



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra TEORIE OBVODŮ

Spektrální analýza diadochokinetických úloh u dětí

Spectral analysis of diadochokinetic tasks in children's speech

Diplomová práce

Studijní program: Lékařská elektronika a bioinformatika

Studijní obor: Lékařská technika

Vedoucí práce: prof. Ing. Roman Čmejla, CSc.

Bc. Samuel Maduda

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Maduda** Jméno: **Samuel** Osobní číslo: **459000**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra teorie obvodů**
Studijní program: **Lékařská elektronika a bioinformatika**
Specializace: **Lékařská technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Spektrální analýza diadochokinetických úloh u dětí

Název diplomové práce anglicky:

Spectral Analysis of Diadochokinetic Tasks in Children's Speech

Pokyny pro vypracování:

- Proveďte rešerši literatury pojednávající o spektrálních charakteristikách v diadochokinetických úlohách.
- Na základě rešerše literatury vyberte vhodné akustické parametry.
- Na databázi dětských promluv /pa/-/ta/-/ka/ proveďte spektrální analýzy.
- Posuďte věkovou závislost spektrálních parametrů, možnosti klasifikace a realizujte experiment s rozpoznáváním věku. Analýzu proveďte v prostředích Praat a MATLAB a klasifikační experiment v MATLABu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Harrington, J & Cassidy, S (1999), Techniques in speech acoustics, Kluwer Academic Pub.
- [2] Nissen, S.L., Fox, R.A. (2009). Acoustic and spectral patterns in young children's stop consonant productions. In Journal of the Acoustical Society of America, 126, 1369-1378.
- [3] Lousada, M., Jesus, L. M. T., & Pape, D. (2012). Estimation of stops' spectral place cues using multitaper techniques. DELTA, 28(1), 1–26.
- [4] Smith, L. K., Goberman, A. M. (2014). Long-time average spectrum in individuals with Parkinson disease, Neuro Rehabilitation, vol. 35, no. 1, pp. 77-88.
- [5] Diepeveen, S., van Haften, L., Terband, H., de Swart, B., & Maassen, B. (2019). A standardized protocol for maximum repetition rate assessment in children. Folia Phoniatrica et Logopaedica, 71, 238–250.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Roman Čmejla, CSc., katedra teorie obvodů FEL

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **07.01.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.05.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

prof. Ing. Roman Čmejla, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 20.5. 2021

.....

Bc. Samuel Maduda

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval prof. Ing. Romanu Čmejlovi. CSc. za vedení práce a čas, který mi při konzultacích a tvorbě této práce věnoval.

Práce vznikla za podpory grantu GAČR GA19-20887S "Populační normy akusticko-fonetických charakteristik dětské řeči.

ABSTRAKT

Spektrální analýza diadochokinetických úloh u dětí:

Cílem této práce je analyzovat diadochokinetické promluvy zdravých dětí ve spektrální oblasti krátkodobého a dlouhodobého spektra. Krátkodobé spektrum je charakterizováno čtyřmi spektrálními momenty a spektrálním sklonem, dlouhodobé spektrum je charakterizováno třemi spektrálními vrcholy, které korespondují se základní frekvencí hlasu a formantovými frekvencemi. Tyto charakteristiky budou zkoumány z hlediska jejich závislosti (korelaci) na věku. Na základě informací od zdravých dětí by mohlo dojít k normalizaci dat spektrálních charakteristik diadochokinetických promluv a pomocí nich odlišit zdravé a nemocné jedince. Výzkum ukázal, že korelace spektrálních momentů plozív a samohlásek v promluvě /pa-/ta-/ka/ a věku je signifikantní, z krátkodobého spektra nejvíce korelují první spektrální momenty – neboli spektrální těžiště. Naopak, zanedbatelně korelují spektrální sklony. Charakteristiky dlouhodobého spektra korelují rovněž výrazně. Experiment s určením věku dítěte na základě jeho spektrálních charakteristik ukázal, že data nejsou vhodná kvůli velkému rozptylu ke klasifikaci, lepších výsledků dosahuje regresní úloha. Při určité selekci nejvíce korelujících parametrů bylo kritérium RMSE minimalizováno na 1,79 let pro chlapecký model a 1,88 let pro dívčí model.

Klíčová slova

Spektrální analýza, diadochokinetické úlohy, vývojová dysfázie, spektrální momenty

ABSTRACT

Spectral analysis of diadochokinetic tasks in children's speech:

Main goal of this thesis is to perform short-time and long-time spectral analysis of oral diadochokinetic utterances performed by healthy children. Short-time spectrum will be characterized by four spectral moments and spectral slope, long-time spectrum will be characterized by first three spectral peaks, that corresponds with fundamental frequency and formants frequencies. These features will be tested for correlation with age of children. Based on healthy children's results, spectral characteristics of DDK utterances could be normalized and create a tool to distinguish healthy and speech-impaired speakers. In this thesis, significant correlation between spectral moments of burst stops and vowels in /pa/-/ta/-/ka/ utterance sequence and age of a child was discovered. The highest correlating short-time spectrum characteristics are spectral centroids – the first spectral moments. Conversely, spectral slopes correlates poorly. Long-time spectrum characteristics also shows high correlation with age. Conducted experiment to determine age of child based on its DDK utterance's spectral characteristics showed that data isn't suitable for classification due to high variance, age estimation through regression seems to work better for this task. Selection of the most correlating parameters make RMSE criterion reach minimum value of 1,79 years for boys' model and 1,88 years for girls' model.

