



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## ANALÝZA FORMANTOVÝCH OBLASTÍ PŘI ZPÍVANÝCH SAMOHLÁSKÁCH

ANALYSIS OF FORMANT AREAS DURING SUNG VOWELS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

František Kukosa

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2016

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

**Student:** František Kukosa

**ID:** 165041

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Analýza formantových oblastí při zpívaných samohláskách**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Provedte měření spekter pěti zpěváků totožného nebo podobného rozsahu (např. tenoru) a v prostředí Matlab vytvořte funkci pro zobrazení časově proměnného modulového kmitočtového spektra a funkci pro nalezení polohy formantů u mluvených i zpívaných samohlásek i, e, a, o, u. Provedte měření tělesných rozměrů zpěváků (výšku, hruď, hlavu, krk, ústa, nos atd.). Analyzujte jednotlivá měření, identifikujte u zpěváků jejich formantové oblasti a dejte je do souvislosti s jejich tělesnými rozměry. Dedukujte rozměry kavit zpěváků. Určete, nakolik jsou u různých zpěváků při jednotlivých samohláskách zapojeny dané formantové oblasti. Porovnejte barvy a formanty zpěváků mezi sebou, zobecněte, v čem se liší a se kterými nástroji budou vytvářet homogennější nebo naopak rozdílnější mixtury.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] MIŠUN, V. Tajemství lidského hlasu. Brno: VUT v Brně, Nakladatelství VUTIAM, 2010.

[2] LADEFOGED, P., MADDIESON, I..The Sounds of the World's Languages, Blackwell, Oxford, 1996.

[3] BOROVIČKOVÁ, B., MALÁČ, V. The spectral analysis of Czech sound combinations. Praha: Academia, 1967.

[4] VOLÍN, J., STUDENOVSKÝ, D. Normalization of Czech vowels from continuous read texts, Proc. of the 16th ICPHS, p. 185–190, Saarbrücken, 2007.

**Termín zadání:** 1.2.2016

**Termín odevzdání:** 1.6.2016

**Vedoucí práce:** MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

**Konzultant bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady**

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ANOTACE

Práce se zabývá analýzou formantových oblastí mužských hlasů při zpívaných samohláskách pro plný (operní), hrudní a hlavový rejstřík. Výsledky se opírají o zpracování nahrávek pěti zpěváků, pořízených v bezodrazové komoře. Pro analýzu těchto nahrávek ve frekvenční doméně bylo použito algoritmu FFT a analýzy LPC. Výsledky práce popisují podstatu jednotlivých rejstříků z hlediska zapojení formantových oblastí a ukazují na důležitost zapojení zpěvních formantů při zpěvu. Především u operního rejstříku zpěvu, u kterého zpěvní formanty, společně s technikou přirozeného vibrata, zastávají významnou úlohu.

**Klíčová slova:** formant, zpěv, hlas, rezonance vokálních dutin, operní rejstřík, plný rejstřík, hrudní rejstřík, hlavový rejstřík, LPC analýza, FFT spektrum

## ABSTRACT

The study analyzes the formant zones of male voices in singing vowels with main focus on opera, chest and head vocal registers. The results of this work are based on the recordings of five singers, taken in an anechoic chamber. For the analysis of these recordings in the frequency domain were used the FFT algorithm and the LPC analysis. The results describe the nature of the individual registers and show the importance of the singing formants for singers. Especially for opera vocal register where the vocal formants, along with a natural vibrato technique, are very important.

**Keywords:** formant, singing, voice, resonance of vocal cavities, opera vocal register, chest vocal register, head vocal register, LPC analysis, FFT spectrum

KUKOSA, F. Analýza formantových oblastí při zpívaných samohláskách. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 40 s., 6 l. příl. Vedoucí bakalářské práce MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D..

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „ANALÝZA FORMANTOVÝCH OBLASTÍ PŘI ZPÍVANÝCH SAMOHLÁSKÁCH“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 31. 05. 2016

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu práce MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne 31. 05. 2016

.....  
podpis autora

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizováný v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1 LIDSKÝ HLAS.....</b>	<b>10</b>
1.1 ANATOMIE .....	10
1.2 ŘEČ .....	12
1.3 SAMOHLÁSKY A FORMANTY .....	12
1.4 ZPĚV.....	15
<b>2 METODIKA .....</b>	<b>17</b>
2.1 NAHRÁVÁNÍ ZPĚVÁKŮ.....	17
2.2 FFT SPEKTRUM.....	18
2.3 LINEÁRNÍ PREDIKTIVNÍ ANALÝZA.....	19
<b>3 ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>22</b>
3.1 VÝSTUP MĚŘENÍ .....	22
3.2 ZPRACOVÁNÍ V PROSTŘEDÍ MATLAB .....	22
<b>4 VÝSLEDKY.....</b>	<b>24</b>
4.1 ROZMĚRY ZPĚVÁKŮ A JEJICH FORMANTY V MLUVENÉM SLOVĚ .....	24
4.2 ZPĚVNÍ FORMANTY.....	25
4.3 PŘIROZENÉ VIBRATO.....	25
4.4 SPEKTRUM ZPĚVU .....	26
4.5 VLIV DYNAMIKY OPERNÍHO ZPĚVU .....	27
4.6 ZÁKLADNÍ FREKVENCE V OBLASTI PRVNÍHO FORMANTU .....	27
4.8 TABULKOVÁ KOMPARACE MLUVENÉHO SLOVA A ZPĚVU .....	28
4.9 CELKOVÁ KOMPARACE.....	33
<b>5 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ PRO PRAXI.....</b>	<b>36</b>
5.1 DOPORUČENÍ PRO ZPĚVÁKY A UČITELE ZPĚVU .....	36
5.2 DOPORUČENÍ PRO ZVUKAŘSKOU PRAXI.....	36
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>37</b>
<b>PRAMENY .....</b>	<b>38</b>
<b>SEZNAMY .....</b>	<b>38</b>
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	39
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	40
SEZNAM TABULEK .....	40
SEZNAM PŘÍLOH .....	40



# ÚVOD

Předmětem této práce je analýza zpívaných samohlásek z hlediska formantových oblastí. A to především srovnáním formantových oblastí mluveného slova s plným (operním), hrudním a hlavovým rejstříkem zpěvu. Práce vychází, a v některých případech navazuje na publikaci doc. Ing. Vojtěcha Mišuna, CSc. - Tajemství lidského hlasu, přičemž se opírá o výsledky a zpracování měření, v bezodrazové komoře, pěti zpěváků, z nichž byli čtyři trénovaní operní pěvci.

V první kapitole si nejprve přiblížíme, jak vlastně hlas vzniká a co jsou rezonanční frekvence vokálního traktu, neboli formanty, které charakterizují jednotlivé samohlásky.

V další kapitole se budeme věnovat popisu a průběhu měření samotného. Dále si pak stručně popíšeme podstatu FFT algoritmu, který slouží k vytvoření spektra pro popis signálu ve frekvenční doméně. Poté rozebereme lineárně prediktivní (též predikční) analýzu, co by nejvíce používanou metodu pro určování formantů a přenosové funkce vokálního traktu.

Třetí kapitola se věnuje zpracování výstupu měření. Ukazuje postup jednotlivých výpočtů v interaktivním programovém prostředí Matlab a popisuje jistá úskalí použití metod pro zpracování řeči na zpěv.

A nakonec si ve čtvrté kapitole popíšeme výsledky měření. Nejprve porovnáme fyzické rozměry zpěváků s pozicemi jejich formantů. Zavedeme popis čtvrtého a pátého zpěvního formantu. Podíváme se na přirozené vibrato v hlasech operních zpěváků a vztah dynamiky zpěvu ke spektru. Dále se krátce zmíníme o problematice zpívání základní frekvence v místě prvního formantu. Nakonec porovnáme pozici a míru zapojení formantů každé samohlásky mezi mluveným slovem a jednotlivými rejstříky zpěvu. A to jak u každého operního zpěváka, tak ve srovnání s ostatními.

# 1 LIDSKÝ HLAS

## 1.1 ANATOMIE

Lidský hlas je generován ve vokálních orgánech, jež jsou součástí hlasového ústrojí. Zvuk v hlasovém ústrojí se vytváří proudem vzduchu, procházejícím skrze celé hlasové ústrojí. Popíšme si nyní funkci jednotlivých vokálních orgánů.

### 1.1.1 PLÍCE

Plíce dodávají vzduch a tvoří současně vzduchový rezervoár a zdroj energie [1]. Pro dobré udržení tónu při zpěvu je potřeba zajistit stálý proud vzduchu a konstantní tlak, působící na hlasivky. Proto hrají plíce, hlavně s použitím žeberně-bráničního dýchání, důležitou úlohu při zpěvu. Mezi průduškami plic a hrtanem nalezneme průdušnici (trachea), která tyto oblasti spojuje.

### 1.1.2 HRTAN A HLASIVKY

Hrtan (larynx) je prvním oddílem dolních cest dýchacích. Jedná se o chrupavkami vyztuženou trubici, kterou prochází vzduch při nádechu do průdušnice, následně do plic a při výdechu zpět.

Mezi nejdůležitější část hrtanu z hlediska tvorby hlasu patří hlasivky, které nalezneme hned za hrtanovou příklopkou a které jsou **zdrojem** lidského hlasu.

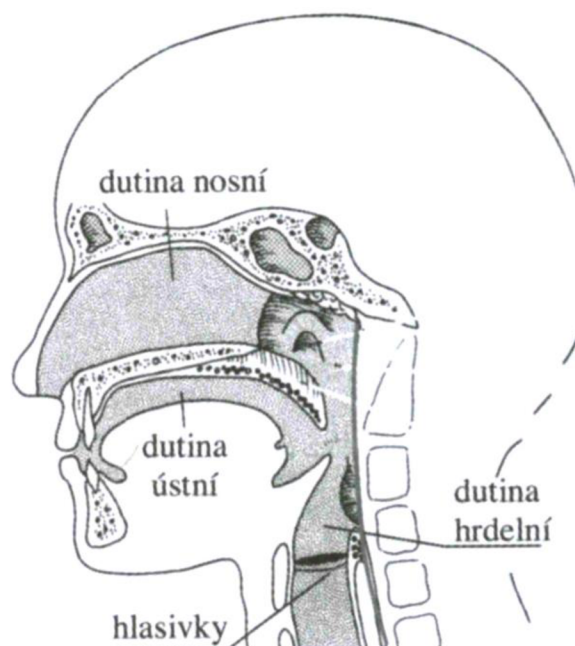
Konkrétním zdrojem vibrací jsou pružné hlasivkové řasy (elastická chrupavka), napínané hlasivkovými vazami a svaly. Hlasivky jsou buzeny vzduchem z plic a podle míry napnutí řas mění hlasivky rychlost oscilace. Mezi vazami je hlasivková štěrbina, která má při dýchání tvar protáhlého, rovnoramenného trojúhelníku. Při normální fonaci, napětí svalů způsobí, že se k sobě hlasivkové řasy po celé délce přiblíží. Propuštěné vzduchové pulzy tak generují tzv. **znělý hlas (nahlas)**, při rozevření hlasivkových řas se generuje **hlas neznělý (šepot)** [1].

### 1.1.3 VOKÁLNÍ DUTINY

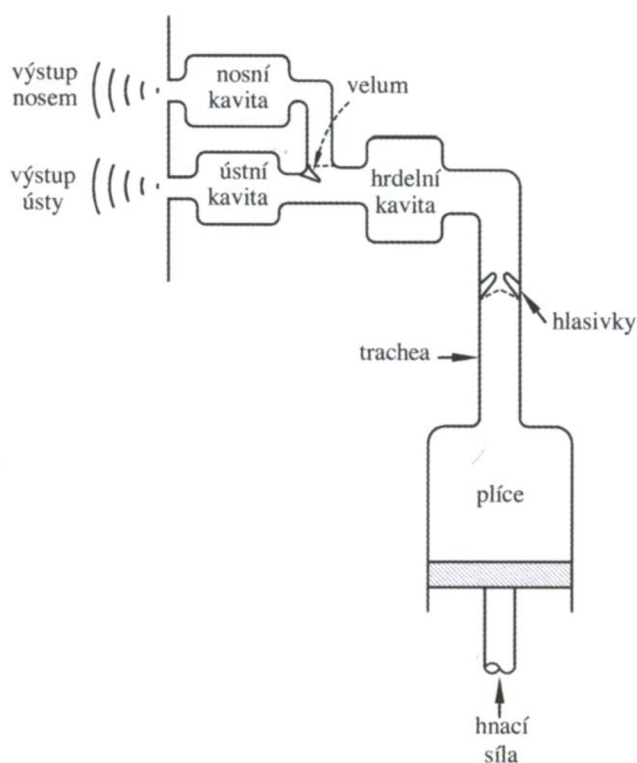
Mezi nejvýznamnější vokální dutiny (kavity) patří: *dutina ústní*, *dutina hrdelní (hltanová)*, *dutina nosní* a *dutina retní*. Z hlediska generování zvuků tvoří dutiny ústní a hrdelní jednu společnou akustickou jednotku, která se nazývá **vokálním traktem** [1].

### 1.1.4 VOKÁLNÍ TRAKT

Vokální trakt začíná hlasivkami a končí rty. Nosní kavita, která není součástí vokálního traktu, hraje ale také svoji úlohu. Začíná mezipatrovou záklopkou (*velum*) a končí nosními dírkami. Pokud je *velum* otevřené, je nosní dutina akusticky propojena s vokálním traktem, za účelem generování nosového zvuku. Nejdůležitější dutinou vokálního traktu je ale dutina ústní, neboť její rozměry a tvar mohou měnit nastavení relativních poloh horního patra, jazyka, rtů a zubů. Změnou tvaru dutiny ústní a poloh jejích částí lze generovat značné množství různých zvuků [1].



