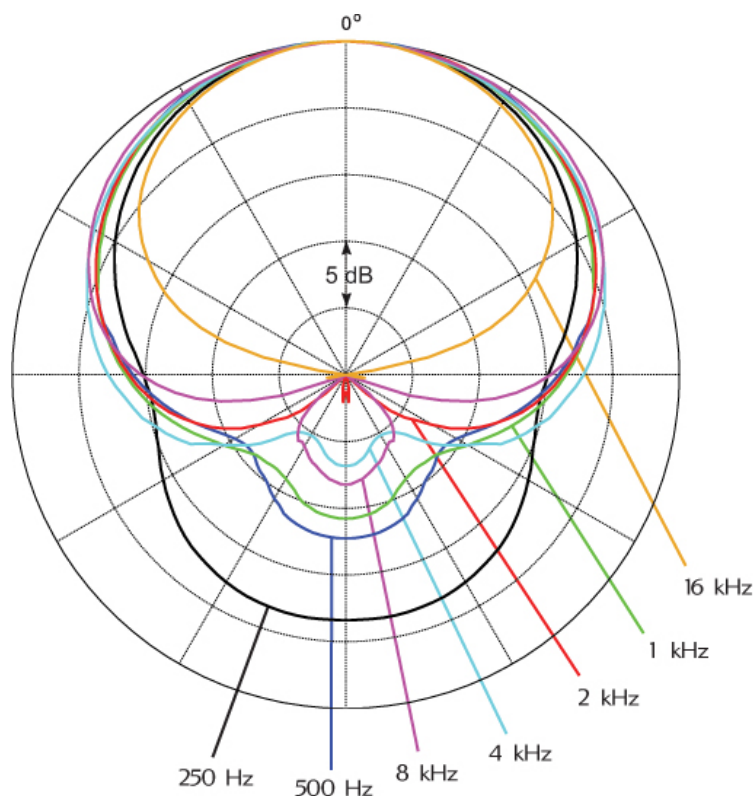
**Obrázek 2.1:** Frekvenční charakteristika mikrofonu DPA 4099 s vyznačeným proximity efektem. <sup>1</sup>

Konstrukčním základem dynamického mikrofonu je tenká plastická membrána spojená s jemnou cívkou pohybující se v magnetickém poli permanentního magnetu. Dopadající akustická vlna rozkmitá tuto membránu a v závitech cívky vznikne elektrický proud. Tento velmi slabý proud je odváděn do mikrofonního předzesilovače. Mezi výhody dynamického mikrofonu patří relativně vyšší odolnost proti zpětné vazbě a značná tolerance k vysokým akustickým tlakům. Velkou nevýhodou dynamických mikrofonů je právě slabý výstupní signál, který je nutno více zesílit, čímž vzrůstá nežádoucí šum. Rovněž hmotnost membrány a cívky zapříčiňuje pokles frekvenčního rozsahu směrem k vyšším kmitočtům a dynamický mikrofon má tedy nepříliš vyrovnanou frekvenční charakteristiku.

Vhodnější je použití kapacitního (kondenzátorového) mikrofonu. Princip jeho funkce spočívá v tom, že pokud se změní vzdálenost mezi deskami nabitého kondenzátoru, změní se mezi nimi i napětí. Konstrukčně je jedna deska pevně uchycena a druhá funguje jako membrána. Přítomnosti elektrického náboje na deskách je dosaženo takzvaným fantomovým napájením. Kondenzátorové mikrofony jsou oproti dynamickým mnohem citlivější a při použití kvalitních předzesilovačů produkují přijatelně nízký šum. Díky velice lehké membráně přenáší věrně i vysoké frekvence a jejich frekvenční charakteristika je vyrovnaná. Pro zaostření citlivosti mikrofonu pouze směrem k nahrávanému pěvci je vhodné použít kardioidní směrovou charakteristiku.

<sup>1</sup>Převzato z [www.dpamicrophones.com](http://www.dpamicrophones.com), [online]. [cit. 1.4.2018]

Pro nahrávání byl nakonec zvolen kondenzátorový mikrofon d:vote™ 4099 dánské firmy DPA. Tento model se superkardioidní směrovou charakteristikou dobře poslouží pro nahrávání lidského hlasu. Má 100  $\Omega$  výstupní impedanci a standardní XLR konektor se zabudovanou elektronikou filtru typu horní propust. Ta slouží k redukci případného proximity efektu. Tento nežádoucí efekt se projevuje narůstáním basů s přibližujícím se mikrofonem ke zdroji zvuku. Na obrázku 2.1 je zakreslena amplitudová frekvenční charakteristika mikrofonu DPA 4099 se zabudovanou horní propustí pro různé vzdálenosti od zdroje zvuku. Z obrázku je patrné, že ideální vzdálenost je cca 20 cm. Pro snímání zdroje vzdáleného 1 metr tak musel být použit konektor bez redukce proximity efektu. Hodnoty v grafech jsou platné za předpokladu správného napájení doporučovaného výrobcem, tedy 48 V stejnosměrného napětí. Obrázek 2.2 znázorňuje směrovost mikrofonu v normalizované směrové charakteristice.