Keywords

Spectral analysis, diadochokinetic tasks, developmental dysphasia, spectral moments

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	9
1 Úvod	10
1.1 Diadochokinézie	11
1.2 Sekvence pataka	12
1.3 Spektrum hlásek	12
1.4 Cíle práce.....	14
2 Přehled současného stavu	15
3 Metody	17
3.1 Volba metody výpočtu spektra.....	17
3.2 Spektrální charakteristiky	19
3.2.1 Spektrální momenty.....	19
3.2.2 Spektrální sklon	20
3.2.3 Charakteristiky dlouhodobého spektra	20
3.3 Databáze	21
3.4 Popis algoritmu výpočtu spektrálních charakteristik krátkodobého spektra..	22
3.5 Popis algoritmu výpočtu spektrálních charakteristik dlouhodobého spektra.	23
3.6 Úloha rozpoznávání věku	24
4 Výsledky	24
4.1 Spektrální momenty	25
4.2 Porovnání charakteristik dle věkových skupin.....	27
4.2.1 Plozivy	27
4.2.2 Samohlásky.....	30
4.2.3 Spektrální sklon	33
4.2.4 Testování středních hodnot spektrálních charakteristik	35
4.3 Porovnání charakteristik dle pohlaví.....	36
4.4 Korelace s věkem	38
4.5 Spektrální charakteristiky dlouhodobého spektra	41
4.6 Rozpoznávání věku na základě spektrálních charakteristik	44
5 Diskuse	47
6 Závěr	49

Seznam použité literatury	51
Seznam příloh.....	54
A. Kompletní výsledky statistického zpracování	54
B. Obsah přiloženého CD	54

Seznam symbolů a zkratek

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
α	-	Hladina významnosti
μ_1	Hz	První spektrální moment – těžiště
μ_2	Hz	Druhý spektrální moment – rozptyl
μ_3	-	Třetí spektrální moment – šikmost
μ_4	-	Čtvrtý spektrální moment – špičatost
f_k	Hz	Hodnota frekvence k-té složky spektra
p_k	-	Hodnota normovaného spektra k-té složky
f_0	Hz	Základní frekvence hlasu

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
DDK	Diadochokinetická
RMSE	Střední kvadratická chyba (Root Mean-Square Error)
G1	První věková skupina. Skupina je složena z dětí do 8. let
G2	Druhá věková skupina. Skupina je složena z dětí mezi 8. a 12. rokem
G3	Třetí věková skupina. Skupina je složena z dětí nad 12. let

1 Úvod

Řeč je nejvýznamnější formou lidské komunikace, kterou lze vyjádřit mluvenou a psanou manifestací. Lidé, kteří mají narušenou verbální komunikační schopnost, jsou tedy znevýhodněni v aspektu sociálně-kulturního života [1]. Mluvená řeč je komplexní činnost lidského organismu a je produkována kombinací nervosvalové koordinace dýchacího, fonetického a artikulačního systému a nesprávná funkce, kteréhokoliv z těchto systémů vede k řečovým poruchám [2]. Právě komplexní součinnost pohybů mluvidel, široký rozsah používaných svalových skupin a jejich správná koordinace dělá z řeči jeden z nejdřívějších indikátorů poruchy nervového vývoje. Pro správnou interpretaci výsledků vyšetření fonetických schopností je nutné znát chování řeči z hlediska jejich reprezentace akustickými parametry. Včasná diagnostika řečové poruchy a následná terapie mohou být klíčové pro částečné či úplné napravení nedostatečných řečových dovedností, popř. je možné odhalení řečové vady pomoci při diagnostice její příčiny nervového vývoje, která tuto vadu způsobuje a která může být velmi závažná. [1]

Poruchy řeči se objevují v mnoha formách a mohou být důsledkem závažnějších poškození, zejména poškození motorického nervového systému. Projevy poruch řeči se pohybují na škále od těch mírných až k těm nejsilnějším a často se objevují již v raném věku života. Mezi mírnější řečové vady může patřit např. dyslálie neboli vadná výslovnost jedné nebo více hlásek mateřského jazyka. Při těchto vadách je dochází ke zjednodušování a nahrazení problematické hlásky nebo skupiny hlásek, které se vytváří stejným způsobem (např. samohlásky, bilabiální souhlásky atd), jinou skupinou hlásek, které pacient vytvořit dokáže. Logopedická terapie dyslálií je běžnou praxí s velkou pravděpodobností úplného napravení řečových vad. Mezi závažnější poruchy řeči můžeme řadit afázii, tedy poruchu produkce nebo porozumění řeči, či vývojovou dysfázii, tedy narušenou schopnost naučit se verbálně komunikovat. Takovéto poruchy jsou spojeny s poškozením centrální nervové soustavy, organickým poškozením mozku v prenatálním věku, úrazem hlavy nebo nádorem v mozku. Terapie zmíněných řečových vad je obtížnější a v některých případech pouze částečná. [3][4][5]

Vývojová dysfázie (dříve byly také používané názvy sluchoněmota či alalie) označuje specificky narušený vývoj řeči, projevující se ztíženou schopností nebo neschopností naučit se verbálně komunikovat, i když podmínky pro rozvoj řeči jsou přiměřené.⁶ Příčinu narušené komunikační schopnosti tedy nelze vysvětlit mentální retardací, poruchou sluchu, citovou deprivací či jinými nepříznivými vlivy prostředí, ale dochází k ní pravděpodobně difúzním poškozením centrální nervové soustavy v raném věku vývoje.⁷ Vývojová dysfázie má charakter systémového porušení a rozsah této poruchy přesahuje pouze fonetickou oblast, ale zasahuje také senzorický a motorický nervový systém. Jako hlavní symptomy se uvádějí např. nerovnoměrný vývoj celé osobnosti, porucha krátkodobé sluchové paměti, malá slovní zásoba nebo vadná fonetická

a fonologická realizace hlásek či poruchu v pořadí řazení slabik, vše při normální inteligenci dítěte (v případě snížené inteligence se jedná o přidruženou poruchu, snížená inteligence sama o sobě není symptomem vývojové dysfázie). Do určité míry bývá narušena i jemná motorika či laterální. [7]

Z podstaty popsané poruchy je zřejmé, že terapie vývojové dysfázie je komplexní proces, který výrazně přesahuje logopedickou praxi. Správná terapie vyžaduje spolupráci odborníků z několika lékařských specializací.

Při diagnostice řečových poruch je klíčové slovo odborníka. Ovšem, pro včasnou detekci např. vývojové dysfázie nebo diagnostiku závažnějších poškození či onemocnění projevující se řečovými vadami, lze hledat podporu v počítačovém zpracování nahrávané řeči.