Obr. 1.1. Akustické dutiny hlasového ústrojí [1] (Mišun, 2010)



Obr. 1.2. Schéma hlasového ústrojí [1] (Mišun, 2010)

## 1.2 ŘEČ

Lidská řeč je tvořena směsí zvuků, které vystupují z ústní dutiny vokálního traktu. Tento soubor zvuků lze rozdělit na 3 základní typy [1]:

- *Znělé zvuky*, produkované buzením hlasového ústrojí kvaziperiodickými pulzy stlačeného vzduchu, které jsou vytvářeny kmitáním hlasivek. Vzniká tak **tónová složka hlasu**, která se nejvíce uplatňuje v samohláskách (a, e, i, o, u).
- *Frikativní zvuky*, tyto zvuky vznikají protlačováním proudu zvuku štěrbinami vytvořenými artikulačními orgány (rty, zuby, jazyk...), čímž vznikají turbulence s produkcí charakteristického šumu. Vzniká tak **šumivá složka hlasu**, která se nejvíce uplatňuje v sykavkách (s, c, z, ...).
- *Explozivní zvuky*, které vznikají úplným uzavřením hlasového traktu (především rty a jazykem), vytvořením přetlaku ve vokální cestě a následným rychlým vypuštěním přetlaku. Vzniká tak **výbušná složka hlasu** nejvíce patrná u evropských jazyků na explozivách (p, b, d, t ...).

## 1.3 SAMOHLÁSKY A FORMANTY

### 1.3.1 TVORBA SAMOHLÁSEK

Nyní si popíšeme cestu lidského hlasu při tvorbě samohlásek.

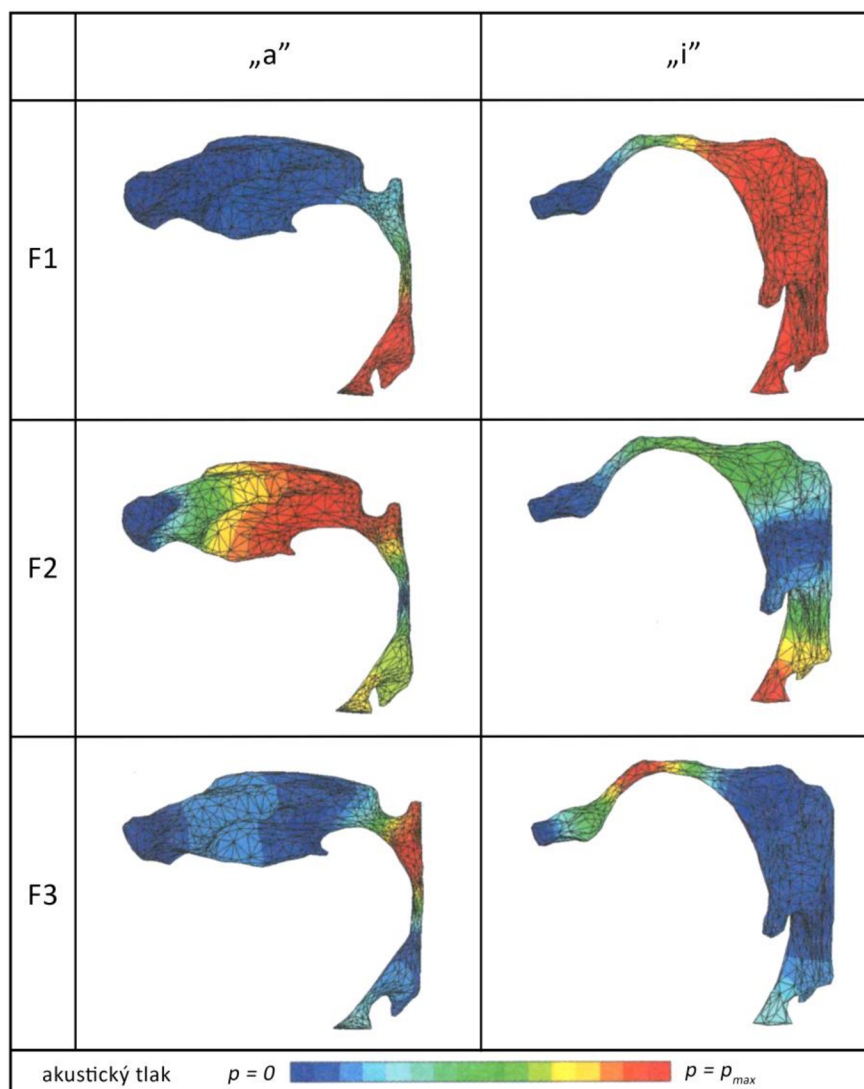
Zdrojem hlasu, jak jsme již uvedli, jsou hlasivky, které se tlakem a proudem vzduchu z plic rozkmitají, čímž v prostoru na horní straně hlasivek vzniká pravidelné kolísání tlaku vzduchu. Výsledkem je zdrojový hlas, který je jedinečný pro každého jedince. Výška hlasu, tj. základní frekvence  $F_0$  hlasivek závisí na délce a jejich napnutí, které se působením příslušného svalstva může měnit. Změnu základní frekvence můžeme pozorovat při intonaci v rámci řeči. Nejvíce se ale změna základní frekvence uplatňuje u zpěvu. Spektrum zdrojového hlasu je tvořené harmonickou řadou, kde počet harmonických frekvencí se odvíjí od základní frekvence, která má největší amplitudu. Hladiny této harmonické řady jsou dány tvarem periodického průběhu tlaku výdechového pulzu vzduchu hlasivkami. Právě tvar těchto pulzů má hlavní podíl na charakteristickém zbarvení výsledné řeči jedince [1].

Zdrojový hlas hlasivek je dále upravován přenosovými akustickými vlastnostmi vokálního traktu. Spektrální a modální vlastnosti vokálního traktu jsou dány jeho velikostí, tvarem a dále absorpčními vlastnostmi jeho povrchů. Vlastní rezonanční frekvence vokálních kavit (dutin) označujeme jako **FORMANTY** a lze je v jistém frekvenčním rozsahu měnit změnou velikosti hrdelní a ústní dutiny.

### 1.3.2 FORMANTY

První tři nejnižší formanty F1, F2, F3 definují akusticky jednotlivé samohlásky, přičemž percepčně nejvýznamnější pro tuto definici jsou první dva. Poloha formantů je dána velikostí jednotlivých subkavit vokálního traktu. Nejvíce se na poloze těchto formantů podílí nastavení ústní dutiny, především jazyka. Navíc nejnižší vlastní frekvence vokálního traktu jsou u většiny samohlásek dány hlavně jeho délkou vokálního traktu, kterou lze měnit posouváním hrdla směrem nahoru a dolů. Spektrální vlastnosti vokálního traktu jsou rovněž dány otevřením úst. V místě ústního otvoru je totiž při fonaci nulový akustický tlak, neboť zde dochází k vyrovnání tlaku s vnějším prostředím. S větším otevřením úst se proto vlastní frekvence vokálního traktu snižují.

Vzhledem ke komplexnosti tvaru a absorpce povrchu vokálních kavit, nelze k výpočtu velikosti vlastní rezonanční frekvence použít vztahy pro kavity jednoduchých tvarů, jako je tomu u dechových hudebních nástrojů. Ty lze použít pouze k hrubému odhadu velikosti drobných subkavit. K přesnějšímu určení rezonančních subkavit, lze však použít rotační model dutých válcových úseků, nebo vyhodnocení jednotlivých subkavit pomocí modelu metody konečných prvků.

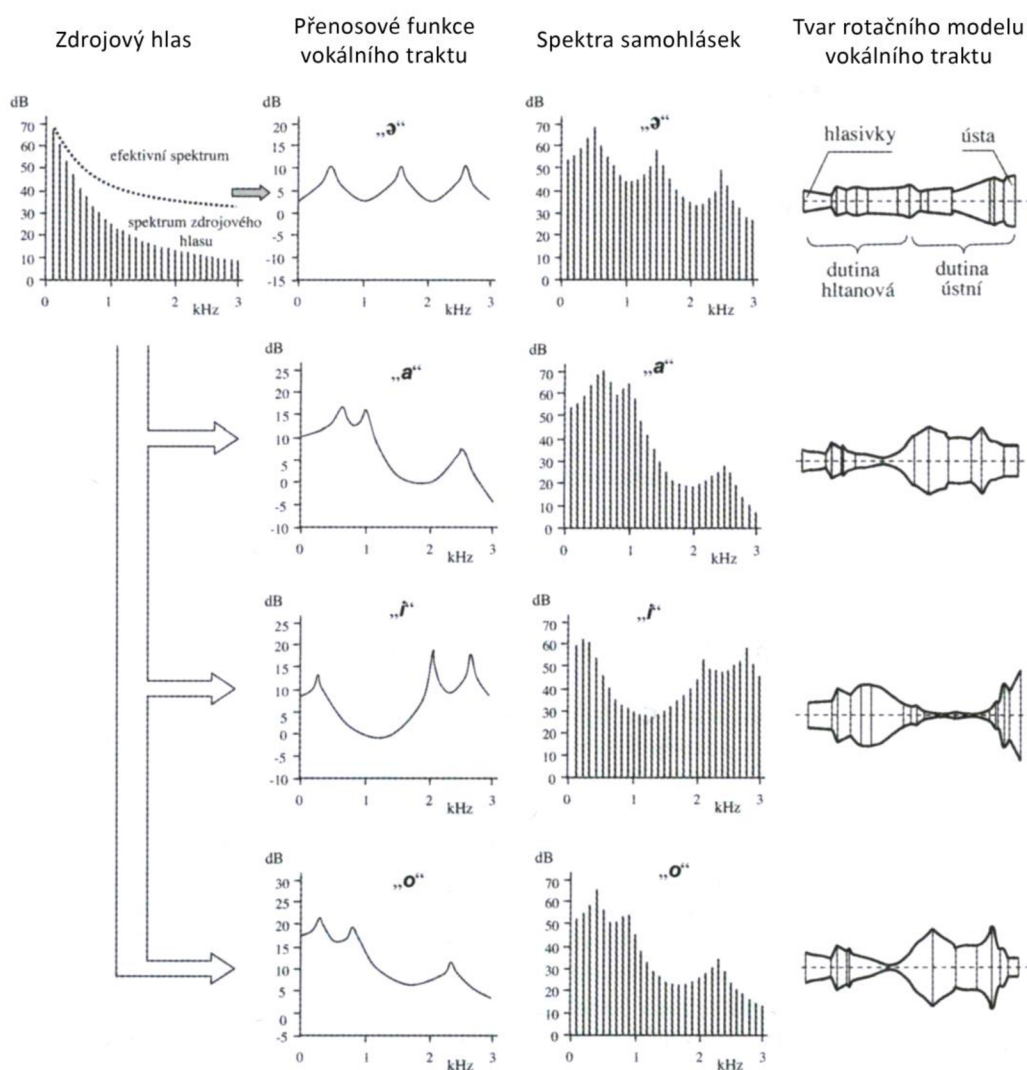


Obr. 1.3. Konečno-prvkové modely vokálního traktu pro samohlásky „a“ a „i“ se zobrazením akustických módů při F1, F2 a F3 - [1] (Mišun, 2010)

### 1.3.3 PŘENOSOVÉ FUNKCE VOKÁLNÍHO TRAKTU

Přenosové funkce vokálního traktu s vrcholy  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  definující jednotlivé samohlásky souvisejí s teorií zdroj-filtr, která byla prvně formulována v základní podobě v roce 1848 Johannesem Müllerem [1]. Tato teorie je založena na předpokladu, že hlasivkový zdroj a filtr, tvořený vokálním traktem, mohou být posuzovány jako dvě nezávislé funkce. Na základě tohoto předpokladu působí vokální trakt jednoduše jako filtr, modulující spektrum hrdelního hlasu a změny v supralaryngeálním (nadhlasivkovém) filtru nemají žádný zpětný efekt na základní frekvenci  $F_0$  nebo na tvar průběh akustických vln.

Je třeba zmínit, že se zvyšující se základní frekvencí  $F_0$  se odstupy harmonických složek zvětšují. Tím se ovšem harmonické složky mohou vzdalovat od jednotlivých rezonančních frekvencí vokálního traktu. Pak může být generovaná samohláska akusticky nedostatečně definována a lze u ní obtížně identifikovat jednotlivé formanty. Přenosové funkce a výsledná spektra, vzniklá buzením zdrojovým hlasem hlasivek o frekvenci 100 Hz pro jednotlivé samohlásky vidíme na obr. 1.4. společně s příklady rotačních modelů vokálního traktu.