**Obrázek 2.2:** Normalizovaná směrová charakteristika mikrofonu DPA 4099.<sup>2</sup>

Ke snímání byly použity dva identické mikrofony DPA 4099, jednalo se tedy v principu o stereofonní snímání. Nahrávání probíhalo v zatlužené místnosti a případné zbytkové

<sup>2</sup>Převzato z [www.dpamicrophones.com](http://www.dpamicrophones.com), [online]. [cit.2.4.2018]



odrazy účinně eliminovala zvolená superkardioidní charakteristika mikrofonů.

## 2.2.2 Mikrofonní předzesilovače

Co nejbližší za mikrofonem se musí nacházet mikrofonní předzesilovač. Jedná se o zařízení, které elektrický signál z mikrofonu upraví a zesílí na úroveň odpovídající vstupnímu rozsahu následného analogově–digitálního (A/D) převodníku. Součástí takovýchto zařízení bývá i fantomový napáječ, který mikrofonům dodá výše zmíněných potřebných 48 V stejnosměrného napětí. Jelikož je celý nahrávací řetězec zapojen v sérii, je celková kvalita záznamu nejvíce závislá na jeho nejslabším článku. Proto byla i výběru předzesilovače věnována značná pozornost.

Vzhledem k tomu, že byly ke snímání použity dva mikrofony, měl by být předzesilovač alespoň dvoukanalový. Vynikajících parametrů dosahují předzesilovače Onyx americké firmy Mackie. Mají zisk zesílení až 60 dB, dynamický rozsah 128,5 dB a zkreslení pod 0,0007 % ve frekvenčním pásmu (20 Hz –50 kHz). Vstupní impedance mikrofonního vstupu je 2,55 k $\Omega$ . Těmito vynikajícími předzesilovači osazuje firma Mackie analogové mixážní pulty řady VLZ4, z nichž byl použit model se dvěma mikrofonními vstupy, který nese označení 402VLZ4.

Propojení s mikrofony bylo provedeno symetrickým vedením stíněnými kabely s XLR konektory Neutrik. Zisk předzesilovače byl nastaven na hodnotu 35 dB.

## 2.2.3 Analogově–digitální převodník

Analogově–digitální (A/D) převodníky mají velký vliv na kvalitu digitální nahrávky a obvyklé čipy zvukových karet běžných počítačů nedosahují potřebných parametrů. Umístění A/D převodníku do PCI karty uvnitř počítače také značně zhoršuje některé specifikace A/D převodu zejména vlivem nežádoucích interferencí s ostatními komponenty běžného počítače. Mnohem lepších výsledků lze dosáhnout s převodníkem externím. Při absenci odrušeného počítače umístěného kvůli hluku chladicího systému mimo na-

hrávací místnost se jeví nejvhodnějším použitím A/D převodníku s vlastní pamětí, tedy rekordéru.

K digitalizaci zpěvního hlasu bylo použito velmi kvalitního, a zároveň dostupného rekordéru Roland Edirol R-09HR. Ten disponuje stereofonní A/D konverzí o hloubce až 24 bitů při vzorkovacím kmitočtu 96 kHz. Jmenovité linkové napětí má standardní 2 dBu a vstupní impedanci 15 k $\Omega$ . Frekvenční rozsah konverze je 20 Hz až 40kHz.

Z mikrofonního předzesilovače byl signál veden již nesymetrickým stereofonním kabelem do zdířky line-in. Signál byl digitalizován při vzorkovací frekvenci 44,1 kHz a bitové hloubce 16 bit do zvukového formátu WAV. Ovladače rekordéru byly ve všech případech nastaveny: Limiter/AGC – OFF, Plug-in power – OFF, Low cut – OFF, Mic gain – L, Input level – 60. Všechny fonace byly tedy nahrány se stejným zesílením a je tedy možno provádět i analýzy energií.

## 2.3 Předzpracování signálů

### 2.3.1 Odstranění stejnosměrné složky signálu

Vzhledem k tomu, že zkoumané signály byly podrobeny různým experimentům, z nichž některé mohly používat energeticky závislé parametry, bylo vhodné nejprve odstranit stejnosměrnou složku:

$$s'(n) = s(n) - \mu_s. \quad (2.1)$$

Střední hodnotu  $\mu_s$  lze stanovit buď *off-line* po ukončení signálu, nebo ji při *on-line* zpracování rekurentně odhadovat. Protože však budeme dále používat algoritmy, které z principu vyžadují kompletní ukončené signály, nebudeme on-line přístup uvažovat. Tedy:

$$\mu_s = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s(n). \quad (2.2)$$

## 3 Akustické a fonetické analýzy

### 3.1 Energetické hodnoty

Asi nejzákladnější charakteristikou, která úzce souvisí s vnímanou hlasitostí signálu, je energie. Vzhledem k tomu, že signály nahrané do obou mikrofonů byly nahrány ze stejné vzdálenosti a se stejným zesílením, může nám případný pokles energie zobektivizovat pocit snížení vnímané hlasitosti zpěvu po nasazení klobouku.