1.1 Diadochokinézie

Posouzení řeči odborníkem může probíhat mnoha způsoby a byla vyvinuta řada testů a úloh pro diagnostiku poruch mluvení [8]. Mezi tradiční metody posouzení řeči z hlediska tvorby jednotlivých hlásek mluvidly a preciznosti artikulace patří orální diadochokinézie, která je klíčová pro posouzení motorických dovedností mluvního ústrojí [9][10]. Kinestézie je definovaná jako cit pro pohyb, alternativní definice vymezuje pojem kinestézie jako kontrolu nad vykonávaným pohybem. Orální diadochokinetické úlohy sestávají z opakující se sekvence rychlých, protichůdných pohybů mluvidel většinou za účelem vytvoření požadované slabiky či zvuku. Existují také tiché diadochokinetické úkoly, při kterých nevzniká hláska, ale rovněž dochází k rychlému pohybu mluvidel. Slabiky, které má zkoumaný jedinec vyslovovat, jsou složeny zpravidla z různých druhů hlásek tak, aby docházelo k výrazným změnám v pohybu mluvidel [10]. Samotné vyšetření poté probíhá s nejvyšší možnou rychlostí artikulace jedince při zachování správné artikulace. Nejčastěji užívanou sekvencí slabik je /pa/-/ta/-ka/ (některé zdroje uvádějí /pe/-/te/-/ke/ [11]) kombinující neznělou plozivní souhlásku a samohlásku. Některé diadochokinetické studie používají znělé alternativy plozivních souhlásek /b/-/d/-g/. Pro správné vykonání diadochokinetických úloh je tedy nutná kontrola nad mluvidly a jejich motorickou funkcí. DDK úlohy poskytují efektivní nástroj pro vyšetření poruch řeči z hlediska nedostatečné motoriky mluvidel, nervosvalové koordinace a kontroly.

1.2 Sekvence pataka

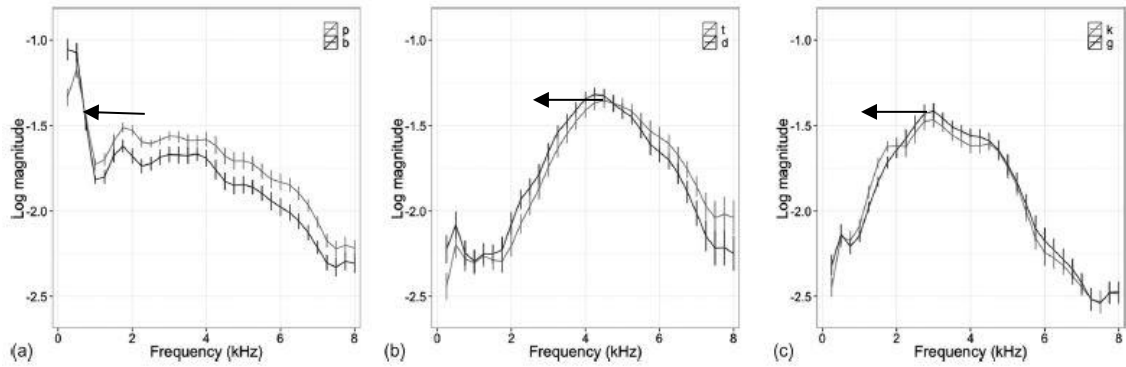
Sekvence slabik /pa/-/ta/-/ka/, která je nejčastěji používanou sekvencí v orálních diadochokinetických úlohách, je složena z jádra slabiky tvořeného samohláskou, zpravidla samohláskou /a/, a plozivní souhláskou (zkráceně plozivou, někdy také označovanou jako okluzíva či explozíva). Plozivy jsou speciálním druhem souhlásek, na rozdíl od znělých a neznělých hlásek vykazují spíše transientní charakter. Vznikají uvolněním okluze mluvidel v určitém artikulačním místě, dle konkrétní hlásky se toto místo liší. V sekvenci jsou použity tři rozdílné typy neznělých plozivních souhlásek, každá s jiným místem okluze dané souhlásky. Souhláska /p/ je bilabiální neboli obouretná, /t/ je ze skupiny předodásňových ploziv a /k/ je velární neboli měkkopatrová. Použití různých typů exploziv z hlediska místa okluze způsobuje variabilitu v pohybu mluvidel a tím pádem vede k lepšímu vyšetření motorické funkce mluvidel i neurosvalové koordinace.

1.3 Spektrum hlásek

Spektrum označuje v zpracování signálů rozložení signálu do frekvenčních složek v signálu zastoupených. S myšlenkou rozkladu signálu na součet harmonických signálů s různou frekvencí a fází přišel francouzský matematik Joseph Fourier. Jeho jméno nese transformace, která je nutná pro přechod z časové oblasti do frekvenční a která se stala zlatým standardem výpočtu frekvenčního spektra.

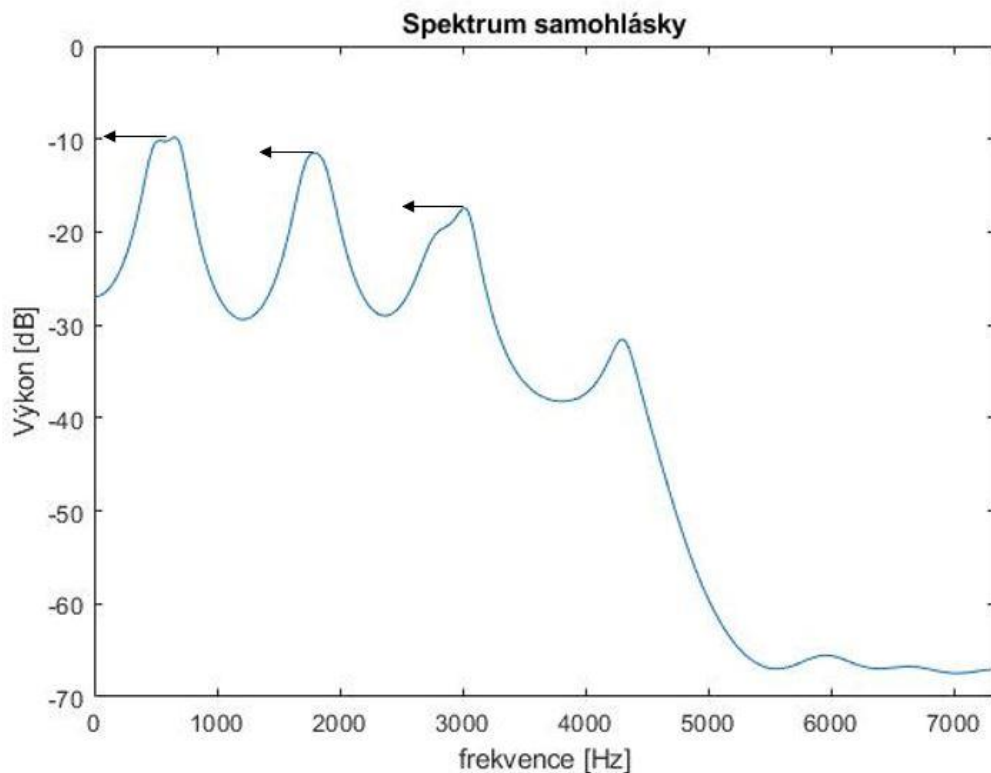
Spektrum řečového signálu se může podstatně lišit dle druhu hlásky. Znělé hlásky mají v časové oblasti tvar periodických vln s vysokou energií, neznělé hlásky mají šumový charakter a explozivní tvar přechodového děje. Tyto různé časové průběhy se promítají do tvaru spektra.