Obr. 1.4. Přenosové funkce vokálního traktu a spektra samohlásek (neutrální ə, a, i, o) generované zdrojovým hlasem se základní frekvencí  $F_0 = 100$  Hz dle teorie zdroj - filtr - [1] (Mišun, 2010)

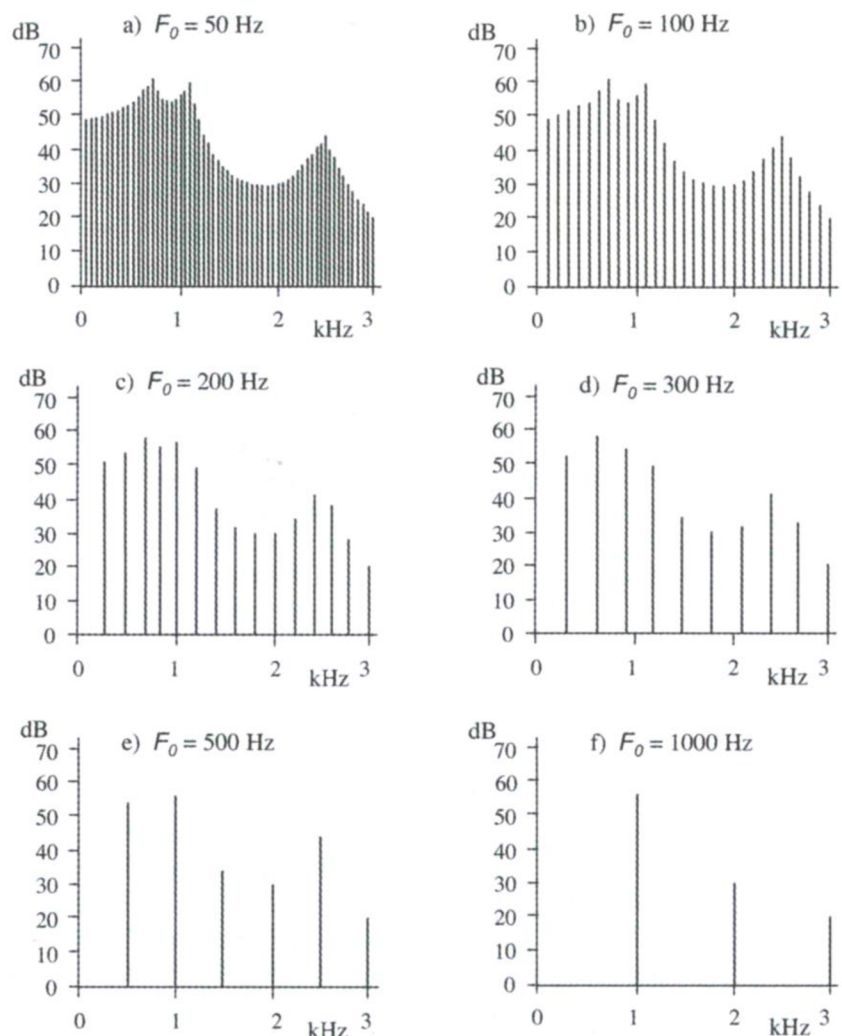
## 1.4 ZPĚV

Existuje mnoho stylů zpěvu. V této práci se zaměříme na rejstříky zpěvu předně evropské artificiální hudby. Zároveň se zaměříme pouze na zpívané samohlásky, tedy hlásky s největší tónovou složkou.

### 1.4.1 ZMĚNA VELIKOSTI ZÁKLADNÍ FREKVENCE

Základním prvkem zpěvu je změna základní frekvence pomocí napínání hlasivek. Velikost této základní frekvence  $F_0$  má vliv na počet harmonických frekvencí generovaných hlasivkami. Při nižší základní frekvenci jsou harmonické blíže k sobě, což způsobuje přesnější zobrazení spektra samohlásky, která je pak lépe akusticky definovaná, neboť jsou lépe zvýrazněny jednotlivé formanty. Naopak se zvyšující se základní frekvencí  $F_0$  se odstupy harmonických složek zvětšují a mohou se tak vzdalovat od rezonančních frekvencí vokálního traktu (formantů dané samohlásky).

U vysokých tónů proto již nelze očekávat správnou akustickou definici jednotlivých samohlásek [1].



Obr. 1.5. Spektra samohlásky „a“ vygenerované při různé základní frekvenci  $F_0$  zdrojového hlasu - [1] (Mišun, 2010)

## 1.4.2 DĚLENÍ HLASU PODLE ROZSAHU:

K měření jsme pro zajištění co nejpřesnější akustické definice samohlásek zvolili mužské hlasy. V souvislosti s tím, uveďme rozdělení hlasů podle rozsahu dle literatury [1]:

### 1.4.2.1 MUŽSKÉ

- Kontrabas  $G^1 - c$  (49 Hz – 130 Hz)
- Bas  $E - H^1$  (82 Hz – 329 Hz)
- Basbaryton  $F - c^1$  (87 Hz – 261 Hz)
- Baryton  $G - e^1$  (98 Hz – 392 Hz)
- Tenor  $H - a^1$  (123 Hz – 523 Hz)

### 1.4.2.2 ŽENSKÉ

- Kontraalt  $g - f^2$  (196 Hz – 349 Hz)
- Alt  $e - e^2$  (164 Hz – 659 Hz)
- Mezzosoprán  $g - a^2$  (196 Hz – 880 Hz)
- Soprán  $h - c^3$  (246 Hz – 1046 Hz)

## 1.4.3 ZÁKLADNÍ HLASOVÉ REGISTRY

Nyní, podle literatury [1], popíšeme podstatu nejdůležitějších hlasových registrů (rejstříků). Operní (plný) hlasový rejstřík, není v literatuře uveden a jeho popis bude právě předmětem výsledků této práce uvedených v kapitole 4.

### 1.4.3.1 HRUDNÍ REJSTŘÍK

Hrudní registr je výraz pro obvykle hluboký nebo bohatě plný zvuk, který je většinou používán během řeči. Vzduch proudí skrze vibrující hlasivky a vygenerované vibrace mohou být často pociťovány na vnějším horní části hrudníku. Při použití hrudního rejstříku je uzavřena mezipatrová záklopka (velum) mezi dutinou hrdelní a dutinou nosní. Akustické vlny vygenerované hlasivkami a upravené vokálním traktem vystupují pouze ústním otvorem.

### 1.4.3.2 HLAVOVÝ REJSTŘÍK

Při hlavovém registru dochází k otevření mezipatrové záklopky. Dochází tak ke snížení tlaku v hrtanové dutině a zároveň část akustických vln tak prochází i nosní dutinou do okolního prostředí. Vzhledem k tomu, že akustické vlny prochází nosní dutinou, jsou tyto vlny příčinou rozkmitávání celého kostního systému přední části obličeje. Vibrace lze identifikovat obvykle na vibrujících částech lícních kostí, zubů a rtů. Tomuto jevu se říká *zpívání do masky*.

### 1.4.3.3 FALZET

Falzet je technika zpěvu spojená s hlasivkami. Kdy se při generování vysokých tónů štěrbina mezi kmitajícími hlasivkami již nestačí uzavírat, a proto mezi nimi zůstává trvalá štěrbina. Tato štěrbina vede k nízkému subglotickému (podhlasivkovému) tlaku a generování slyšitelné složky zvuku třetího charakteru.



## 2 METODIKA

### 2.1 NAHRÁVÁNÍ ZPĚVÁKŮ

Nahrávání proběhlo 4. března 2016 na půdě Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně v budově Technická 12 v učebně SC5.50, jejíž součástí je i bezodrazová (bezdozvuková) komora a režijní místnost. Nahrávání proběhlo za přítomnosti a pomoci odborného dozoru Ing. Jiřího Schimmela, Ph.D. a MgA. Mgr. Ondřeje Jirásky, Ph.D. Všichni zpěváci zpívali v bezodrazové komoře na měřicí mikrofon NTi Audio M2010 s frekvenční charakteristikou třídy 1, odpovídající mezinárodnímu standardu IEC 61672-1.

#### 2.1.1 ZPĚVÁCI

Na nahrávání z plánovaných a domluvených sedmi zpěváků dorazilo nakonec pět (včetně autora této práce). A to sice:

- **Vojtěch Šembera**
  - trénovaný operní zpěvák, student zpěvu JAMU
  - rozsah: baryton
- **Stanislav Fiala**
  - žák operního zpěvu pod vedením Vojtěcha Šembery
  - rozsah: baryton
- **Ondřej Musil**
  - trénovaný operní zpěvák, absolvent kurzů zpěvu JAMU
  - rozsah: bas
- **František Kukosa**
  - amatérský zpěvák
  - rozsah: baryton
- **Pavel Valenta**
  - trénovaný operní zpěvák, student církevní konzervatoře
  - rozsah: tenor

Navíc každému zpěvákovi byl změřen obvod hrudníku a obvod hlavy a udal výšku své postavy.

#### 2.1.2 PRŮBĚH NAHRÁVÁNÍ

Záznam každého zpěváka byl nahrán do jedné stopy při bitové hloubce 32 bitů a vzorkovací frekvenci 48 kHz pomocí softwaru Cubase od firmy Steinberg. Každý zpěvák měl za úkol nejprve do mikrofonu říci pár vět, představit se a pak vyjmenovat slova začínající samohláskami (a, e, i, o, u), a poté říct samotné samohlásky.

Dále jsme přistoupili k vlastnímu nahrávání zpěvu, nejprve plného (operního) v dynamice mezzoforte. Úkolem zpěváků bylo zazpívat samohlásku podle elektronických kláves od nejnižšího tónu (dle rozsahu) přes dané hudební intervaly po 2. oktávu.

Pro samohlásku „a“ byly zvoleny intervaly od základního tónu: kvarta – kvinta – oktáva a od oktávy opět kvarta – kvinta – oktáva. A pro ostatní samohlásky byly zvoleny intervaly od základního tónu pouze: kvinta – oktáva a od oktávy opět kvinta – oktáva. Pro každou samohlásku se pak ještě zpěvák měl pokusit zazpívat tón ještě o malou terci níže, než byl stanovený nejnižší tón podle rozsahu. Stejný postup byl i pro měření plného (operního hlasu) v dynamice forte.

Dalším úkolem pro zpěváky bylo, pokusit se o hrudní (muzikálový) rejstřík v dynamice pouze mezzoforte. Zde už měření proběhlo pouze v rámci intervalu jedné oktávy, takže jsme získali nahrávky dvou tónů pro každou samohlásku.

Podobně byl nahrán hlavový tón, který byl nahrán většinou nad rozsahem plného tónu v intervalu kvinty a u některých zpěváků i oktávy. Od zpěváků jsme tak získali dvě nebo tři nahrávky hlavového tónu pro každou samohlásku.

## 2.2 FFT SPEKTRUM

FFT Spektrum využíváme k analýze signálu ve frekvenční doméně. Zkratkou FFT (*Fast Fourier transform*) rozumíme rychlou Fourierovu transformaci. Jedná se o algoritmus pro spočítání diskrétní Fourierovy transformace (DFT) a její inverze. FFT se v dneš době používá prakticky ve všech programech, které s Fourierovou transformací pracují. Výjimkou není ani software Matlab, Maple nebo Mathematica.

### 2.2.1 DFT

Uvedme zde krátký výstižný popis rozdílu mezi Fourierovou transformací a diskrétní Fourierovou transformací převzatý z literatury [6]. Fourierova transformace je vhodná pro použití při zpracování spojitých signálů. V dnešní době je však většina signálů zpracovávána pomocí počítačů a tedy digitálně. U těchto signálů nemáme spojitou funkci. Proto byla zavedena diskrétní Fourierova transformace, zkráceně DFT, která pracuje s diskretizovanými funkcemi. Diskrétní Fourierova transformace  $f_n$  je definována jako:

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-2\pi i \frac{nk}{N}}.$$

### 2.2.2 POUŽITÍ FUNKCE FFT SPEKTRA V PROSTŘEDÍ MATLAB

Množina hodnot diskrétní Fourierovi transformace se nazývá spektrum. Spektrum můžeme vyjádřit komplexně, energeticky (reálná část), nebo logaritmicky.

Syntaxe pro použití funkce FFT v prostředí Matlab je následující [3]

$$Y = \text{fft}(X, n),$$

kde  $X$  je vektorem vstupních hodnot diskrétního signálu,  $n$  je volitelný počet bodů výstupního vektoru FFT a  $Y$  je výstupní vektor hodnot spektra.

Pro úplnost, je třeba zmínit otázku jevu v anglické literatuře označovaného jako *leakage*. Takto je problematika popsána v literatuře [8]: Pokud nelze dodržet, že počet bodů  $n$  DFT je celistvým násobkem periody a zároveň mocninou čísla 2, dojde k rozmazání spektra. Potom je nutné signál  $s[n]$  upravit datovým (časovým) oknem  $w[n]$ , čímž snížíme chybu při určování kmitočtů jednotlivých složek spektra a eliminujeme tak rozmazání spektra. Signál je rozdělen na segmenty (sousední segmenty se mohou překrývat) o délce  $N$  vzorků a každý segment se poté zpracovává samostatně. Segment o  $n$  vzorcích se vytvoří pomocí váhové posloupnosti tzv. okna, kterým se váží příslušné vzorky (tj. okno vybírá příslušné vzorky signálu a přiděluje jim při zpracování určitou váhu), někdy jsou okna označována jako váhovací. Matematicky úprava datovým oknem spočívá ve vynásobení signálu  $s[n]$  datovým oknem vhodného tvaru. Váhovacích oken existuje celá řada a mají různé vlastnosti, odlišné průběhy v časové a kmitočtové oblasti. K nejrozšířenějším patří Hannovo okno, obdélníkové okno, trojúhelníkové okno, Bartlettovo okno, Hammingovo okno, Kaiserovo okno, Blackmannovo okno a řada dalších. Pro naše potřeby používáme Hammingovo okno, dle doporučení uvedeného v literatuře [5].

Pozn.: FFT algoritmu používá v prostředí Matlab i funkce *spectrogram*, která sleduje vývoj spektra signálu v čase.

## 2.3 LINEÁRNÍ PREDIKTIVNÍ ANALÝZA

Lineární prediktivní kódování (LPC) je velmi efektivní a využívaná metoda analýzy řečového signálu [5]. Jedná se o metodu, která se snaží na krátkodobém základu odhadnout přímo z řečového signálu parametry modelu řeči. Princip LPC metody je založen na předpokladu, že  $k$ -tý vzorek signálu lze popsat lineární kombinací předchozích vzorků a buzení. Princip matematicky vystihuje rovnice [6]:

$$\hat{s}(n) = \sum_{k=1}^p \alpha_k s(n-k)$$

kde  $\hat{s}(n)$  je odhad  $n$ -tého členu v posloupnosti, který je nalezen jako lineární kombinace  $p$  předchozích členů,  $p$  je počet LPC koeficientů neboli řád prediktoru a  $\alpha_k$  jsou predikční koeficienty. Hledáme tedy optimální  $\alpha_k$  tak, aby se každá hodnota signálu byla co nejbližší lineární kombinaci předchozích hodnot. Pomocí koeficientů  $\alpha_k$ , tak můžeme jednoznačně určit charakteristiky periodického signálu.