Energii  $E$  diskrétního signálu  $x$  můžeme spočítat jako

$$E = \sum_{n=1}^N (x(n))^2, \quad (3.1)$$

kde  $N$  je počet vzorků, ze kterých energii počítáme. Pokud tedy chceme znát energii tónu za časový úsek například 1 s, bude počet vzorků  $N = 1 \cdot f_s$ , kde  $f_s$  je vzorkovací kmitočet – v našem případě  $f_s = 44,1$  kHz. Pokud hodnotu energie vztáhneme k délce časového úseku, můžeme hovořit o akustickém výkonu.

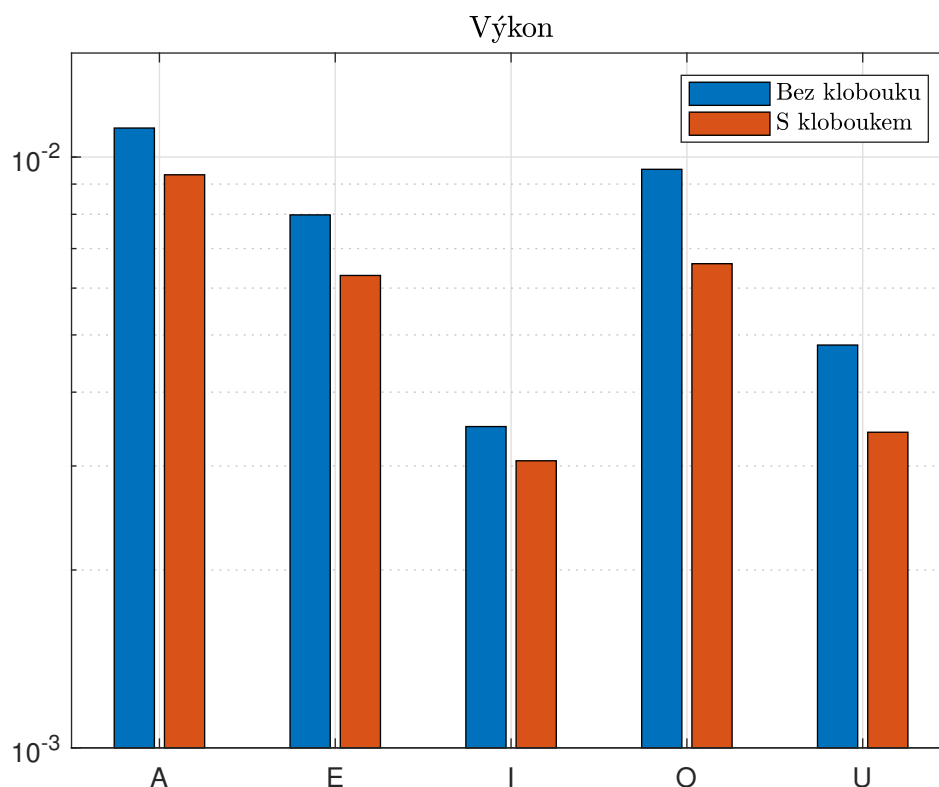
Vnímaná hlasitost ale neroste s výkonem akustického signálu lineárně, ale spíše logaritmicky. Hovoří o tom Weber-Fechnerův psychofyzikální zákon, který říká:

*Mění-li se fyzikální podněty působící na naše smysly řadou geometrickou, vnímáme jejich změnu v řadě aritmetické.*

Z toho důvodu byly hodnoty výkonů přepočítány do logaritmické škály  $E_L$ .

$$E_L = 10 \log \frac{E}{E_0}. \quad (3.2)$$

Velikost vztažného výkonu  $E_0$  (tedy výkon odpovídající hodnotě 0 dB) byla ponechána bez fyziologického významu a zvolena libovolně.