Spektrum plozivních souhlásek se liší dle místa artikulace. Bilabiální souhlásky mají rozptýlené spektrum a nejvyšší energii nesou frekvence mezi 500-1500 Hz. Spektra alveolárních a velárních ploziv mají podobný tvar se zřejmými vrcholy, rozdíl mezi těmito hláskami je ve frekvencích vrcholů. Alveolární explozivy mají výrazně zastoupené frekvenční složky nad 4000 Hz, spektrum velárních souhlásek má vrchol kolem 3000 Hz. Z fyziologického pohledu se v DDK úlohách objevují nejvyšší frekvence u souhlásky /t/, která vzniká mezi uvolněním okluze mezi předním patrem a jazykem. Po vrcholu spektrum rychle klesá. Souhláska /k/ vzniká uvolněním okluze vytvořené měkkým patrem a rovněž jazykem. Takto vytvořený zvuk nese nejvýrazněji zastoupené frekvence nižší než souhláska /t/, nicméně spektrum plozivy /t/ po vrcholu rychle klesá, a proto je spektrální těžiště vyšší u souhlásky /k/, jejíž spektrum si udržuje déle konstantní tvar. Nejnižší frekvence, které nesou výrazné množství energie, má souhláska /p/, která vzniká uzavřením rtů o sebe [29]. Spektra skupin plozivních souhlásek jsou zobrazena na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Spektra explozív dle místa artikulace. Vlevo je spektrum bilabiálních souhlásek. Uprostřed se nachází spektrum alveolárních plozív a napravo spektrum velárních plozív. Při dospívání dětí se snižuje frekvence nejvíce zastoupených složek ve směru šipky. Obrázek převzat z [29].

Spektrum samohlásek v sobě nese informaci o základní frekvenci hlasu, která určuje výšku hlasu, a jeho tvar má tzv. formantovou strukturu. Na základě této struktury lze od sebe odlišit jednotlivé samohlásky. Vlivem dospívání u dětí dochází k posunu spektrálních vrcholů směrem k nižším frekvencím (viz Obr. 1.2).



Obrázek 1.2: Výkonové spektrum samohlásky /a/ v decibelech. V grafu je patrná formantová struktura. Při dospívání dětí se vrcholy (formantové frekvence) posouvají směrem k nižším frekvencím.

1.4 Cíle práce

Cílem této práce je provést spektrální analýzu diadochokinetických promluv /pa/-/ta/-/ka/ u zdravých dětí s fyziologickým vývojem z hlediska řeči a její tvorby. Rešerše naznačila, že je prostor pro studium orálních diadochokinetických úloh z hlediska spektrální oblasti, kterých zatím nebylo provedeno dostatečné množství. Některé studie věnující se tématům spektrální analýzy určité skupiny hlásek ukázaly, že taková analýza může poskytnout cenné informace z hlediska klasifikace, popř. regrese, či jejich korelace s věkem či pohlavím řečníka. Cílem je tedy zkoumat korelaci věku a spektrálních charakteristik pro děti obou pohlaví. Spektrální charakteristiky budou vybrány na základě rešerše. Předmětem zkoumání jsou zejména plozivní souhlásky v slabikách /pa/-/ta/-/ka/ a také samohlásky stejných slabik. Jednotlivé hlásky z celé promluvy budou získány segmentací signálu na základě manuálně stanovených časových značek profesorem Čmejrou, vedoucím práce, v programu Praat. Ze zkoumaných spektrálních charakteristik je cílem vybrat ty, které korelují s věkem. Průběh hodnot těchto charakteristik v závislosti na věku poslouží k tvorbě normy zdravých dětí, která by mohla v dalším výzkumu vést k podpůrnému algoritmu při diagnostice dětí nejen v logopedické, klinické praxi. Tato norma bude otestována klasifikační či regresní úlohou. Cílem je posoudit možnosti určení věku klasifikační či regresní úlohou, která bude na základě spektrálních charakteristik promluvy a pohlaví rozpoznávat věk řečníka a tím ho přiřazovat do určité věkové skupiny. Zpracování řečových nahrávek, výpočet spektrálních charakteristik i úloha určení věku z dat budou realizovány algoritmem, naprogramovaném ve výpočetním prostředí MATLAB.

2 Přehled současného stavu

V minulosti se objevily názory, které zpochybňovaly metody využívající diadochokinetických úloh jako součást posouzení poruch řeči a motorických schopností mluvicího ústrojí. Hlavním argumentem byla obtížná interpretace získaných výsledků v průběhu vyšetření [11] z důvodu nedostatku studií, které by normalizovaly naměřené výsledky např. z hlediska pohlaví, věku či různých poruch řeči. Bez normativních dat je obtížné odlišit zdravého jedince od jedince s poškozením promluvy [2],[9],[12]. Z těchto důvodů začaly vznikat studie, které se věnovaly právě tvorbě normy pro následnou interpretaci v klinické praxi [13]. Normativní studie vznikaly pro různé jazyky, věky či onemocnění (např. pacienti s kóktáním či rozštěpem patra). Řada studií se věnuje výzkumu diadochokinetických úloh v časové oblasti [2],[13],[22], ve které se pozoruje zejména maximální rychlost promluvy slabik při zachování správné výslovnosti. Několik výzkumů se zacílovalo na DDK promluvy pacientů s Parkinsonovou chorobou a jejich klasifikace. Dalším zkoumaným atributem se stal také věk, resp. různé věkové skupiny. Často studovanou skupinou jsou děti od nejnižší věkové kategorie až do pubertálního až adolescentního věku. Cílem takových studií je snaha porozumět vývoji řeči od útlého věku, ale i nervosvalové koordinaci mluvidel či různým poruchám řeči. Jiný pohled na problematiku diadochokinetických úloh a jejich zpracování může přinést analýza zvukových signálů ve spektrální oblasti, která je zatím nepříliš prozkoumanou oblastí. I zde je prostor pro normativní studie využívající spektrální analýzu k porozumění řeči z hlediska zastoupených frekvencí v promluvách.