Definujeme predikční chybu  $n$ -tého vzorku jako rozdíl skutečné a odhadované hodnoty

$$e(n) = \hat{s}(n) - s(n) = s(n) - \sum_{k=1}^p \alpha_k s(n-k) \quad ,$$

kteřou se snažíme minimalizovat přes celý segment signálu. Minimalizujeme tedy účelovou funkci

$$J = \sum_{n=1}^N e^2(n)$$

### 2.3.1 VÝPOČET LPC KOEFICIENTŮ

Koeficientů LPC se využívá při určování spektrálních charakteristik modelu hlasového ústrojí a lze s jejich pomocí dobře identifikovat formantovou strukturu řeči [5]. K výpočtu LPC koeficientů použijeme autokorelační metodu [5][6]. Touto metodou jsou koeficienty LPC počítány v prostředí Matlab [3], pomocí vnitřní funkce LPC. Tato metoda vychází ze dvou předpokladů:

1. Signál  $s(n)$  má konečný počet prvků  $N$
2. Mimo tento signál jsou vzorky nulové

Účelovou funkci můžeme rozepsat jako

$$J = \sum_{n=1}^N e^2(n) = \sum_{n=1}^N [s(n) - \hat{s}(n)]^2 = \sum_{n=1}^N \left[ s(n) - \sum_{k=1}^p \alpha_k s(n-k) \right]^2$$

Pro minimalizaci položíme parciální derivace funkce podle  $\alpha_k$  rovny nule

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha_k} = 0;$$

což vede na systém  $p$  rovnic s  $p$  neznámými koeficienty  $\alpha_k$ . Po výpočtu a úpravě těchto rovnic, uvedeno například v literatuře [4], dostaneme

$$\sum_{k=1}^p \alpha_k R(|k-j|) = R(j) \quad \text{pro } j = 1, 2, \dots, p$$

kde

$$R(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-j-1} s(n)s(n-j).$$

Tyto rovnice se nazývají Yuleovy-Walkerovy a přepsáním do maticového tvaru, se nám s nimi bude lépe pracovat. Tato symetrická matice se pak nazývá autokorelační matice a vypadá následovně:

$$\begin{pmatrix} R(0) & R(1) & R(2) & \dots & R(M-1) \\ R(1) & R(0) & R(1) & \dots & R(M-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \\ R(M-1) & R(M-2) & R(M-3) & \dots & R(0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R(1) \\ R(2) \\ \vdots \\ R(M) \end{pmatrix}$$

Výsledné  $\alpha_i$  jsou hledané autokorelační koeficienty, které Matlab počítá pomocí Levison-Durbinova algoritmu [3].

### 2.3.2 POUŽITÍ FUNKCE PRO LPC V PROSTŘEDÍ MATLAB

Syntaxe pro použití funkce LPC v prostředí Matlab vypadá takto:

$$[a, g] = lpc(x, p)$$

kde  $x$  je vektor vstupních hodnot signálu,  $p$  je řád prediktoru,  $a$  je výstupní vektor koeficientů LPC a  $g$  je výstupní predikčních chyb. Řád prediktoru  $p$  volíme pro vzorkovaný namluvený signál podle obecné poučky  $p = 4 + f_{vz}/1000$  [7][4]. Kde  $f_{vz}$  je vzorkovací frekvence signálu. S takto získanými koeficienty LPC analýzy můžeme dále pracovat. Například použitím funkce *freqz*, díky které získáme frekvenční odezvu LPC filtru, neboli spektrum LPC. Nalezené vrcholy (lokální maxima) tohoto spektra označují pak jednotlivé formanty.

Pozn.: Další metodou jak určit formanty z LPC analýzy bez použití spektra LPC je tzv. metoda kořenů [6].

## 3 ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ

### 3.1 VÝSTUP MĚŘENÍ

Jako výstup měření vzniklo 5 stop (jeden zpěvák, jedna stopa) s bitovou hloubkou 32 bitů a vzorkovací frekvencí 48 kHz. Nejprve bylo za potřeby tyto stopy rozstříhat a připravit pro další zpracování. Celé stříhaní stop bylo provedeno pomocí softwaru Adobe Audition, který má integrovaný spektrogram, fungující na stejném principu použití FFT algoritmu jako funkce *spektrogram* v prostředí Matlab. Použití spektrogramu při stříhání usnadňovalo správné vystřížení samohlásek z mluveného slova. V první řadě byly tedy z pořízeného materiálu vystříženy samohlásky mluveného slova, a to jak z běžné mluvy, tak ze slov začínajících samohláskou. Navíc byly vystříženy i samostatně mluvené samohlásky. Střih zpívaných samohlásek se hlavně opíral o vystřížení konstantní části zpívané samohlásky, tj. z hlediska ADSR obálky, oblast sustainu. Výsledkem vzniklo 84 stop mluvených samohlásek a 415 stop zpívaných, které byly dále zpracovány.

### 3.2 ZPRACOVÁNÍ V PROSTŘEDÍ MATLAB

Jednotlivé stopy byly zpracovány pomocí níže uvedeného skriptu uzavřeného do „for“ cyklu, měnící název souboru a zapisujícího výstupní hodnoty do tabulky ve formátu xls a grafy do souborů ve formátu pdf. Ve skriptu můžeme pozorovat, jak je nejprve signál normalizován svojí největší hodnotou, poté je zpracován FFT algoritmem a z jeho spektra je určena pozice a zesílení základní frekvence pomocí funkce *findpeaks* pro hledání lokálních minim. Dalším procesem pro vstupní signál je určení koeficientů LPC analýzy a na jejich základě vytvoření hodnot LPC spektra pomocí funkce frekvenční odezvy *freqz* a určení formantů pomocí funkce *findpeaks*.

```
[x,fs]=audioread([filename '.wav']); % načtení souboru
x = x/max(x); % normalizace signálu podle maxima

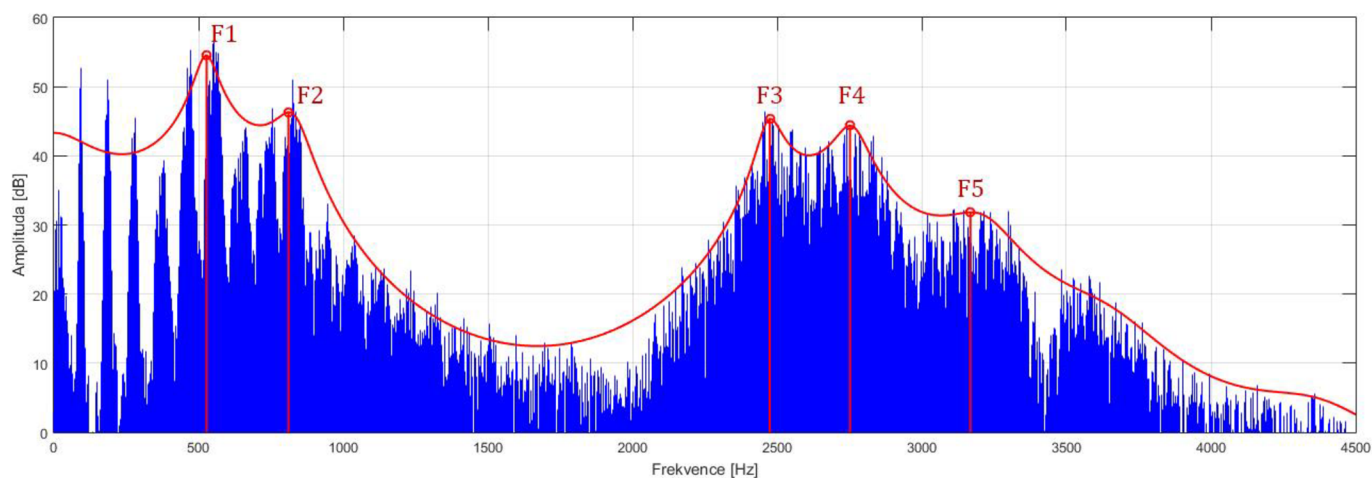
% FFT Spektrum
Nsamps = length(x);
p=x.*hamming(Nsamps); % použití váhovacího okna
x_fft = abs(fft(p)); % reálné spektrum FFT
f = fs*(0:Nsamps-1)/Nsamps; % přizpůsobení frekvenční osy
x_fft = x_fft(1:Nsamps/2); % oříznutí zrcadleného spektra
f = f(1:Nsamps/2); % oříznutí zrcadleného spektra na frekvenční ose
x_fftLOG=20*log10(abs(x_fft)); %převod na logaritmické spektrum

% Základní frekvence f0
[~, index]=findpeaks(x_fftLOG,f,'NPeaks',1,'MinPeakHeight',20);
F0=index(1);

% LPC Analýza
ncoeff=4+round(fs/1000)
a=lpc(x,ncoeff);
[h,fa]=freqz(1,a,4500,fs);
[pksh, locsfa] = findpeaks(abs(h),fa,'NPEAKS',5);
```

### 3.2.1 VÝSTUP Z MATLABU

Příklad výstupního grafu při daném zpracování můžeme vidět na obrázku (obr. 3.1.), ve kterém jsou doplněny názvy jednotlivých formantů. S takto získanými daty se dále pracovalo použitím funkce průměru a mediánu v softwaru Microsoft Excel.



Obr. 3.1. Výstupní graf FFT a LPC spektra pro plný tón G# (103.8 Hz) v dynamice forte s doplněnými popisky formantů

### 3.2.2 ÚSKALÍ POUŽITÍ LPC PRO ANALÝZU ZPĚVU

Volba počtu predikčních koeficientů pro LPC analýzu je důležitá a na této volbě závisí to, jak moc vyhlazené LPC spektrum bude. Pro optimální výsledky bychom se měli řídit již zmíněným pravidlem  $p = 4 + f_{vz}/1000$  [7][4], které se v praxi při zpracování řeči ukázalo jako dostatečné pro modelování hlavních posílených oblastí formantů, ale zároveň ne příliš velké pro zbytečné rozkolísání spektra. Toto pravidlo bylo zavedeno pro zpracování řeči a pro jasné určení prvních tří formantů. Na obr.3.1. si můžeme všimnout formantů F4 a F5, které jsou velmi blízko třetímu formantu a zároveň sobě navzájem. Pro jejich správné určení, pomocí LPC analýzy, je proto zapotřebí volit větší počet predikčních koeficientů, například  $p = 4 + 2*(f_{vz}/1000)$ . Takovéto navýšení počtu predikčních koeficientů má ale za následek rozkolísání spektra a může vést ke špatnému určení prvního a druhého formantu. Proto při zpracování byl tento počet experimentálně navýšen pouze na hodnotu  $p = 4 + 1,3*(f_{vz}/1000)$ . Takto upravená LPC analýza nenašla jen v některých případech hodnoty pro F4 a F5. Ty byly poté ručně odečteny z grafu.

## 4 VÝSLEDKY

### 4.1 ROZMĚRY ZPĚVÁKŮ A JEJICH FORMANTY V MLUVENÉM SLOVĚ

Při srovnávání fyzických rozměrů jednotlivých zpěváků a jejich formantů v mluveném slově, si můžeme všimnout, že výška a obvod hrudníku nemají žádnou zřejmou spojitost s pozicí jednotlivých formantů v mluveném slově. Základní frekvence mluveného slova je úměrná jednotlivým rejstříkům a obvodu hlavy. Formanty, definující jednotlivé samohlásky jsou především dané postavením jazyka a otevřením úst a posouvají se tak, aby rozdíl frekvence prvního a druhé formantu byl přibližně stejný.