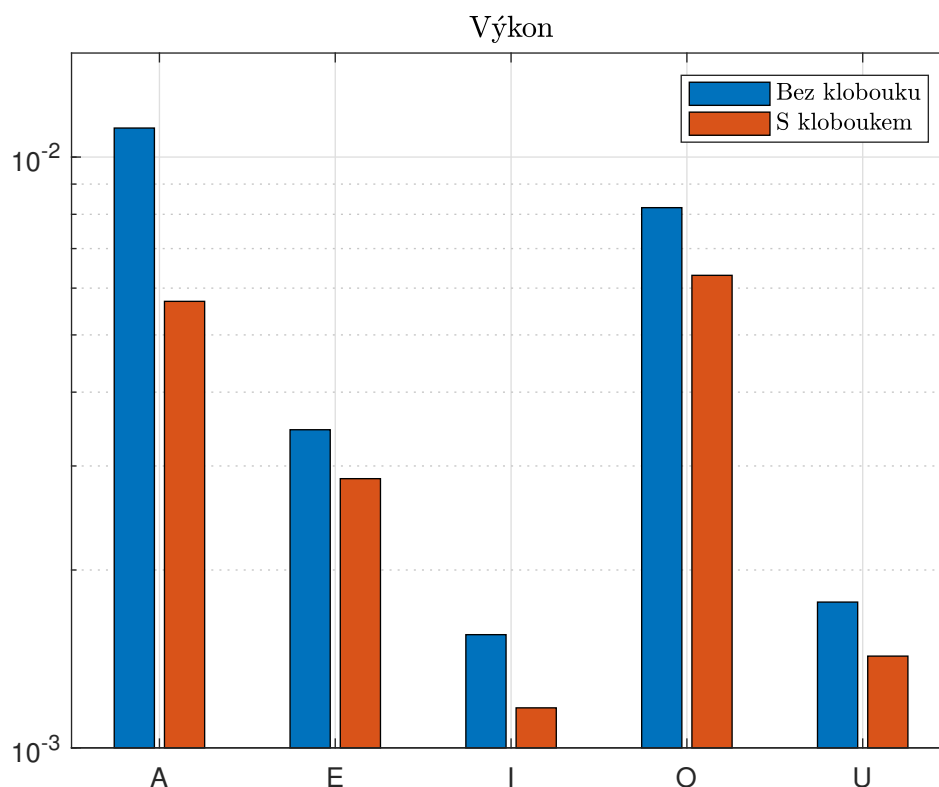


**Obrázek 3.1:** Akustický výkon jednotlivých vokálů v přímém směru.

Obrázek 3.1 shrnuje výkon fonací jednotlivých vokálů v přímém směru. Použity byly úseky o délce cca 1 s vždy nejprve bez klobouku a poté s kloboukem. Bylo dbáno na to, aby byla pro analýzy použita jen ta část vokálu, v níž již proběhly veškeré tranzientní jevy spojené se snímáním a nasazováním klobouku. Tedy ze tří sekund každé samohlásky jen ta prostřední sekunda.

Obrázek 3.2 pak stejným způsobem shrnuje výkon fonací jednotlivých vokálů ve směru na balkon.

Uvedené obrázky 3.1 a 3.2 nám odkrývají mnoho zajímavých skutečností. Na první pohled zaujme zjevná nevyrovnanost energetické křivky. Energie je v obou případech o mnoho nižší u úzkých vokálů /i/ a /u/. Je to vlastně příčina faktu důvěrně známého pěvecké pedagogice, totiž tzv. vyrovnávání vokálů. Nižší energie úzkých vokálů vyplývá z jejich fyzikální podstaty. Naproti tomu širší vokály /a/ a /e/ s větší energií, nemusí být posluchačem vždy percipovány jako sonornější. Rozhodující je i frekvenční rozmístění



**Obrázek 3.2:** Akustický výkon jednotlivých vokálů ve směru na balkon.

této energie. Úzké vokály mají od přírody větší nosnost a vyrovnají tím svůj energetický handicap vůči energičtějším širokým vokálům, které bývají naopak zapadlejší. Úkolem pěvecké metodiky je pak tyto aspekty energií a jejich rezonancí doladit, pokud možno ve vyrovnanou vokálovou křivku.

Pro účely této studie je však podstatnější zkoumaný pokles energie po nasazení klobouku. Díky volbě logaritmické škály na výkonové ose můžeme ony poklesy přímo porovnat relativně k energiím vokálů bez klobouku. Poklesy tedy budou udávány v decibelech [dB] a pro jednotlivé samohlásky je shrnuje tabulka 3.1. Dodejme ještě pro představu, pokles výkonu o pouhé 3 dB znamená ve skutečnosti pokles o celou polovinu výkonu.

$$10 \log \frac{1}{2} \doteq -3$$

Z přehledu vyplývá, že klobouk utlumuje každý vokál jinou měrou. Zdá se, že zadní vokály, jejichž znělost se zvyšuje trénovanou přední rezonancí, trpí vlivem klobouku

**Tabulka 3.1:** Pokles výkonu I

	změna výkonu v přímém směru [dB]	změna výkonu směrem na balkon [dB]
<b>A</b>	-1,82	-6,75
<b>E</b>	-2,36	-1,91
<b>I</b>	-1,33	-2,85
<b>O</b>	-3,68	-2,64
<b>U</b>	-3,40	-2,11

**Tabulka 3.2:** Pokles výkonu II

	celková změna výkonu v přímém směru [dB]	celková změna výkonu směrem na balkon [dB]
$\Sigma$	-2,54	-4,05

více než vokály, které jsou předního znění ze své podstaty. Rovněž platí, že klobouk více tlumí tóny linoucí se v elevaci směrem k domnělému balkónu. V tomto případě totiž klobouk zakrývá nejen značnou část hlavových rezonančních dutin, ale také svou šíří stojí přímo v cestě zvuku mezi ústy pěvce a mikrofonem. Ještě stojí za povšimnutí podezřele vysoká (resp. nízká) hodnota u vokálu /a/ směrem k balkónu. Považujme ji za odlehlou, neboť vznikla buď chybným nasazením klobouku o mnoho více do čela než u ostatních, případně ztrátou kontroly nad tónem samotného zkoumaného pěvce.