Mnoho studií prokázalo rozdíl ve spektrálních charakteristikách mezi dětmi a dospělými jedinci [14]. Dětská řeč se liší v základní frekvenci, formantových frekvencích a obecně ve vyšší variabilitě promluvy ve spektrální i časové oblasti. Celá řada studií se také věnuje výzkumu variability a změn spektrálních i časových charakteristik promluv mezi dětmi různého stáří. Tyto studie zkoumají, jakým způsobem se vyvíjí promluva reprezentována sérií jejich charakteristik v průběhu dospívání dětí. Normativní studie mohou pomoci s vývojem metodiky diagnostiky dětí na základě jejich promluv pro klinickou praxi.

Studie z roku 2012 [15] se zabývala vývojem spektrálních charakteristik řeči v průběhu vývoje lidského jedince sérií experimentů. Sledované spektrální charakteristiky byly zejména formantové a základní frekvence hlasu. Výsledky studie ukázaly, že změny v řeči v průběhu věku lidského jedince lze pozorovat i na měnících se spektrálních charakteristikách a naznačila tak, že spektrální charakteristiky a věk jednotlivců mohou korelovat. K podobným výsledkům se dopracovala i studie z roku 2020 [16], která porovnávala vliv věku a pohlaví na vývoj časových, spektrálních i spektrálních charakteristik řeči. Experimentu se účastnilo 169 jednotlivců, 79 mužů a 90 žen, ve věku od 17 do 87 let, kteří četli dva různé texty. Sledovanými spektrálními charakteristikami byly spektrální momenty frikativ a základní hlasová frekvence.

Výsledky ukázaly, že věk má signifikantní vliv na první a třetí spektrální moment (těžiště a šikmost) frikativ, zatímco pohlaví má vliv na hodnotu druhého a čtvrtého spektrálního momentu frikativ (rozptyl a špičatost). Studie ukázala, že stárnutí se projevuje rozdílně mezi oběma pohlavími a věk koreluje s některými spektrálními momenty. Ovšem skupina dětí a dospívajících zůstala mimo zorné pole výzkumu. Spektrální momenty frikativ zkoumali další autoři. Jedním z nich byl Shawn Nissen, který zkoumal ve své studii [17] spektrální charakteristiky frikativ, včetně momentů, právě na skupině dětí od 3 do 6 let, která sestávala z 30 participantů. Kromě spektrálních momentů, byly jako charakteristiky použity také sklon a normalizovaná amplituda spektra. Výsledky studie ukázaly na významnou korelaci věku a spektrálního těžiště, křivosti a šikmosti (první, třetí a čtvrtý moment) a také spektrálního sklonu. Význam druhého spektrálního momentu, tj. rozptylu, spočívá v určení místa artikulace frikativy. Spektrální rozptyl tak může být nadále zkoumán ve spojitosti s věkem či klasifikací hlásky i u dalších druhů souhlásek, např. plozív. Na variabilitu spektra u dětí různého věku odkazuje i studie z roku 2007 [18]. Pomocí spektrálních i keprálních charakteristik byla pozorována proměnlivost spektra běžné promluvy v průběhu dospívání italských dětí od 7-13 let, resp. od 5-17 let u severoamerických dětí. Výsledkem studie bylo zjištěno, že děti mezi 7 a 13 lety nejsou homogenní skupinou řečníků. Ale celková variabilita promluv mezi dětmi klesá s věkem, což je pravděpodobně způsobeno rozvojem artikulačních a fonetických schopností jedinců. Ke stejnému závěru se dopracovala také studie z roku 2016 [14], která byla prováděna na indických dětech.

Kromě frikativ začaly být předmětem zkoumání plozivní souhlásky, které jsou součástí často používaných slabik /pa/-/ta/-/ka/ při orálních diadochokinetických úlohách. Plozivní souhlásky, které vznikají otevřením uzávěry určitých mluvidel, jsou po znělých (samohlásky) a neznělých (souhlásky) hláskách třetí skupinou, která je od ostatních dvou odlišná časovým průběhem. Studie z roku 2004 [20] ukázala, že právě spektrální analýza, zejména výpočet momentů, které popisují tvar spektra, může být velmi efektivní nástroj pro klasifikaci plozív. Studie vychází z předpokladu dostatečně rozdílných tvarů spektra plozivních souhlásek vznikajících v různých artikulačních místech. Celý tvar spektra je nahrazen pouze několika charakteristikami – spektrálními momenty, na jejichž základě je tedy možné provést klasifikaci. K srovnatelným výsledkům analýzy plozivních souhlásek vedla i studie M. Lousady [21] z univerzity v Aveiru, která se zaměřila kromě spektrálních momentů také na sklon spektra plozív evropské portugalské. Výpočet spektra neprobíhal krátkodobou Fourierovou transformací (STFT – short time Fourier transform), ale metodou Multitaper, která překonává některé nedostatky klasické fourierovské analýzy. I tato studie ukázala, že plozivní souhlásky lze s velmi solidní přesností charakterizovat jejich spektrálním tvarem vyjádřeným momenty a spektrálním sklonem.

3 Metody

3.1 Volba metody výpočtu spektra

Řečový signál může být reprezentován jako funkce času, tzn. jako změna akustického tlaku v průběhu času. Poté mluvíme o časové nebo také temporální doméně. Signály lze ale též vyjádřit v spektrální doméně jako kompozici komponent o různých frekvencích. Obě domény se hojně používají při analýze a zpracování signálů a pro přechod mezi nimi slouží transformace.

K získání dekomponovaného signálu do harmonických signálů s různou frekvencí a fází, které známe pod pojmem spektrum, vede pouze Fourierova transformace. Ostatní transformace (např. diskrétní kosinová transformace, Karhunen-Loeveova transformace) poskytují jiný druh dekompozice a následný výsledek není tím, který chápeme pod pojmem spektrum.