Spojitost mezi formanty a rozměry zpěváků je tak patrná pouze u prvního formantu samohlásky „i“. První formant této samohlásky je totiž spjat s velikostí hrdelní kavity. U této samohlásky, můžeme jasně pozorovat zvyšování frekvence prvního formantu s klesajícím obvodem hlavy a předpokládejme i s klesajícím obvodem krku. Pro jasné určení této skutečnosti by ale bylo zapotřebí větší množství měřených vzorků a zpěváků.

zpěvák		Ondřej Musil	Stanislav Fiala	František Kukosa	Vojtěch Šembera	Pavel Valenta
rejstřík		bas	baryton	baryton	baryton	tenor
výška [cm]		187	194	186	185	177
obvod hrudníku [cm]		95	94,5	110	92	106
obvod hlavy [cm]		60	59	58	58	56
základní frekvence $f_0$ [Hz]		100	130	140	150	190
A	F1 [Hz]	628	706	729	753	622
	F2 [Hz]	1010	1229	1128	1179	1175
	F3 [Hz]	2526	2515	2596	2535	2710
E	F1 [Hz]	465	561	574	549	517
	F2 [Hz]	1558	1647	1667	1623	1721
	F3 [Hz]	2205	2413	2584	2453	2382
I	F1 [Hz]	226	302	303	316	322
	F2 [Hz]	1956	2128	2416	2052	2225
	F3 [Hz]	2845	2706	2963	2825	2815
O	F1 [Hz]	413	504	496	543	469
	F2 [Hz]	664	808	856	850	915
	F3 [Hz]	2484	2657	2846	2777	2522
U	F1 [Hz]	268	269	312	338	348
	F2 [Hz]	600	750	616	639	687
	F3 [Hz]	2273	2400	2300	2520	2332

Tab. 4.1. Pozice formantů samohlásek mluveného slova ve vztahu k fyzickým rozměrům zpěváků a hodnotě základní frekvence hlasu



## 4.2 ZPĚVNÍ FORMANTY

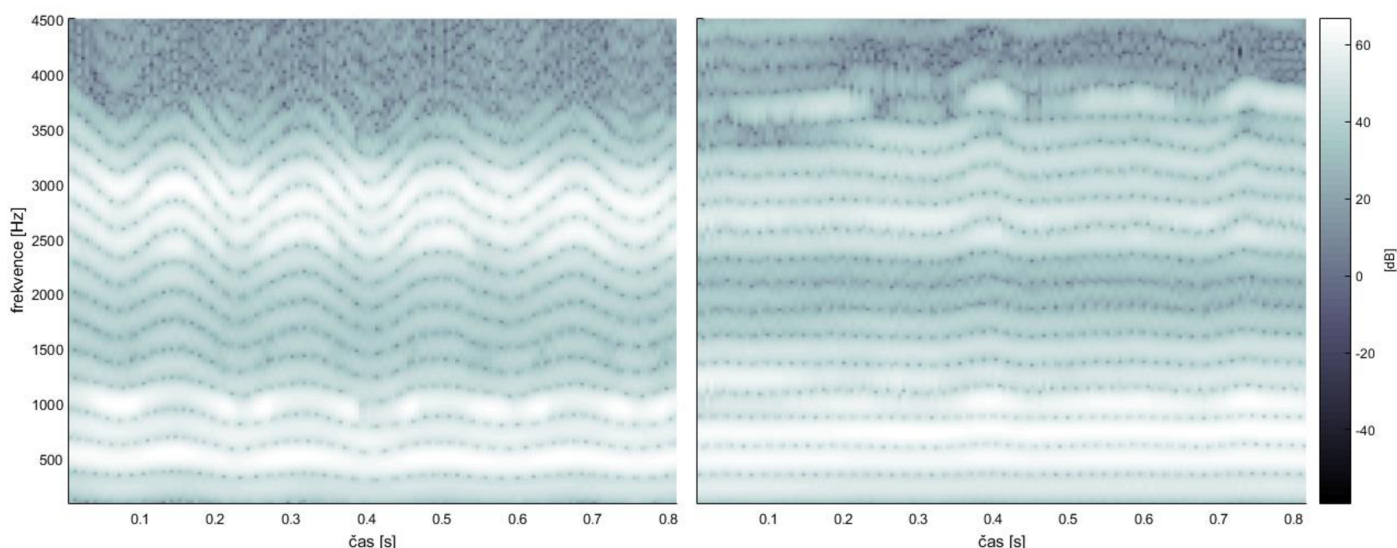
Literatura [1] popisuje zpěvní formant takto: Trénovaní zpěváci generují výrazný formant okolo (2500 až 3000) Hz, jemuž se říká *zpěvní formant*. Tento formant, jež se jeví jako nezávislý na konkrétní samohlásce a tónu, přidává hlasu lesk a výkon.

U všech měřených zpěváků se objevují minimálně dva formanty v oblasti 2700 – 3500 Hz. U některých dokonce i třetí v oblasti 3500 – 4200 Hz. Definujeme tak F4 a F5 jako zpěvní formanty. Tyto formanty jsou přítomny i v mluveném slově. Zpěvní formanty se z hlediska hudebního rozsahu nacházejí v čtyřčárkované oktávě. Jedná se o pískání, které lidské ucho velmi dobře vnímá, protože právě v této oblasti je lidský sluch z hlediska frekvence nejcitlivější. Je třeba dále zmínit, že vzhledem k vzájemné blízkosti zpěvních formantů došlo k tomu, že v některých případech zpracování tónů při různých samohláskách a výškách tónu, LPC analýza našla pouze jeden formant (obr. 4.2.). Tato problematika popsaná v kapitole 3.2.2 souvisí s řádem LPC filtru. Hodnoty pro takovéto případy byly odečteny z grafu FFT spektra. Stejně jako hodnoty zpěvních formantů u mluveného slova a hlavového tónu, kde bylo jejich zapojení minimální.

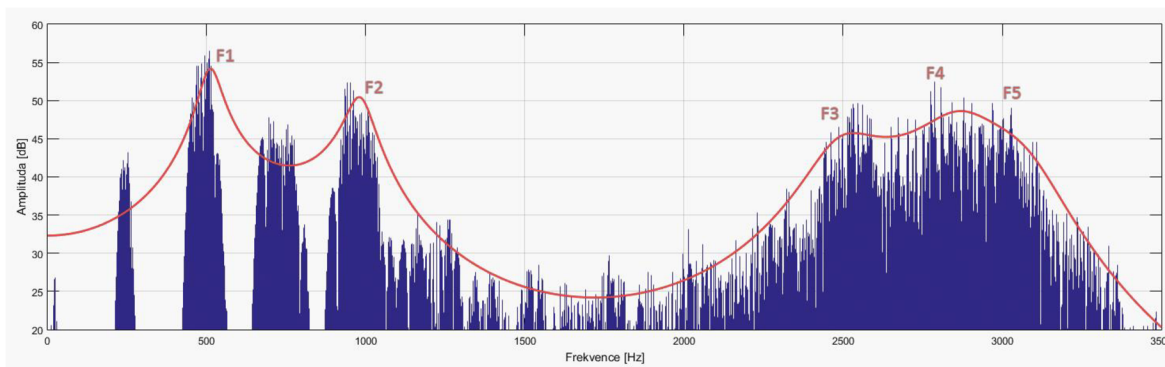
Pravděpodobnému místu vzniku zpěvních formantů z hlediska vokálních kavit a subkavit se budeme věnovat v kapitole 4.9.4.

## 4.3 PŘIROZENÉ VIBRATO

Vibrato je periodická změna frekvence. Všichni měření operní zpěváci používali při zpěvu přirozené vibrato, které je pro šikolené operní hlasy typické. Drobná oscilace výšky tónu generované hlasivkami, tj. frekvence základního tónu a tím i její harmonické řady, způsobuje zaplnění spektra. Díky vibratu se tak spektrum kolem třetího a zpěvních formantů (záleží na samohlásce a míře přirozeného vibrata) stává spojitě a vyplňuje tyto oblasti ve frekvenční doméně (obr. 4.2).



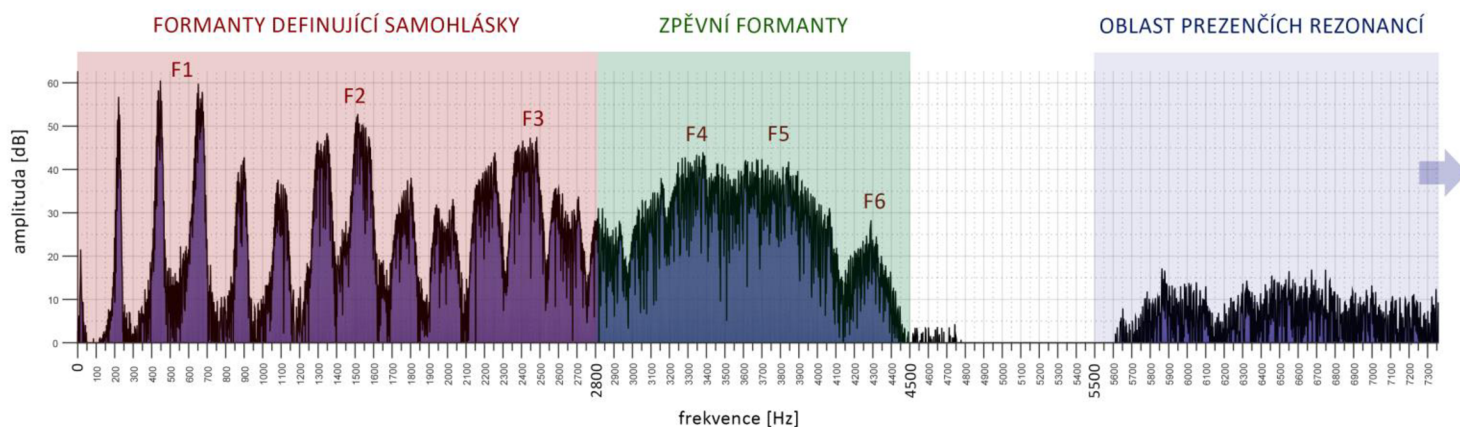
Obr. 4.1. Spektrogram zpívané samohlásky „a“ při plném hlasu v dynamice forte pro tón  $h$  ( $F_0 = 246,9$  Hz) trénovaného operního zpěváka (vlevo) – V. Šembera a amatérského zpěváka (vpravo) – F. Kukosa



Obr. 4.2. FFT spektrum a LPC analýza zpívané samohlásky „a“ při plném hlasu s přirozeným vibratem ( $F_0 = 246,9$  Hz,  $t = 0,8$  s)

## 4.4 SPEKTRUM ZPĚVU

Při pohledu na spektrální analýzu všech zpěváků v celém slyšitelném rozsahu 20Hz - 20kHz objevíme tři výrazné oblasti. První (100 – 3000 Hz) je oblast formantů F1, F2, F3 definující jednotlivé samohlásky. Druhá (2600 – 4500 Hz), ve které nalezneme zpěvní formanty, a která se s první oblastí překrývá v rámci zpívané samohlásky a formantů měřeného zpěváka. Třetí oblast (5500 – 10 000 Hz) jsou šustivé rezonance. Tyto vysoké frekvence tvoří součást zvukového projevu zpěváka a v nahrávce se projevují jako šustivý a pisklavý zvuk, který dodává pocit blízkosti a jasnosti. Tyto frekvence nejsou důležité pro barvu hlasu jako takového, ale jsou určitě nezbytné pro dojem a pocit blízké přítomnosti (vzdálenosti) zpěváka v nahrávce. V audiotechnice se někdy filtr, ovlivňující toto pásmo, označuje právě jako *presence*. Proto označíme tuto oblast jako oblast *prezenčních rezonancí*.



Obr. 4.3. Rozdělení FFT spektra na příkladu zpívané samohlásky „e“ při plném hlasu v dynamice mezzoforte ( $F_0 = 219,4$  Hz)

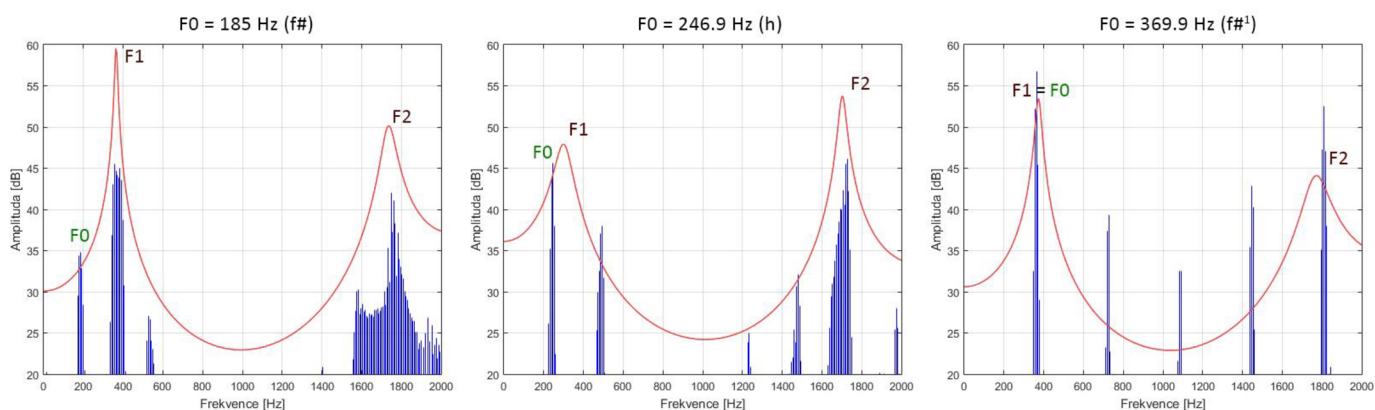
## 4.5 VLIV DYNAMIKY OPERNÍHO ZPĚVU

Při porovnání operního zpěvu (plný rejstřík) zpívaného v dynamice mezzofore a forte, byla míra zapojení formantových oblastí vůči hlasitosti základní frekvence velmi podobná, v některých případech totožná. Protože i pozice formantů byla stejná, tak další zpracování a komparace vychází z průměrovaných hodnot a dále na dynamiku zpěvu není brán zřetel. Je třeba zmínit, že velký vliv měla dynamika zpěvu na oblast prezenčních rezonancí, které se nezesilují úměrně s formantovými oblastmi vokálního traktu. Tato oblast se větší mírou zapojení projevovala v dynamice mezzoforte. V dynamice forte zůstala stejná její úroveň zapojení a klesla tím míra vůči celkové hlasitosti. Právě z této skutečnosti můžeme usuzovat, že prezenční rezonance nejsou spojeny s kavitami vokálního traktu. Může se jednat o rezonance lebečních dutin, to je však pouze spekulace.

## 4.6 ZÁKLADNÍ FREKVENCE V OBLASTI PRVNÍHO FORMANTU

Ve zpěvu, na rozdíl od řeči (opomeňme intonaci), měníme základní frekvenci, která je generována hlasivkami. S touto změnou vyvstává otázka. Co se stane, když se základní frekvence dostane do oblasti prvního formantu?

Na obr. 4.4. vidíme, jak základní frekvence vstupuje do zesilující oblasti filtru prvního formantu vokálního traktu. Nejprve se o zesílení dělí se svojí první harmonickou frekvencí a poté zastane zcela funkci prvního formantu. Tato změna je z hlediska vnímání barvy zpěvu velmi důležitá. Když základní frekvence převezme úlohu prvního formantu je jasně slyšet změna barvy hlasu. Hlas se stává jasnějším a základní tón je velmi dominantní.