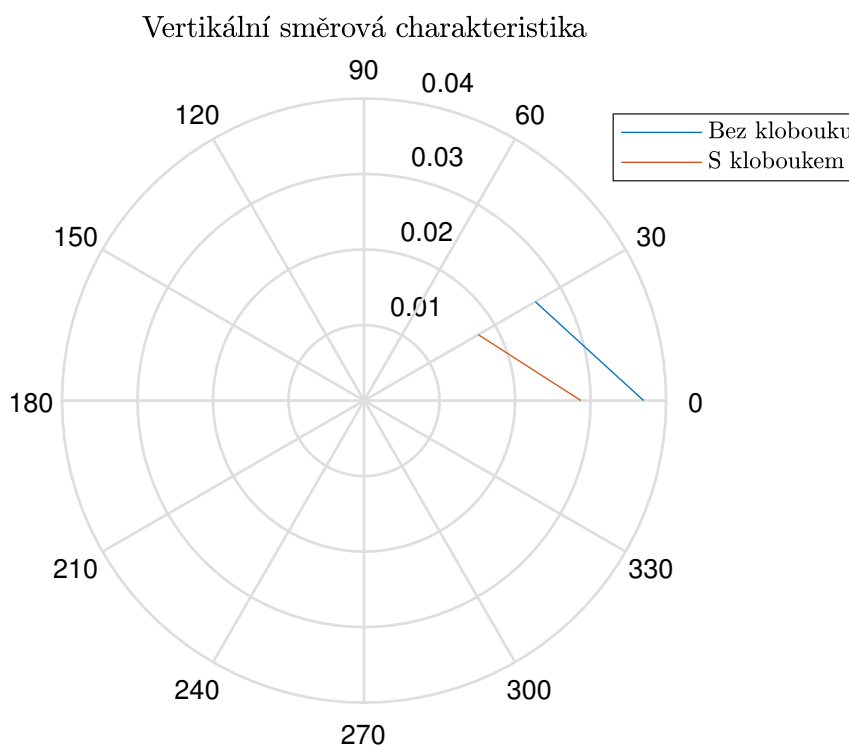
Tabulka 3.2 shrnuje celkový vliv klobouku přes všechny vokály. Tyto hodnoty již nesou mnohem větší statistickou významnost a mohou být závěrem této části.

### 3.1.1 Směrová charakteristika

Výsledky uvedené v závěru předešlé podkapitoly už v podstatě dávají jakýsi první fragment polární vyzařovací charakteristiky hlavy. Bylo by proto škoda jej na tomto místě neuvést. Jak již bylo zmíněno, signály máme k dispozici ze dvou mikrofonů umístěných ventrálně v mediální rovině pod úhly  $0^\circ$  a  $30^\circ$  v levotočivé orientaci.

Stejně je orientována i směrová charakteristika z obrázku 3.3. Obrázek čteme takto: představíme si pohled na hlavu pěvce z jeho pravé strany tak, že má ústa v průsečíku naznačených os. Vzdálenost od středu k barevné úsečce pak vyjadřuje míru akustického výkonu emitovaného do daného směru.

Lepší a podrobnější diagram bychom dostali použitím většího počtu mikrofonů.