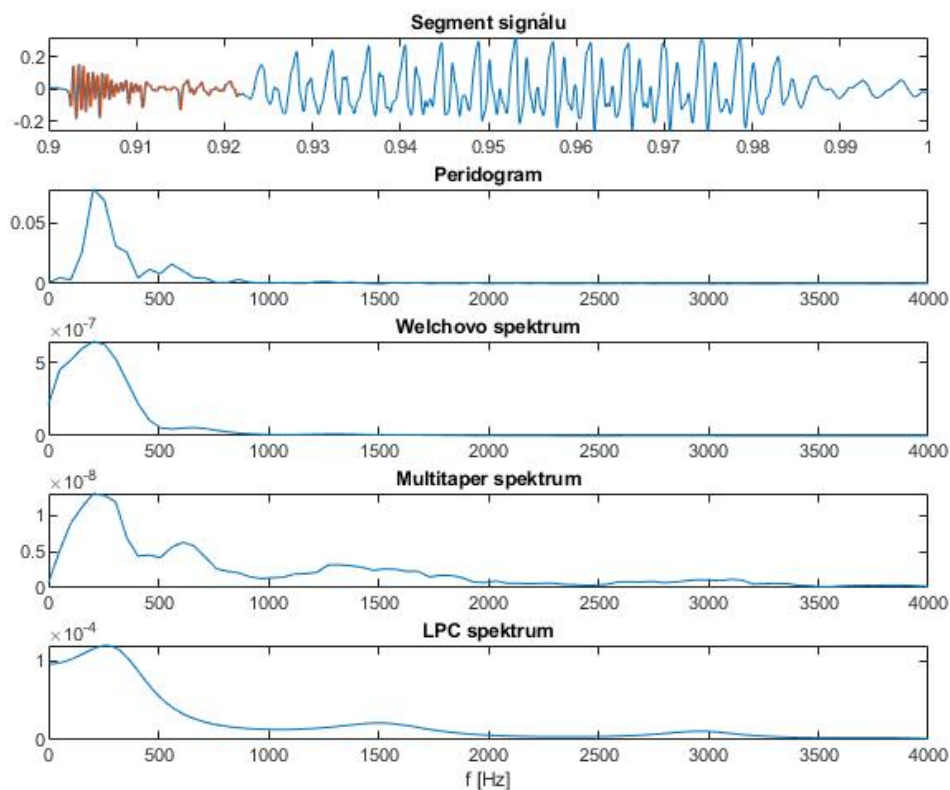
Použití Fourierovy transformace má ovšem své limity a z tohoto důvodu je pravidelně používáno několik postupů pro zpřesnění odhadu spektra v předzpracování signálu i v zpracování spektra.

Výpočet spektra ve smyslu Fourierovy transformace ovšem umožňuje několik možností, jak lze amplitudové, resp. výkonové spektrum vypočítat. Welchova metoda spočítá spektrální výkonovou hustotu a počítá spektrum na základě DFT. Tato metoda spočívá v segmentaci úseku signálu na zvolený počet segmentů (ve funkci v Matlabu je výchozí hodnota 8 segmentů), které jsou zpravidla přenásobeny váhovacím oknem. Z daných úseků se spočítá jejich spektrální vyjádření pomocí DFT a následně se všechny segmenty zprůměrují, čím dochází k zprůměrování jednotlivých realizací šumu. Aby se předcházelo ztrátě informace při použití váhovacího okna na začátku a konci segmentu, je pro tvorbu po sobě následujících segmentů použit překryv okna. Po sobě jdoucí segmenty tak sdílejí zvolenou část signálu a informace, která je potlačena váhovacím oknem, je naopak méně potlačena či vůbec nepotlačena v následujícím segmentu. Welchova spektrální hustota je oproti periodogramu vyhlazená.

Spektrální obálku signálu poskytuje také LPC analýza, která nevychází z Fourierovy transformace, ale je to rovněž velmi účinný nástroj analýzy řečových signálů. Při výpočtu LPC spektra se využívá autoregresního modelování signálu. Klíčovým elementem AR modelu je lineární prediktor, který predikuje n -tý vzorek analyzovaného signálu jako lineární kombinaci vzorků předchozích. Dle počtu použitých předchozích vzorků, ze kterých je počítán aktuální, je určen řádem p lineárního prediktoru. Řád prediktoru určuje, kolik bude spektrum vykazovat špiček. Cílem analýzy je najít takové autoregresní koeficienty (váhy předchozích vzorků), aby predikovaný signál byl maximálně podobný s reálným signálem. K tomu je vytvořen chybový signál e , který vzniká jako rozdíl n -tého

vzorku skutečného a predikovaného signálu. Chybový signál je výsledkem filtrování FIR filtru s autoregresními koeficienty. Pokud bude výkon chyby predikce minimalizován, bude filtr optimální a výstupní signál bude de Korelován a bude mít podobu např. bílého šumu. Informace o signálu je plně absorbována analyzujícím filtrem v podobě jeho přenosové funkce, která je shodná se spektrální obálkou vstupního signálu. [26]

Další možností odhadu spektra je metoda ‘multitaper’, která, podobně jako Welchova metoda, rovněž využívá průměrování realizací segmentu signálu, ovšem výsledné spektrum nemusí nutně odpovídat spektrální obálce vstupního signálu. Metoda multitaper spočívá v přenásobení segmentu zvoleným počtem vlnek (vlnky), které zdůrazní vždy rozdílnou část signálu a frekvence, které jsou v této části signálu zastoupeny. Některé části signálu a jejich frekvence jsou naopak při přenásobení vlnkou zatlumeny. Ze signálu vzniká skalárním součinem rozdílných vlnek a signálu několik realizací, které mají zvýrazněnou rozdílnou část průběhu signálu dle zvoleného tvaru vlnek. Výsledný odhad spektra získáme průměrováním všech realizací, který obsahuje některé zvýrazněné frekvence oproti periodogramu či metodám poskytujícím odhad spektrální obálky. [23]



Obrázek 3.1: Spektra zobrazené explozivní odhadnutá několika metodami výpočtu spektra. Ve spektrech jsou vertikální čarou označeny hodnoty prvního spektrálního momentu.

Pro výpočet spektra byla vybrána metoda, která dosahovala nejvyšších korelačních koeficientů (viz kap. 4) spektrálních charakteristik a věku. Touto metodou se stal periodogram. Amplitudové spektrum bylo počítáno funkcí *fft* s počtem vzorků 2048. Tento výsledek byl zbaven symetrické části a umocněn dvěma, což vedlo k zisku výkonového spektra. Pro výpočet dlouhodobého spektra byl použit vyhlazený výpočet Welchovou metodou s délkou okna 512 vzorku a 50% překryvem.