Obr. 4.4. FFT a LPC spektra přesunu základní frekvence do oblasti prvního formantu u zpívané samohlásky „i“

## 4.8 TABULKOVÁ KOMPARACE MLUVENÉHO SLOVA A ZPĚVU

Porovnejme teď u každého operního zpěváka jeho zpěv s mluveným slovem. Z měření vyplynulo, že pozice formantů se u všech měřených zpěváků při změně základní frekvence hlasivek nijak výrazně nemění. Dochází pouze k drobným výchytkám podle toho, na kterou harmonickou frekvenci dané řady připadá funkce formantu (kdy se výškově kryje s polohou formantu). Proto dále ve zpracování a porovnávání vycházíme z průměrných hodnot frekvencí jednotlivých formantů u každé samohlásky.

Pro každého zpěváka uvedeme dvě tabulky. První tabulka ukazuje pozici jednotlivých formantů mluveného slova vůči pozicím formantů při zpěvu, a to u všech měřených rejstříků.

Druhá tabulka pak uvádí průměrnou míru zapojení všech samohlásek u jednotlivých formantových oblastí v jednotlivých zpěvních rejstřících i v mluveném slovu. Hodnoty jsou uvedeny jako rozdíl v amplitudě mezi formantovou oblastí a základní frekvencí. Kladné hodnoty udávají zesílení a záporné zeslabení oproti základní frekvenci generované hlasivkami. Vzhledem k použitým metodám a průměrování se jedná o hodnoty orientační, ale pro naši analýzu zcela dostačující.

### 4.8.1 SHRUTÍ ROZDÍLŮ U JEDNOTLIVÝCH ZPĚVÁKŮ

Pozice prvních tří formantů jasně definuje každou samohlásku. Můžeme tedy pozorovat, že zpívané samohlásky jsou jiné než ty, které zpěváci používají v běžné řeči. Například u všech uvedených zpěváků si můžeme všimnout poklesu prvního formantu při zpěvu v samohlásce „a“. Zpívané „a“ je tak otevřenější a hlubší. Tato změna je dána změnou vertikální polohy jazyka a větším otevřením úst. Podobně můžeme pozorovat pokles druhého formantu u zpívaných samohlásek „e“ a „i“, které se změnou horizontální polohy jazyka a nastavením čelisti stávají temnějšími.

V druhé tabulce porovnááme průměrnou míru zapojení formantových oblastí. Můžeme si všimnout, že hodnoty pro mluvené slovo jsou u Ondřeje Musila (bas), Stanislava Fialy (baryton) a Vojtěcha Šembery (baryton) jsou podobné nejvíce jejich hrudnímu zpívanému rejstříku. U Pavla Valenty (tenor) objevíme větší podobnost s rejstříkem hlavovým. Tyto podobnosti jsou dány mírou otevření mezipatrové záklopy (*velum*). Mluvené slovo má tak u Pavla Valenty nosovější charakter. Stejně tomu je u autora této práce Františka Kukosy (baryton), který v porovnání operních pěvců není, ale výsledky zpracování jeho hlasu jsou v *příloze č. 4*.

Porovnáváním jednotlivých rejstříků a samohlásek se budeme zabývat v další podkapitole 4.8.

## 4.8.2 ONDŘEJ MUSIL (BAS)

TAB. 4.2. POZICE FORMANTŮ ZPĚVU A MLUVENÉHO SLOVA – ONDŘEJ MUSIL

samohláska		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
A	zpěv	538	939	2302	2582	3042
	mluvené slovo	628	1010	2526	-	-
E	zpěv	482	1343	2024	2615	3001
	mluvené slovo	465	1558	2205	-	-
I	zpěv	317	1657	2215	2702	3018
	mluvené slovo	226	1956	2845	-	-
O	zpěv	415	767	2344	2529	2928
	mluvené slovo	413	664	2484	-	-
U	zpěv	351	775	2156	2603	3071
	mluvené slovo	268	600	2273	-	-

TAB. 4.3. PRŮMĚRNÁ MÍRA ZAPOJENÍ FORMANTŮ – ONDŘEJ MUSIL

formant	A(F <sub>x</sub> ) - A(F <sub>0</sub> ) [dB]			
	rejstřík			mluvené slovo
	plný	hrudní	hlavový	
F1	11,8	6,9	0,3	7,3
F2	5,4	-1,9	-11,7	-1,0
F3	-2,3	-13,1	-39,3	-17,5
F4	-4,4	-15,3	-41,9	-18,1
F5	-9,1	-27,8	-44,8	-22,9

### 4.8.3 STANISLAV FIALA (BARYTON)

TAB. 4.4. POZICE FORMANTŮ ZPĚVU A MLUVENÉHO SLOVA – STANISLAV FIALA

samohláska		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
A	zpěv	525	983	2518	2910	3268
	mluvené slovo	706	1229	2515	-	-
E	zpěv	638	1374	2241	2674	3028
	mluvené slovo	561	1647	2413	-	-
I	zpěv	376	1861	2342	2690	3047
	mluvené slovo	302	2128	2706	-	-
O	zpěv	467	900	2469	2813	3019
	mluvené slovo	504	808	2657	-	-
U	zpěv	403	881	2337	2893	-
	mluvené slovo	269	750	2400	-	-

TAB. 4.5. MÍRA ZAPOJENÍ FORMANTŮ – STANISLAV FIALA

formant	A(F <sub>x</sub> ) - A(F <sub>0</sub> ) [dB]			
	rejstřík			mluvené slovo
	plný	hrudní	hlavový	
F1	6,5	5,2	0,0	4,7
F2	1,1	0,6	-14,7	-3,0
F3	-8,0	-10,4	-30,3	-13,2
F4	-9,1	-17,6	-33,0	-19,6
F5	-9,8	-15,3	-36,5	-29,4

#### 4.8.4 VOJTĚCH ŠEMBERA (BARYTON)

TAB. 4.6. POZICE FORMANTŮ ZPĚVU A MLUVENÉHO SLOVA – VOJTĚCH ŠEMBERA

samohláska		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
A	zpěv	531	1015	2626	2984	3238
	mluvené slovo	753	1179	2535	-	-
E	zpěv	557	1479	2423	2946	3306
	mluvené slovo	549	1623	2453	-	-
I	zpěv	366	1825	2545	2873	3156
	mluvené slovo	316	2052	2225	-	-
O	zpěv	521	893	2639	2901	3143
	mluvené slovo	543	850	2777	-	-
U	zpěv	375	718	2560	2803	2980
	mluvené slovo	338	639	2332	-	-

TAB. 4.7. MÍRA ZAPOJENÍ FORMANTŮ – VOJTĚCH ŠEMBERA

formant	A(F <sub>x</sub> ) - A(F <sub>0</sub> ) [dB]			
	rejstřík			mluvené slovo
	plný	hrudní	hlavový	
F1	15,7	12,2	-2,2	14,6
F2	7,9	8,4	-22,0	9,1
F3	3,5	2,9	-21,9	-0,9
F4	4,0	3,1	-31,1	-3,3
F5	-0,3	-5,2	-39,2	-7,1

## 4.8.5 PAVEL VALENTA (TENOR)

TAB. 4.7. POZICE FORMANTŮ ZPĚVU A MLUVENÉHO SLOVA – PAVEL VALENTA

samohláska		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
A	zpěv	576	1137	2664	3085	3537
	mluvené slovo	622	1175	2710	-	-
E	zpěv	551	1420	2395	3160	3475
	mluvené slovo	517	1721	2382	-	-
I	zpěv	344	1937	2336	3149	3477
	mluvené slovo	322	2225	2815	-	-
O	zpěv	546	895	2600	3065	3520
	mluvené slovo	469	915	2522	-	-
U	zpěv	454	882	2363	3223	3527
	mluvené slovo	348	687	2332	-	-

TAB. 4.8. MÍRA ZAPOJENÍ FORMANTŮ – PAVEL VALENTA

formant	A(Fx) - A(F <sub>0</sub> ) [dB]			
	rejstřík			mluvené slovo
	plný	hrudní	hlavový	
F1	9,6	11,3	-0,5	4,5
F2	1,5	1,9	-10,1	-5,0
F3	-7,6	-8,3	-26,2	-19,3
F4	-9,0	-10,5	-35,6	-22,6
F5	-9,6	-13,2	-30,8	-23,5



## 4.9 CELKOVÁ KOMPARACE

### 4.9.1 REJSTŘÍKY

Porovnání průměrných hodnot zapojení formantů jak mezi zpěváky, tak mezi jednotlivými samohláskami, nám nabízí poměrně jasné výsledky o podstatě jednotlivých rejstříků zpěvu.

Hrudní a hlavový rejstřík odpovídají přesně zavedené definici, popsané v kapitole 1.4.3. Hrudní rejstřík je, co se zapojení formantů týče, nejvíce podobný mluvenému slovu. Hlavový rejstřík se vyznačuje velkým poklesem všech formantů kromě prvního, způsobeného otevřením mezipatrové záklopky a poklesem tlaku ve vokálním traktu. Výsledkem hlavového rejstříku je tón, podobný zvuku flétny, který je chudý na harmonické frekvence a ve kterém dominuje základní frekvence  $F_0$ , která při zpívání ve vyšší poloze přebírá funkci prvního formantu.

Plný operní rejstřík vychází z hrudního rejstříku, u kterého je mezipatrová záklopka uzavřena a nedochází u něj k propojení nosní dutiny s vokálním traktem. Plný hlas se od hrudního nejvíce liší mírou zapojení zpěvních formantů, které jsou u plného rejstříku v průměru o 8 až 12 dB hlasitější než u hrudního.

### 4.9.2 POROVNÁNÍ FORMANTŮ MEZI ZPĚVÁKY

Hodnoty, uvedené v následující tabulce, jsou průměrnými hodnotami všech samohlásek z hlediska míry zapojení pro jednotlivé formanty. Tato míra zapojení je vyjádřena jako procentuální zesílení amplitudy formantu vůči amplitudě základního tónu  $F_0$ .

zpěváci		formant	bas	baryton	tenor	Zesílení oproti základní frekvenci [%]	
			O. Musil	S. Fiala	V. Šembera		P. Valenta
zpěv (rejstřík)	plný	F1	28,4	16,0	42,0	22,2	
		F2	13,5	4,4	21,6	4,3	
		F3	-4,4	-15,5	10,4	-16,7	
		F4	-9,3	-18,4	11,5	-19,6	
		F5	-20,4	-20,7	-0,2	-21,3	
	hrudní	F1	14,8	12,4	32,3	26,1	
		F2	-3,1	2,6	22,8	5,8	
		F3	-26,7	-19,8	9,5	-17,3	
		F4	-31,8	-35,8	9,4	-22,1	
		F5	-48,3	-33,8	-12,0	-27,5	
	hlavový	F1	0,7	0,0	-3,5	-0,6	
		F2	-21,2	-23,9	-34,7	-16,1	
		F3	-72,1	-48,4	-35,0	-43,1	
		F4	-77,0	-52,4	-49,8	-58,7	
		F5	-82,4	-60,6	-62,2	-51,0	
mluvené slovo		F1	15,6	10,5	40,2	9,6	
		F2	-0,3	-5,5	27,8	-9,4	
		F3	-33,9	-27,5	1,2	-40,7	
		F4	-35,7	-41,6	-5,5	-47,6	
		F5	-45,5	-55,1	-16,0	-49,5	

Tab. 4.9. Míra zapojení formantů mezi zpěváky

Při porovnávání formantů mezi zpěváky stojí za povšimnutí především Vojtěch Šembera, jehož míra zapojení zpěvních formantů plného hlasu byla nejvyšší. Jeho technika zapojení zpěvních formantů je na takové úrovni, že velmi špatně vytváří tradiční hrudní rejstřík a stále při něm, stejně tak jako u mluveného slova, zapojuje zpěvní formanty. Nejvíce ukázkový hlavový tón měl Ondřej Musil, jehož formanty F3, F4 a F5 byli o 40 dB tišší, než základní frekvence hlasu. S takovýmto poklesem třetího formantu mírně klesla i srozumitelnost jednotlivých samohlásek.

#### 4.9.3 POROVNÁNÍ FORMANTŮ MEZI SAMOHLÁSKAMI

Hodnoty, uvedené v další tabulce, jsou průměrnými hodnotami všech zpěváků z hlediska míry zapojení pro jednotlivé formanty. Tato míra zapojení, je stejně jako u předchozí tabulky vyjádřena jako procentuální zesílení amplitudy formantu vůči amplitudě základního tónu  $F_0$ .

		formant	A	E	I	O	U	Zesílení oproti základní frekvenci [%]	
zpěv (rejstřík)	plný	F1	36,5	35,5	12,9	31,4	19,6		
		F2	27,6	26,2	-0,7	4,2	-2,4		
		F3	4,8	4,2	-8,4	-5,7	-27,8		
		F4	4,6	-3,1	-14,3	-4,7	-27,2		
		F5	-8,8	-8,9	-18,9	-15,0	-28,7		
	hrudní	F1	26,0	26,2	8,9	33,3	12,6		
		F2	25,6	17,7	-5,6	3,9	-6,4		
		F3	-10,9	3,7	-15,1	-11,1	-34,5		
		F4	-15,6	-6,2	-20,0	-25,1	-33,5		
		F5	-37,0	-18,2	-27,2	-36,8	-49,1		
	hlavový	F1	1,0	-3,5	0,2	0,1	-2,0		
		F2	-25,0	-20,6	-47,9	-7,8	-18,4		
		F3	-48,2	-41,0	-46,4	-50,0	-62,6		
		F4	-61,0	-54,8	-57,6	-58,8	-65,3		
		F5	-69,2	-56,4	-58,1	-68,5	-70,6		
mluvené slovo		F1	25,2	22,1	11,6	24,3	11,7		
		F2	33,2	-0,7	-8,2	7,5	-16,2		
		F3	-11,4	-14,1	-20,9	-26,6	-53,2		
		F4	-24,5	-29,2	-21,3	-30,5	-57,6		
		F5	-33,5	-42,0	-34,2	-48,5	-60,9		

Tab. 4.10. Míra zapojení formantů mezi samohláskami

Z této tabulky můžeme vyčíst, že nejlépe celkově rezonující samohláskou při všech registrech je samohláska „a“ a nejhůře rezonující je samohláska „i“. Pro největší zapojení zpěvních formantů jsou nejvhodnější samohlásky „a“ a „e“ a nejhůře se zpěvní formant zapojuje do samohlásky „u“.