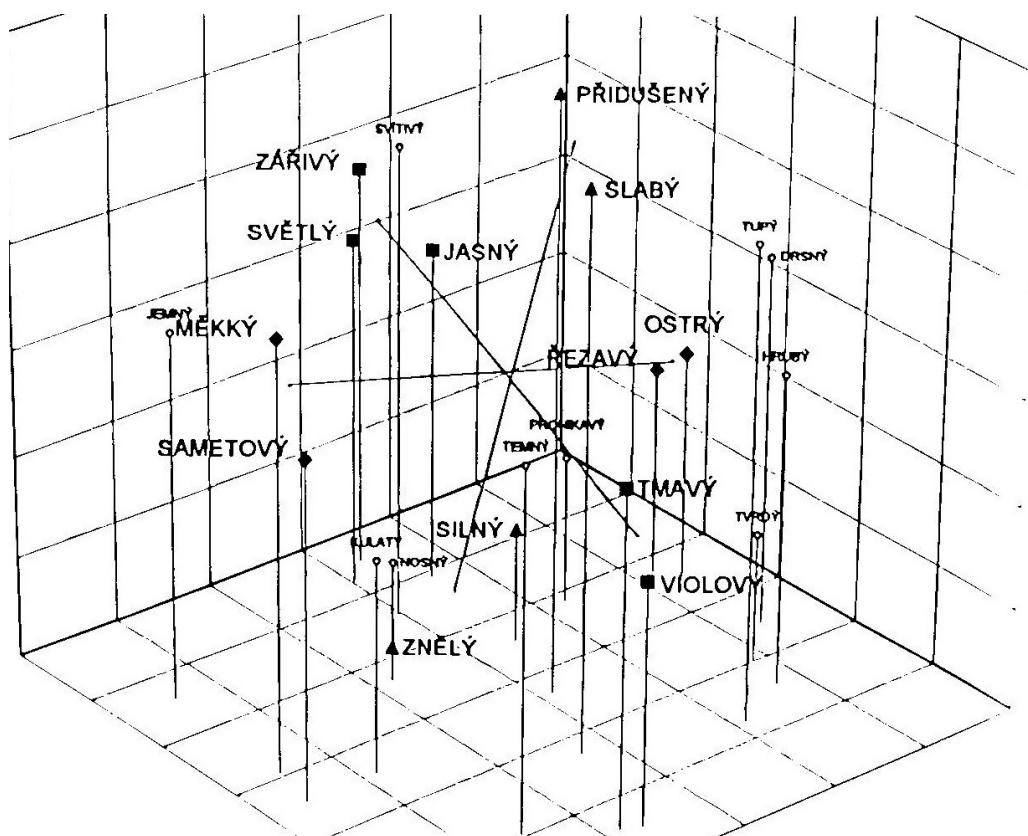


**Obrázek 3.3:** Fragment směrové charakteristiky vyzařování akustického výkonu

## 3.2 Spektrální charakteristiky

Celková energie, která je zmařena přítomností klobouku však není to jediné, co nás v této souvislosti zajímá. Méně zkušený pěvec v klobouku často netrpí pocitem nedostatku hlasu, ale má spíše obavy o jeho nosnost a znělost. Nakolik jsou tyto pocity pouze subjektivní nám odpoví charakteristiky související s barvou tónu. To se však již dostáváme do sféry spektrálních analýz.

Fyzik německého původu Georg Simon Ohm formuloval v roce 1843 základní psychoakustický zákon. Postuloval, že u periodických zvuků vyhodnocuje lidské ucho frekvenci a amplitudu jednotlivých dílčích kmitů jako vjem barvy zvuku. Barva tónu je tedy dána počtem a intenzitou jednotlivých harmonických složek.



Obrázek 3.4: Percepční prostor podle [MEL95].

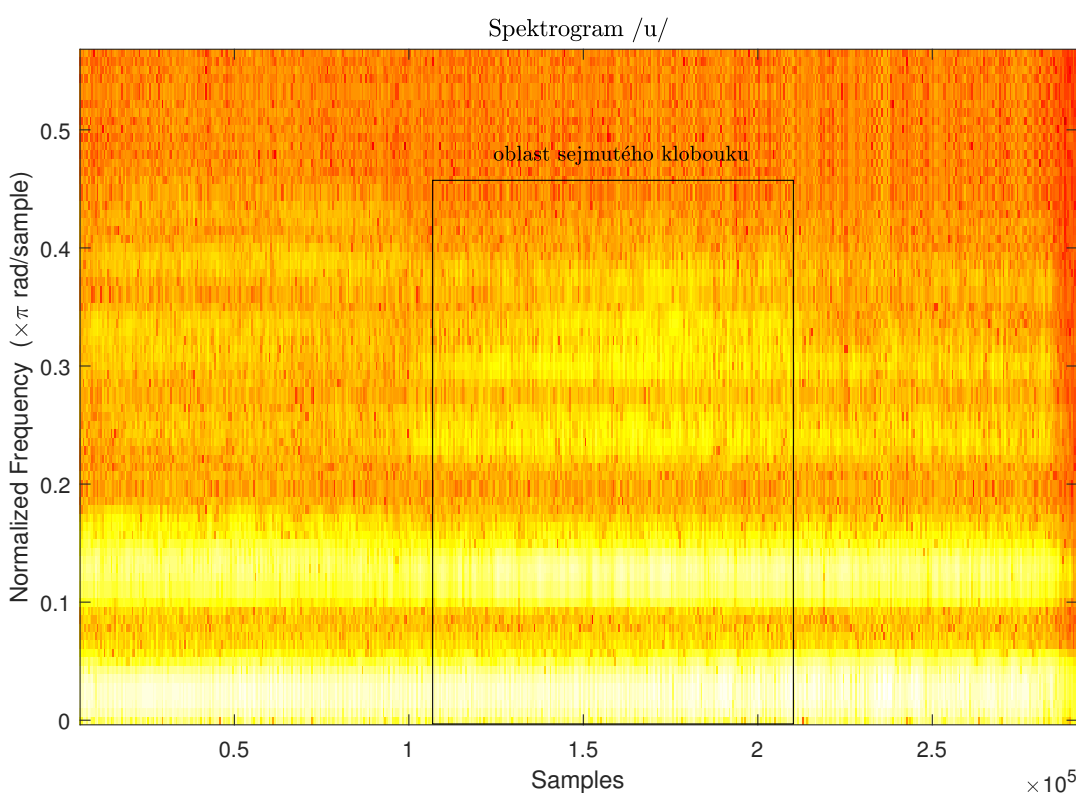


Přiřazení objektivního měření přívlastkovým párům, které jsou mezi hudebníky používány (světlý x tmavý, sametový x řezavý apod.), je velmi problematické. Autoři se obvykle přiklánějí k různým definicím tzv. percepčních prostorů. Například [MEL95] ve své práci o barvě houslových tónů definuje vždy tři přívlastkové dvojice, které tvoří základní dimenze percepčního prostoru (obr. 3.4).

### 3.2.1 Spektrogram

Pro stanovení frekvencí a amplitud jednotlivých harmonických složek použijeme diskrétní Fourierovu transformaci [UHL02], pomocí které získáme pro signál  $x(n)$  o délce  $N$  spektrum  $X(k)$  ve tvaru

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-jk(2\pi/N)n}. \quad (3.3)$$



**Obrázek 3.5:** Spektrogram vokálu u při sejmutí a nasazení klobouku.

Výsledkem jsou diskrétní harmonická spektra. Tato spektra můžeme spočítat vždy pro krátký úsek signálu<sup>1</sup> a poskládat je za sebe jako kulisy. Tím nám vznikne takzvaný spektrogram, který můžeme vidět na obr.3.5.