3.2 Spektrální charakteristiky

Pro efektivní porovnání tvaru spekter plozivních souhlásek v diadochokinetických promluvách musí být celé frekvenční spektrum nahrazeno několika numerickými charakteristikami, které zjednodušeně popisují jeho tvar. Na základě rešerše byly vybrány čtyři spektrální momenty, tj. těžiště, rozptyl, šikmost a špičatost, a také spektrální sklon.

3.2.1 Spektrální momenty

1. Spektrální moment – spektrální těžiště

Spektrální těžiště (někdy označováno také jako spektrální průměr) je numerická charakteristika, která popisuje, kolem které frekvence jsou rovnoměrně rozloženy hodnoty spektra. Představuje tedy střed frekvenčního spektra a jeho význam je porovnatelný s váženým průměrem. První spektrální moment má jednotku frekvence. Spektrální moment je spočten dle vztahu:²⁴

$$\mu_1 = \sum_{k=1}^K f_k \cdot p_k$$

kde f_k je hodnota frekvence k -té složky a p_k je hodnota normovaného spektrum.

2. Spektrální moment – spektrální rozptyl

Spektrální rozptyl je charakteristika, která určuje, jakým způsobem jsou hodnoty spektra rozloženy kolem prvního spektrálního momentu (těžiště). Nižší hodnota spektrálního rozptylu indikuje úzké rozpětí spektra kolem svého těžiště, vysoká hodnota naopak indikuje hodnoty rozptýlené do větších vzdáleností od svého středu gravitace (viz. Obr). Vztah pro výpočet rozptylu je [24]:

$$\mu_2 = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^K (f_k - \mu_1)^2 \cdot p_k \right)}$$

3. Spektrální moment – spektrální šikmost

Spektrální šikmost je charakteristika asymetrie spektra. Šikmost určuje, na kterou stranu od těžiště je soustředěno více energie frekvenčních složek. Pokud se šikmost rovná

$\mu_3 = 0$, je spektrum symetricky rozloženo kolem svého středu – prvního momentu. Záporná hodnota šikmosti naznačuje větší energii frekvenčních složek nižších než těžiště, kladná hodnota naznačuje větší energii frekvenčních složek vyšších než těžiště. Se zvyšující se hodnotou šikmosti (bez ohledu na znaménko) roste také asymetrie spektra (viz Obr). Spektrální šikmost je vypočtena jako [24]:

$$\mu_3 = \left(\sum_{k=1}^K (f_k - \mu_1^3) \cdot p_k \right) / \mu_2^2$$

4. spektrální moment – spektrální špičatost

Spektrální špičatost je charakteristika plochosti spektra, která určuje, zdali je spektrum spíše s vysokými vrcholy, či je spíše plochého charakteru. Hodnoty špičatosti $\mu_4 = 3$ naznačují normální, Gaussovské rozložení. Hodnoty vyšší než 3 indikují spektru s výraznějšími špičkami, hodnoty nižší naopak znamenají plošší frekvenční spektrum. (viz Obr.). Vztah pro spektrální špičatost je následující [24]:

$$\mu_4 = \left(\sum_{k=1}^K (f_k - \mu_1^4) \cdot p_k \right) / \mu_2^3$$

3.2.2 Spektrální sklon

Spektrální sklon je míra rozložení amplitud spektra. Spektrální sklon je spočten pomocí lineární regrese jako směrnice regresní křivky, která je spočtena z dat ve zvoleném frekvenčním rozmezí. Záporná hodnota spektrálního sklonu poukazuje na větší zastoupení frekvencí na začátku zvoleného intervalu, a tudíž je trend regresní křivky klesající. V případě kladné hodnoty jsou více zastoupeny kmitočty, které jsou bližší k vyšší hranici počítaného rozmezí. Velikost hodnoty sklonu určuje, o jak velký rozdíl v zastoupení se mezi frekvencemi z první a druhé poloviny intervalu jedná. V Matlabu je spektrální sklon počítán funkcí *polyfit* jako směrnice regresní křivky. Vztah pro výpočet sklonu je [25]:

$$sl = \frac{\sum_{k=b_1}^{b_2} (f_k - \mu_f) \cdot (s_k - \mu_s)}{\sum_{k=b_1}^{b_2} (f_k - \mu_f)^2}$$

3.2.3 Charakteristiky dlouhodobého spektra

Spektrální momenty a sklon byly počítány z krátkodobých úseků řeči. Tyto úseky byly segmentovány z promluv /pa/-/ta/-/ka/ a představovaly časovou reprezentaci plozivní souhlásky nebo samohlásky. Další spektrální charakteristiky jsou založeny na dlouhodobém spektru – spektrum je počítáno z celé DDK promluvy. V dlouhodobém spektru jsou zpravidla dominantní struktury tvořeny samohláskami (viz obrázek 4.1), které mají vyšší energii signálu než ostatní hlásky, nicméně, celkový tvar spektra je ovlivněn také explozívou a okluzí, a proto toto spektrum nebude zcela shodné se spektrem

samohlásky. Dlouhodobé spektrum bude přesto výrazně ovlivněno základní frekvencí hlasu f_0 a také formantovými frekvencemi zejména prvních dvou formantů, typickými charakteristikami znělých úseků řeči. Formantové frekvence a základní frekvence hlasu ve spektru vytvoří významné vrcholy. [27]

Základní frekvence hlasu

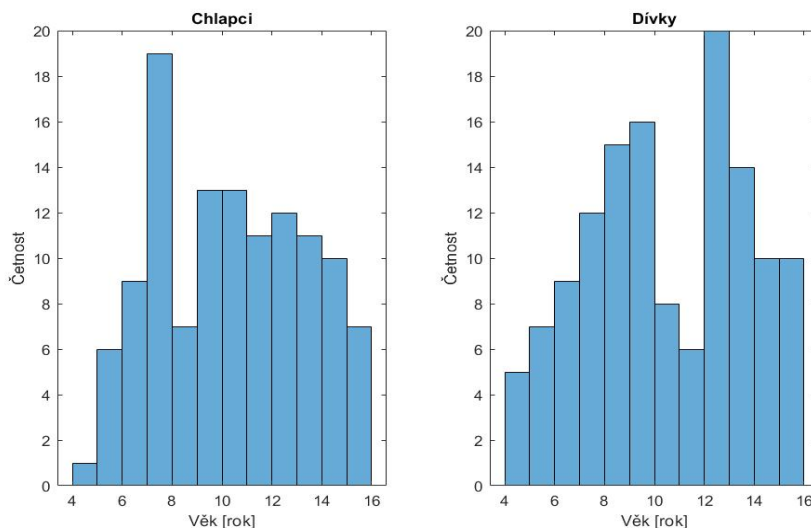
Základní frekvence je hlavní charakteristika hlasu, která udává, jakou frekvencí kmitají hlasivky. Pravidelné pulsy hlasivek z proudu vzduchu vytvoří znělý tón. Základní frekvence hlasu tedy odpovídá výšce hlasu. Hodnoty základní frekvence se pohybují mezi 100–300 Hz (100 Hz odpovídá hlubokému mužskému hlasu, 300 Hz je vysoký dětský hlas).