#### 4.9.4 URČENÍ MÍSTA VZNIKU REZONANCÍ ZPĚVNÍCH FORMANTŮ

V poslední tabulce nalezneme průměrnou pozici a míru zapojení zpěvních formantů všech zpěváků pro jednotlivé samohlásky. Míra zapojení, je stejně jako u předchozích dvou tabulek vyjádřena jako procentuální zesílení amplitudy formantu vůči amplitudě základního tónu  $F_0$ .

		formant	A	E	I	O	U	
pozice		F4	2960	2912	2889	2903	2872	frekvence [Hz]
		F5	3355	3326	3196	3294	3242	
zpěv (rejstřík)	plný	F4	4,6	-3,1	-14,3	-4,7	-27,2	Zesílení oproti základní frekvenci [%]
		F5	-8,8	-8,9	-18,9	-15,0	-28,7	
	hrudní	F4	-15,6	-6,2	-20,0	-25,1	-33,5	
		F5	-37,0	-18,2	-27,2	-36,8	-49,1	
	hlavový	F4	-61,0	-54,8	-57,6	-58,8	-65,3	
		F5	-69,2	-56,4	-58,1	-68,5	-70,6	
mluvené slovo		F4	-24,5	-29,2	-21,3	-30,5	-57,6	
		F5	-33,5	-42,0	-34,2	-48,5	-60,9	

Tab. 4.9. Pozice a míra zapojení zpěvních formantů

Jak už bylo zmíněno, docent Mišun ve své práci [1] popisuje zpěvní formant, jako formant, který se jeví nezávislý na konkrétní samohlásce a tónu. Pozice změřených a v této práci popsanych zpěvních formantů se také jeví jako nezávislá na konkrétní samohlásce a tónu. Míra zapojení se ale s různými samohláskami mění, a to velmi podobně u všech zpěváků.

Protože dochází ke změně zapojení těchto formantů při různých samohláskách a má na ně i stejný vliv hlavový rejstřík, při kterém dochází k otevření mezipatrové záklopky, můžeme usuzovat, že subkavita, zodpovědná za rezonance zpěvních formantů, se nachází uvnitř vokálního traktu.

Jelikož nedochází ke změnám velikosti této subkavity, jedná se s největší pravděpodobností o subkavitu předního horního patra ústní dutiny.

## 5 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ PRO PRAXI

Na základě výsledků této práce můžeme vyvodit některé závěry pro praxi. Je přitom ale nutné přihlédnout k malému počtu měřených zpěváků a podle toho přistupovat k následujícím doporučením.

### 5.1 DOPORUČENÍ PRO ZPĚVÁKY A UČITELE ZPĚVU

Zpěvní formanty, tvořené v subkavitě horního patra ústní dutiny, jsou velmi důležité pro operní zpěv. Stejně jako přirozené vibrato, které pomáhá vyplnit oblasti zpěvních formantů. Zpěváci, stejně tak jako jejich učitelé, by měli při cvičení a výuce zpěvu brát na vědomí, že nastavení vokálního traktu pro každou samohlásku je jinak vhodné pro zapojení těchto zpěvních formantů. Snaha o dosažení požadované barvy zpěvu by neměla být obecná pro všechny samohlásky, nýbrž je nutné přistupovat k barvě hlasu, pro každou samohlásku zvlášť. Dále jsme uvedli, že barva hlasu se výrazně mění ve chvíli, kdy základní zpívaný tón je tak vysoko, že převezme funkci prvního formantu. Opět platí, že tyto zlomové výšky tónů jsou spojené s každou jednotlivou samohláskou a nelze k nim přistupovat obecně. Každý zpěvák, respektive i učitel zpěvu, by se měl pokusit, alespoň podle sluchu nalézt tyto zlomy pro každou samohlásku, aby mohl s nimi dále lépe pracovat.

### 5.2 DOPORUČENÍ PRO ZVUKAŘSKOU PRAXI

Každý uvedený zpěvní rejstřík má charakteristické zapojení různých frekvenčních oblastí. Zvukový mistr by měl k tomuto faktu přihlížet. Různým nastavením například ekvalizace a pásmové dynamiky může totiž charakteristické rysy těchto rejstříků posílit, ale stejně tak utlumit. Zvláště pak v tomto ohledu je citlivé pásmo zpěvních formantů (2800 až 4500 Hz). Stejně tak by měl zvukový mistr pamatovat na existenci prezenčních oblastí (5,5 – 10 kHz), která k hlasovému projevu člověka neodmyslitelně patří, pokud při nahrávání tuto oblast úplně potlačíme, ztratíme z nahrávky zpěvu jeho přirozenost, uvěřitelnost a lesk. Naopak pokud tuto oblast vhodně posílíme, můžeme v nahrávce získat pocit bližší přítomnosti zpěváka, aniž bychom změnili barvu jeho hlasu.

## ZÁVĚR

Cílem této práce byla analýza formantových oblastí mužských hlasů při zpívaných samohláskách pro plný (operní), hrudní a hlavový rejstřík. K tomuto účelu byly pořízeny nahrávky v bezodrazové komoře zpěvu čtyř trénovaných operních zpěváků a jednoho amatérského zpěváka. Pro analýzu těchto nahrávek ve frekvenční doméně bylo použito algoritmu FFT a analýzy LPC.

Na základě výsledku celkové analýzy byly (v oblasti 2800 – 4500 Hz) definovány zpěvní formanty F4 a F5, které nahrazují popis jednoho zpěvního formantu uvedeného v literatuře [1]. Dále byla definována oblast prezenčních rezonancí (5,5 – 10 kHz), která se podílí na barvě zvukové nahrávky, ne však na barvě hlasu jednotlivých zpěváků.

Pro hrudní a hlavový rejstřík zpěvu byl potvrzen popis uvedený v literatuře [1]. Plný (operní) rejstřík byl popsán z hlediska formantů jako hrudní rejstřík s větším zapojením zpěvních formantů F4 a F5. U operního zpěvu se dále ukázala technika přirozeného vibrata jako jeho nedílná součást, která pomáhá zaplnit spektrum výsledného hlasu. A to především v oblasti zpěvních formantů F4 a F5.

Tyto poznatky lze dále upřesnit a rozvinout provedením dalších měření. Přesnějších výsledků bychom mohli dosáhnout jak měřením většího počtu zpěváků, tak i zkrácením a navýšením počtu intervalů zpívaných tónů. Také oblast výzkumu problematiky formantů a zpěvu by se mohla více rozšířit. Například pro ženské hlasy, u kterých bude zapotřebí ve vyšších polohách nutné použití jiné než LPC analýzy, kvůli vzdálenostem jednotlivých harmonických frekvencí. Samozřejmě další rozšíření tohoto výzkumu může být v rámci zpěvních rejstříků. Nabízí se například možnost měření hlasových technik populárního zpěvu. Vedle rozšíření zkoumané oblasti se nabízí možnost rozšíření použitých metod v této problematice. Například použitím elektromagnetické rezonance pro skenování vokálního traktu.

## PRAMENY

[1] MIŠUN, Vojtěch. *Tajemství lidského hlasu*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Nakladatelství VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-3499-8

[2] ČIHÁK, Radomír. *Anatomie 2*. 1. vyd. Praha: Avicenum, 1988. ISBN 80-060-88.

[3] MATHWORKS. *Matlab Documentation*. [Online]. 2015 [cit.2016-5-20] dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/matlab/>

[4] SOVKA, P., POLLÁK P. *Vybrané metody číslicového zpracování signálů*, vyd. 2., Praha: ČVUT, 2003. 258 stran. ISBN 80-010-2821-6

[5] PSUTKA, J., MÜLLER, L., MATOUŠEK, J., RADOVÁ, V. *Mluvíme s počítačem česky*, vyd. 1., Praha: Academia Praha, 2006. 747 stran. ISBN 80-200-1309-1.

[6] WLACH, Jan. *Aplikace Fourierovy analýzy na rozpoznávání kvality samohlásek podle jejich formantů*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. Přírodovědecká fakulta. Katedra Matematické analýzy a aplikací matematiky, 2013. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Tomáš Fürst, Ph.D.

[7] RABINER, L. R., SCHAFER R. W. *Introduction to Digital Speech Processing, Foundations and Trends®*, vyd. 1., Delft, Nizozemsko: Publishers Inc, 2007. ISBN: 978-1-60198-070-0.

[8] MIŠUREC, J., SMÉKAL, Z. *Číslicové zpracování signálů*, vyd. 1., Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. ISBN: 978-80-214-4448-5

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

DFT	discrete Fourier transform – diskrétní Fourierova transformace
FFT	fast Fourier transform – rychlá Fourierova transformace
$F_0$	základní frekvence [Hz]
F1	první formant
F2	druhý formant
F3	třetí formant
F4	čtvrtý formant
F5	pátý formant
$F_x$	x-tý formant
LPC	linear predictive coding – lineární predikce

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1. Akustické dutiny hlasového ústrojí [1] (Mišun, 2010) .....	3
Obr. 1.2. Schéma hlasového ústrojí [1] (Mišun, 2010) .....	3
Obr. 1.3. Konečno-prvkové modely vokálního traktu [1] (Mišun, 2010) .....	5
Obr. 1.4. Přenosové funkce vokálního traktu [1] (Mišun, 2010) .....	6
Obr. 1.5. Spektra samohlásky při různé základní frekvenci $F_0$ [1] (Mišun, 2010).....	7
Obr. 3.1. Výstupní graf FFT a LPC spektra pro plný tón G# (103.8 Hz).....	15
Obr. 4.1. Spektrogram zpívané samohlásky „a“ při plném hlasu.....	17
Obr. 4.2. FFT spektrum a LPC analýza zpívané samohlásky „a“ při plném hlasu.....	18
Obr. 4.3. Rozdělení FFT spektra .....	18
Obr. 4.4. Přesun základní frekvence do oblasti prvního formantu.....	19

## SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1. Pozice formantů samohlásek ve vztahu k fyzickým rozměrům .....	16
Tab. 4.2. Pozice formantů zpěvu a mluveného slova – Ondřej Musil.....	21
Tab. 4.3. Průměrná míra zapojení formantů – Ondřej Musil .....	21
Tab. 4.4. Pozice formantů zpěvu a mluveného slova – Stanislav Fiala .....	22
Tab. 4.5. Průměrná míra zapojení formantů – Stanislav Fiala .....	22
Tab. 4.6. Pozice formantů zpěvu a mluveného slova – Vojtěch Šembera .....	23
Tab. 4.7. Průměrná míra zapojení formantů – Vojtěch Šembera .....	23
Tab. 4.8. Pozice formantů zpěvu a mluveného slova – Pavel Valenta .....	24
Tab. 4.9. Průměrná míra zapojení formantů – Pavel Valenta .....	24
Tab. 4.10. Míra zapojení formantů mezi zpěváky .....	25
Tab. 4.11. Míra zapojení formantů mezi samohláskami.....	26
Tab. 4.12. Pozice a míra zapojení zpěvních formantů.....	27

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1	Hodnoty zesílení a pozice formantu pro jednotlivé samohlásky – Ondřej Musil (bas)
Příloha č. 2	Hodnoty zesílení a pozice formantu pro jednotlivé samohlásky – Stanislav Fiala (baryton)
Příloha č. 3	Hodnoty zesílení a pozice formantu pro jednotlivé samohlásky – Vojtěch Šembera (baryton)
Příloha č. 4	Hodnoty zesílení a pozice formantu pro jednotlivé samohlásky – František Kukosa (baryton)
Příloha č. 5	Hodnoty zesílení a pozice formantu pro jednotlivé samohlásky – Pavel Valenta (tenor)
Příloha č. 6	Fotografie zpěváků z nahrávání



# Příloha č. 1

Hodnoty zesílení a pozice formantu pro jednotlivé samohlásky - Ondřej Musil (bas)

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
A	plný	16,1	9,0	2,5	1,3	-7,0
	zpěv hrudní	3,9	5,0	-16,5	-15,4	-31,6
	hlavový	3,0	-1,7	-41,1	-43,4	-49,1
	mluvené slovo	13,5	15,2	-4,8	-9,0	-11,2

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
E	plný	14,1	11,9	5,2	2,7	-2,3
	zpěv hrudní	7,7	8,1	4,1	-5,0	-11,2
	hlavový	-5,1	-9,8	-27,1	-38,9	-38,8
	mluvené slovo	5,6	-3,0	-8,1	-13,2	-17,8

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
I	plný	8,8	1,8	-1,0	-6,8	-13,1
	zpěv hrudní	3,5	-7,0	-15,4	-12,0	-23,5
	hlavový	4,9	-29,7	-33,6	-35,1	-38,5
	mluvené slovo	5,0	-10,5	-21,8	-23,0	-20,0