Spektrogram nám pomocí své barevné palety názorně ukazuje vývoj jednotlivých harmonických složek v čase. Jako příklad zde byl použit vokál /u/. Černým obdélníkem je naznačena oblast, kde si pěvec sňal klobouk. Už pouhým okem je v této oblasti vidět zesílení pěveckého formantu (podrobněji dále) a nárůst vyšších harmonických složek. To by mohlo skutečně souviset s vnímáním tónu jako jasnějšího. Pokusme se nyní tyto domněnky kvantifikovat.

### 3.2.2 Jasnost tónu

Pokud chceme vyčíslit jasnost tónu nějakou konkrétní charakteristikou, můžeme vyjít z poměru vyšších harmonických vůči základnímu tónu. [BEA82] určuje jasnost  $J$  jako

$$J = \frac{\sum_{k=1}^n kh_k}{\sum_{k=1}^n h_k}, \quad (3.4)$$

kde  $h_k$  je velikost  $k$ -té harmonické složky.

Podíváme-li se na vztah 3.4 pozorněji, zjistíme, že matematicky jde o vyjádření těžiště. Celkovou světlost tónu si tedy můžeme představit jako vzdálenost spektrálního těžiště od 1. harmonické  $f_1$ . Tedy

$$J = \frac{f_t}{f_1}, \quad (3.5)$$

kde  $f_t$  je poloha těžiště. Nechť je komplexní spektrum tónu  $S(f)$ , kde  $f$  je frekvence.

---

<sup>1</sup> Použito bylo Hammingovo okno o délce 128 a překryvem 120 vzorků

Spektrální těžiště můžeme definovat jako

$$f_t = \int_0^{\infty} f |S(f)|^2 df \quad (3.6)$$

děleno energií

$$\int_0^{\infty} |S(f)|^2 df. \quad (3.7)$$

Další číselné charakteristiky vhodné pro popis tvaru spektra jsou spektrální momenty vyšších řádů, tedy spektrální směrodatná odchylka, spektrální zešikmení a spektrální špičatost.

**Tabulka 3.3:** Porovnání úbytku jasnosti tónu jednotlivých vokálů vlivem klobouku.  $f_1$  je frekvence 1. harmonické,  $f_{tb}$  je frekvence spektrálního těžiště bez klobouku,  $f_{ts}$  je frekvence spektrálního těžiště s kloboukem a  $J_b$  resp.  $J_s$  jsou jasnosti tónů bez klobouku resp. s kloboukem podle definice 3.5

	$f_1/[Hz]$	$f_{tb}/[Hz]$	$f_{ts}/[Hz]$	$J_b$	$J_s$	Úbytek jasnosti
<b>A</b>	222,71	1372,61	1253,77	6,16	5,63	0,53
<b>E</b>	223,09	1303,42	1223,33	5,84	5,48	0,36
<b>I</b>	224,36	1755,13	1970,14	7,82	8,78	-0,96
<b>O</b>	223,22	1027,26	991,10	4,60	4,44	0,16
<b>U</b>	225,72	782,54	594,41	3,47	2,63	0,83

Tabulka 3.3 shrnuje veškeré výsledky analýzy jasnosti (světlosti, čitelnosti, neza-huhlanosti...) zkoumaných vokálů podle vztahů 3.4 a 3.5. První sloupec obsahuje základní frekvenci intonovaného vokálu  $f_1$ . V tomto případě jde o intonaci tónu *a*, který má jmenovitou frekvenci 220 Hz. Druhý a třetí sloupec obsahují frekvenci spektrálních těžišť  $f_t$  pro případ bez klobouku a s kloboukem. A sloupce  $J_b$  resp.  $J_s$  jsou jasnosti tónů bez klobouku resp. s kloboukem. Rozdíl mezi ukazatelem jasnosti tónu před a po nasazení klobouku je vypočten ve čtvrtém sloupci.

Je tedy patrné, že nejjasnějším vokálem podle dané definice je /i/ a naopak nejméně jasným /u/. Je rovněž vidět, že kromě velmi jasného vokálu /i/ klobouk vždy na jasnosti tónu ubere. Dokonce nejvíc „uškodí“ nejméně jasnému vokálu /u/.

### 3.2.3 Nosnost tónu

Schopnost člověka měnit artikulací rezonanční vlastnosti fonačního aparátu mu umožňuje jednotlivá lokální spektrální maxima vědomě zesilovat, a dokonce posouvat ze svých frekvencí daných alikvotní řadou. Takovýmto charakteristickým spektrálním maximům říkáme formanty. První tři z nich (F1, F2 a F3) mají zcela zásadní vliv na srozumitelnou artikulaci a následnou správnou percepci vokálů.

U klasicky školeného zpěvního hlasu se však ukázalo, že ve spektru správně posazeného tónu vzniká nápadný rezonanční vrchol v rozmezí 2100 – 3500 Hz [SVE96]. Tento vrchol se nazývá pěveckým formantem a propůjčuje hlasu značnou nosnost a čitelnost nad orchestrem. V obrázku 3.5 je tato formantová oblast zřetelně vidět jako druhý žlutý pruh odspodu mezi hodnotami 0,1 – 0,2 normované frekvence.

Jak ovlivňuje klobouk výkon ve spektrálním pásmu 2100 – 3500 Hz a jak moc tedy otupuje nosnost tónu shrnuje tabulka 3.4.

**Tabulka 3.4:** Ovlivnění nosnosti hlasu útlumem v pásmu pěveckého formantu.  $P_b$  je výkon signálu v pásmu pěveckého formantu bez klobouku,  $P_s$  je výkon signálu v pásmu pěveckého formantu s kloboukem

	$P_b/[mW]$	$P_s/[mW]$	<b>Pokles nosnosti</b>
<b>A</b>	1,99	1,09	0,90
<b>E</b>	1,54	0,71	0,84
<b>I</b>	1,00	0,88	0,12
<b>O</b>	1,25	0,60	0,65
<b>U</b>	0,45	0,12	0,32

I v tomto případě je patrné poměrně velké ovlivnění zpěvního hlasu kloboukem. U čtyř z pěti vokálů klesne vyzařovaný akustický výkon v oblasti důležitého pěveckého formantu na méně než polovinu. To je relativně větší pokles než u celkového výkonu. Z toho můžeme usuzovat, že tón zní nejen slaběji, ale ztrácí i značnou část své nosnosti

a není tedy kvalitativně srovnatelný s tónem, zpívaným týmž pěvcem, jen ve slabší dynamice.

## 4 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout některé metody vedoucí k objektivizaci základních akustických vlastností zpěvního hlasu při zpěvu s kloboukem a bez něj. Pro experimentální část práce byly autorem pořízeny nahrávky od dvou pěvců rozdílného oboru, přičemž každá nahrávka obsahovala deset kvasistacionárních akustických signálů intonovaných vokálů. Vždy se jednalo o případ zpěvu s kloboukem a bez klobouku.

V první části byla navržena metodika jednoduchého pořízení nahrávek pro experimentální účely. Důraz byl kladen na možnost opakovaného sběru akustických dat pro další zkoumání. Kromě snímání párem blízkých mikrofonů, které bývá zvykem používat i při komerčních studiových nahrávkách, by mohlo být v budoucnu přínosné snímat hlas i z větší vzdálenosti v akustice reálného koncertního sálu či divadla. Zdroj akustického vlnění by se tak více přiblížil bodovému a lépe by se hodnotila i nosnost i barva zvuku.

V experimentální části práce byly nahrávky podrobeny matematickým analýzám, které měly za cíl prozkoumat akustické vlastnosti jednotlivých tónů z hlediska jejich hlasitosti, barvy a nosnosti. Veškeré analýzy byly prováděny jednak pro směr vodorovně od pěvce a také pro směr mírně vzhůru, na pomyslný divadelní balkón

Hlasitost tónů byla objektivizována energetickými veličinami širokospektrálně. Zde se přítomnost klobouku podepsala nejvíce ve směru na balkón a to poklesem o 4 dB. Jasnost tónu vlivem klobouku utrpěla (kromě samohlásky /i/) ve všech případech a nejvíce ztratila na lesku už tak mírně „zapadlá“ samohlásky /u/.

Konečně nejvíce se klobouk podepsal na nosnosti tónu. Výkon v oblasti tzv. pěveckého formantu, který je za nosnost a průraznost tónu přímo odpovědný, utlumil na méně než polovinu.

Bylo tedy ukázáno a ověřeno, že klobouk tlumí zpěvní hlas měrou značnou a patrnou. Nejenže ubírá hlasu na dynamice, ale kvalitativně ho mění směrem k nejasnosti,

zahuhlanosti a dokonce ztrátě nosnosti. Přestože byl ve výzkumu použit jen jediný, a to klasický pánský klobouk, lze se domnívat, že klobouky větších rozměrů a odvážnějších tvarů způsobují přinejmenším totéž.

## Literatura

- [BEA82] BEAUCHAMP, J. W.: Synthesis by spectral amplitude and brightness matching of analyzed musical instrument tones.  
*Journal of the audio engineering society*, vol. **30**, no. 6, 1982
- [MAT1] *MATLAB Signal processing toolbox 6.8*. [software]  
The MathWorks, Inc., 2004
- [MEL95] MELKA A. et al.: *Výzkum vztahů barvy zvuku a spektra u izolovaných tónů houslí*.  
Praha: VUZORT, 1995
- [PSU06] PSUTKA J. et al.: *Mluvíme s počítačem česky*.  
Praha: Academia, 2006
- [SVE96] ŠVEC, J.: *Studium mechanicko-akustických vlastností lidského hlasu* (Dizertační práce). Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra experimentální fyziky, 1996.
- [UHL02] UHLÍŘ J., SOVKA P.: *Číslicové zpracování signálů*.  
Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002
- [VLA08] VLACHÝ V.: *Praxe zvukové techniky*  
Praha: Muzikus, 2008
- [ZAM75] ZAMAZAL V.: *Hudební nástroje před mikrofonem*  
Praha: Supraphon, 1975