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
O	plný	11,0	5,9	-4,1	-4,0	-4,0
	zpěv hrudní	13,3	-3,7	-14,0	-19,1	-37,9
	hlavový	1,2	-1,6	-41,6	-47,1	-48,4
	mluvené slovo	7,4	0,5	-11,8	-11,7	-24,8

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
U	plný	9,3	-1,9	-14,2	-15,5	-19,0
	zpěv hrudní	6,3	-11,7	-23,5	-24,8	-34,9
	hlavový	-2,6	-15,5	-53,3	-44,7	-49,3
	mluvené slovo	5,2	-7,4	-40,8	-33,6	-40,8

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
A	plný	599	965	2327	2648	3167
	zpěv hrudní	480	944	2213	2576	3084
	hlavový	536	909	2366	2523	2876
	mluvené slovo	640	1013	2526	-	-

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
E	plný	498	1335	2001	2635	2930
	zpěv hrudní	427	1248	1963	2688	3077
	hlavový	520	1445	2107	2523	2996
	mluvené slovo	500	1602	2122	-	-

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
I	plný	289	1703	2227	2636	3019
	zpěv hrudní	277	1579	2144	2667	3045
	hlavový	384	1690	2275	2804	2989
	mluvené slovo	200	1955	2600	-	-

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
O	plný	469	806	2309	2454	2987
	zpěv hrudní	411	683	2309	2570	3084
	hlavový	366	814	2413	2564	2714
	mluvené slovo	411	704	2424	-	-

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
U	plný	369	751	2176	2574	2961
	zpěv hrudní	293	757	2084	2632	3181
	hlavový	390	819	2207	-	-
	mluvené slovo	270	600	2273	-	-

## Příloha č. 2

Hodnoty zesílení a pozice formantu pro jednotlivé samohlásky - Stanislav Fiala (baryton)

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
A	plný	9,0	9,2	0,2	-1,6	-6,5
	zpěv					
	hrudní	7,7	5,2	-2,6	-12,1	-22,0
	hlavový	0,0	-33,9	-35,1	-38,9	-45,9
mluvené slovo		2,2	3,3	-10,6	-26,8	-30,6

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
E	plný	14,0	10,0	-0,8	-5,9	-4,1
	zpěv					
	hrudní	11,8	6,8	-2,2	-9,3	-10,5
	hlavový	0,0	-8,0	-27,6	-20,8	-35,4
mluvené slovo		3,4	-6,7	-16,8	-21,8	-34,8

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
I	plný	-6,6	-12,5	-16,5	-15,6	-15,7
	zpěv					
	hrudní	-9,9	-10,8	-19,9	-22,7	-13,3
	hlavový	0,0	-21,7	-20,7	-27,6	-31,5
mluvené slovo		2,7	-2,4	-6,0	-3,9	-22,1

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
O	plný	11,5	2,0	-5,1	-4,3	-13,0
	zpěv					
	hrudní	11,2	3,7	-3,3	-18,0	-15,5
	hlavový	0,0	-1,3	-27,9	-27,4	-33,3
mluvené slovo		12,0	5,2	-6,5	-13,8	-30,0

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
U	plný	4,8	-3,4	-17,9	-18,2	-
	zpěv					
	hrudní	5,2	-2,0	-23,8	-25,7	-
	hlavový	0,0	-8,7	-40,1	-50,1	-
mluvené slovo		3,2	-14,6	-26,0	-31,8	-

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
A	plný	573	994	2584	2864	3279
	zpěv					
	hrudní	517	984	2542	2955	3250
	hlavový	485	971	2427	2912	3274
mluvené slovo		750	1180	2550	-	-

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
E	plný	584	1347	2260	2767	3043
	zpěv					
	hrudní	581	1275	2219	2613	3013
	hlavový	750	1500	2245	2642	-
mluvené slovo		600	1700	2400	-	-

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
I	plný	366	1776	2248	2633	2966
	zpěv					
	hrudní	379	1824	2374	2747	3128
	hlavový	384	1984	2405	-	-
mluvené slovo		250	2050	2400	-	-

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
O	plný	409	797	2449	2765	3099
	zpěv					
	hrudní	496	910	2456	2862	2939
	hlavový	496	992	2501	-	-
mluvené slovo		500	826	2631	-	-

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
U	plný	355	734	2312	2765	-
	zpěv					
	hrudní	357	917	2197	2955	-
	hlavový	496	992	2501	2960	-
mluvené slovo		250	750	2400	2942	-

# Příloha č. 3

Hodnoty zesílení a pozice formantu pro jednotlivé samohlásky - Vojtěch Šembera (baryton)

formanty		A(Fx) - A(F0) [dB]				
		F1	F2	F3	F4	F5
A	plný	19,7	12,9	8,8	9,2	3,9
	zpěv	11,4	16,2	5,4	6,7	-2,2
	hrudní	-5,6	-14,6	-9,9	-30,9	-33,3
	hlavový	16,5	21,0	8,5	6,0	1,0
mluvené slovo						

formanty		A(Fx) - A(F0) [dB]				
		F1	F2	F3	F4	F5
E	plný	14,9	13,2	3,7	4,5	-1,9
	zpěv	9,2	10,0	6,7	10,8	-2,0
	hrudní	-1,7	-17,6	-22,7	-30,7	-30,1
	hlavový	20,6	11,1	6,7	2,0	-2,8
mluvené slovo						

formanty		A(Fx) - A(F0) [dB]				
		F1	F2	F3	F4	F5
I	plný	12,6	9,6	3,6	4,3	1,6
	zpěv	16,9	10,2	10,4	2,5	-2,9
	hrudní	0,0	-38,6	-26,1	-34,5	-39,7
	hlavový	13,0	8,2	4,0	3,0	-1,9
mluvené slovo						

formanty		A(Fx) - A(F0) [dB]				
		F1	F2	F3	F4	F5
O	plný	16,8	1,6	7,4	5,8	0,9
	zpěv	14,9	5,4	3,6	2,2	-0,6
	hrudní	-1,0	-21,4	-18,5	-30,9	-51,1
	hlavový	15,0	12,0	-5,0	-5,8	-8,8
mluvené slovo						

formanty		A(Fx) - A(F0) [dB]				
		F1	F2	F3	F4	F5
U	plný	14,8	2,2	-6,0	-3,8	-6,2
	zpěv	8,7	0,2	-11,7	-7,0	-18,3
	hrudní	-2,6	-17,7	-32,4	-28,7	-42,0
	hlavový	8,0	-7,0	-18,5	-21,9	-23,0
mluvené slovo						

formanty		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
A	plný	584	1024	2581	2846	3143
	zpěv	507	1019	2544	3056	3333
	hrudní	501	1003	2752	3051	-
	hlavový	722	1200	2530	-	-
mluvené slovo						

formanty		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
E	plný	563	1366	2288	2772	3358
	zpěv	568	1597	2480	2965	3221
	hrudní	539	1475	2501	3100	3339
	hlavový	588	1614	2431	-	-
mluvené slovo						

formanty		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
I	plný	362	1660	2351	2682	2898
	zpěv	363	1931	2613	2928	3232
	hrudní	373	1883	2672	3008	3339
	hlavový	250	2000	2740	-	-
mluvené slovo						

formanty		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
O	plný	528	802	2541	2799	3070
	zpěv	491	944	2704	2960	3216
	hrudní	544	934	2672	2944	-
	hlavový	550	850	2630	-	-
mluvené slovo						

formanty		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
U	plný	368	670	2483	2726	2929
	zpěv	368	734	2568	2880	3031
	hrudní	389	752	2629	-	-
	hlavový	294	639	2520	-	-
mluvené slovo						

# Příloha č. 4

Hodnoty zesílení a pozice formantu pro jednotlivé samohlásky - František Kukosa (baryton)

formanty		A(Fx) - A(F0) [dB]				
		F1	F2	F3	F4	F5
A	plný	6,6	6,1	-7,0	-13,3	-10,4
	zpěv					
	hrudní	-2,6	6,0	-10,2	-17,6	-13,8
	hlavový	2,8	3,7	-22,3	-20,6	-27,3
mluvené slovo		5,3	5,2	-9,1	-19,7	-20,1

formanty		A(Fx) - A(F0) [dB]				
		F1	F2	F3	F4	F5
E	plný	0,9	3,9	-13,5	-18,0	-18,5
	zpěv					
	hrudní	-4,8	-9,5	-16,8	-11,7	-14,0
	hlavový	0,0	-10,4	-22,4	-36,4	-36,2
mluvené slovo		11,8	-0,9	-9,2	-20,2	-24,9

formanty		A(Fx) - A(F0) [dB]				
		F1	F2	F3	F4	F5
I	plný	6,5	-4,4	-7,3	-16,8	-10,8
	zpěv					
	hrudní	-4,5	-7,4	-11,1	-17,0	-13,8
	hlavový	4,7	-10,3	-13,1	-36,0	-39,0
mluvené slovo		3,6	-16,5	-9,4	-10,9	-27,9

formanty		A(Fx) - A(F0) [dB]				
		F1	F2	F3	F4	F5
O	plný	14,5	3,6	-8,1	-13,1	-15,0
	zpěv					
	hrudní	1,0	12,9	-5,4	-9,9	-12,2
	hlavový	0,0	-5,4	-39,1	-38,6	-31,2
mluvené slovo		1,6	-3,3	-17,3	-23,3	-28,1

formanty		A(Fx) - A(F0) [dB]				
		F1	F2	F3	F4	F5
U	plný	2,6	-7,4	-24,1	-28,2	-20,5
	zpěv					
	hrudní	5,7	-21,5	-28,0	-17,2	-6,4
	hlavový	0,0	-10,6	-35,1	-32,0	-36,1
mluvené slovo		5,4	-3,3	-25,6	-35,6	-36,3

formanty		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
A	plný	617	1118	2662	3183	3580
	zpěv					
	hrudní	629	1200	2635	3387	3605
	hlavový	629	1259	2620	3141	3765
mluvené slovo		762	1200	2640	-	-

formanty		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
E	plný	578	1446	2527	3226	3728
	zpěv					
	hrudní	496	1488	2411	3120	3600
	hlavový	629	1259	2533	3150	3776
mluvené slovo		553	1850	2600	-	-

formanty		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
I	plný	309	2134	2336	2901	3224
	zpěv					
	hrudní	374	1984	2425	2939	3200
	hlavový	629	1888	2517	-	-
mluvené slovo		278	2339	3035	-	-

formanty		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
O	plný	486	899	2652	3163	4000
	zpěv					
	hrudní	485	971	2667	3136	3397
	hlavový	629	1248	2523	3184	3733
mluvené slovo		450	800	2800	-	-

formanty		frekvence [Hz]				
		F1	F2	F3	F4	F5
U	plný	349	622	2195	2813	2987
	zpěv					
	hrudní	496	939	2224	2820	2971
	hlavový	624	1243	1867	2491	3368
mluvené slovo		286	616	2300	-	-

# Příloha č. 5

Hodnoty zesílení a pozice formantu pro jednotlivé samohlásky - Pavel Valenta (tenor)

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
A	plný	9,2	10,3	-5,6	-3,6	-5,5
	zpěv hrudní	18,9	14,8	-6,1	-6,8	-8,3
	hlavový	4,2	-10,4	-23,9	-27,6	-31,3
	mluvené slovo	2,5	6,7	-16,4	-14,7	-16,7

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
E	plný	12,8	5,6	-1,8	-7,1	-5,9
	zpěv hrudní	14,8	3,2	-4,0	-10,4	-7,6
	hlavový	-1,1	-11,8	-17,3	-35,3	-26,0
	mluvené slovo	5,4	-7,3	-12,6	-25,3	-26,7

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
I	plný	6,2	-3,8	-5,0	-11,7	-10,7
	zpěv hrudní	-0,2	-9,4	-12,3	-11,6	-16,4
	hlavový	-5,6	-27,5	-32,2	-43,8	-31,5
	mluvené slovo	0,0	-15,0	-21,3	-22,4	-23,7

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
O	plný	12,2	-2,7	-9,4	-6,5	-10,1
	zpěv hrudní	17,6	0,5	-7,0	-11,2	-12,8
	hlavový	-0,3	3,6	-25,8	-29,4	-27,1
	mluvené slovo	8,3	-6,3	-26,5	-25,0	-25,4

		A(Fx) - A(F0) [dB]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
U	plný	7,8	-2,1	-16,1	-15,9	-15,9
	zpěv hrudní	5,3	0,4	-12,3	-12,4	-21,2
	hlavový	0,4	-4,2	-31,5	-41,8	-37,9
	mluvené slovo	6,1	-3,1	-19,8	-25,6	-24,9

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
A	plný	648	1123	2651	3155	3671
	zpěv hrudní	584	1126	2627	3086	3411
	hlavový	496	1163	2715	3014	3531
	mluvené slovo	622	1175	2710	-	-

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
E	plný	579	1488	2415	3224	3572
	zpěv hrudní	547	1245	2371	3069	3419
	hlavový	528	1526	2400	3188	3435
	mluvené slovo	517	1721	2382	-	-

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
I	plný	304	1959	2357	3208	3539
	zpěv hrudní	352	1800	2317	3141	3504
	hlavový	376	2053	2334	3099	3387
	mluvené slovo	322	2225	2815	-	-

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
O	plný	567	910	2588	3130	3601
	zpěv hrudní	539	885	2555	2925	3488
	hlavový	533	891	2656	3141	3472
	mluvené slovo	469	915	2522	-	-

		frekvence [Hz]				
formanty		F1	F2	F3	F4	F5
U	plný	443	870	2352	3262	3571
	zpěv hrudní	461	886	2414	3179	3488
	hlavový	459	891	2323	3230	3522
	mluvené slovo	348	687	2332	-	-

## Příloha č. 6

### Fotografie zpěváků z nahrávání