Formantové frekvence

Formanty byly popsány výzkumníkem řeči a slyšení Dennisem H. Klattem, který byl průkopníkem počítačové syntézy řeči. Formanty jsou frekvence rezonátorů vokálního traktu, které se objevují nejjasněji ve vyhlazeném spektru jako výrazné vrcholy. První čtyři formanty se vyskytují ve frekvenčním pásmu od cca 240 do 4000 Hz, všechny další formanty jsou ve spektru obtížně identifikovatelné. Pro účely výzkumu se často používají pouze první dva formanty, které nesou nejvíce energie. Na základě frekvencí prvních dvou formantů je sestavován tzv. formantový trojúhelník. [26]

3.3 Databáze

Databáze čítá záznamy promluv od 247 dětských probandů, z nichž bylo 118 chlapců a 129 dívek. Věk chlapců se pohyboval od 3 let a 7 měsíců do 16 let a 11 měsíců s průměrem $(10,28 \pm 3,20)$ let. Věk dívek se nachází v rozmezí od 4 let do 15 let a 9 měsíců. Průměrný věk dívek činí $(10,46 \pm 3,14)$ let. Věkový průměr celé skupiny je $(10,37 \pm 3,16)$ let. Žádné z dětí nebylo diagnostikováno s jakoukoliv řečovou poruchou. Nahrávání probíhalo ve stereo módu se vzorkovací frekvencí 44100 Hz.



Obrázek 3.1: Histogramy zobrazující zastoupení věků chlapců (vlevo) a dívek (vpravo) v databázi

3.4 Popis algoritmu výpočtu spektrálních charakteristik krátkodobého spektra

Nahrávky promluv z uvedené databáze jsou zpracovány několika vytvořenými algoritmy, které mají za úkol realizovat celý proces spektrální analýzy orálních DDK úloh. Cílem série algoritmů je extrahovat ze všech nahrávek jejich spektrální charakteristiky, které jsou následně vloženy do matic a uloženy do složky pro zpracování dalšími algoritmy. Další zpracování zahrnuje statistickou analýzu dat či úlohu rozpoznávání věku. Všechny algoritmy jsou realizovány v prostředí MATLAB v podobě .m souborů.

Hlavní zpracování nahrávek je zpracováno .m souborem *DP*. Jádro programu tvoří for cyklus, který zprostředkovává dávkové zpracování signálu z databáze. Po spuštění programu je uživatel veden přes grafické rozhraní k výběru dvou složek – první z nich je složka s nahrávkami a druhá složka obsahuje protokoly s časovými známkami k segmentaci. Po zvolení složek jsou nahrávky nahrány do datové struktury *struct*, ze které je následně určen i počet iterací for cyklu pro dávkové, postupné zpracování každé nahrávky samostatně. Souběžně se nahrávkami a časovými protokoly jsou načteny i data o databázi, tj. složka s identifikačním číslem, věkem a pohlavím probanda, který je autorem dané nahrávky.

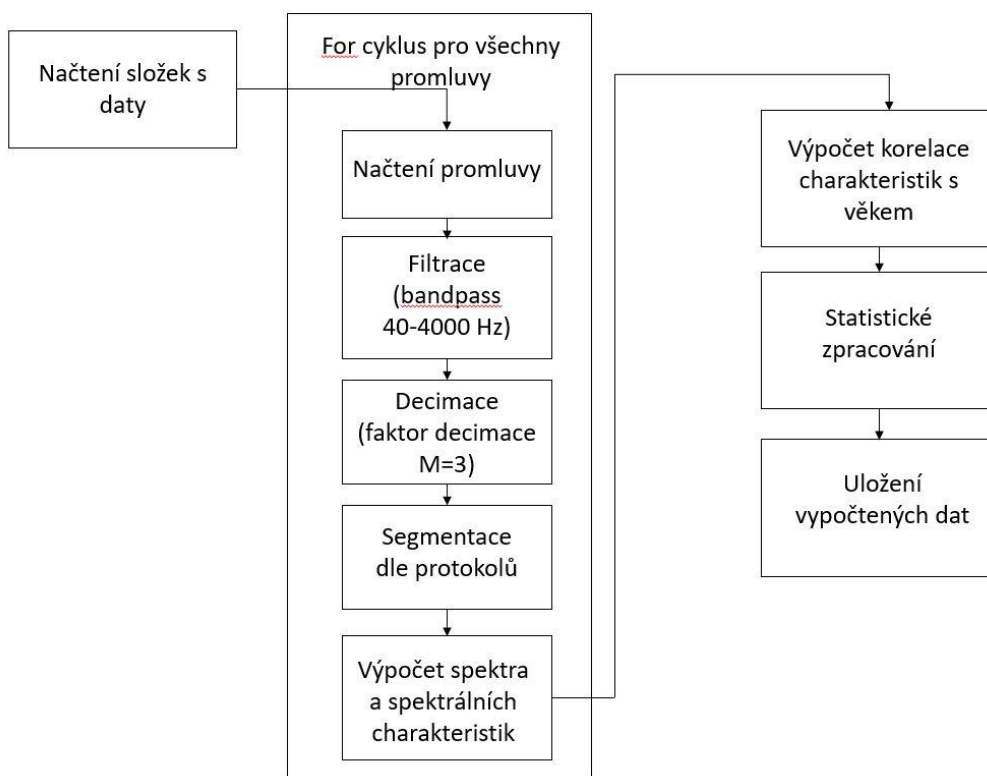
Po načtení jednotlivé nahrávky v rámci dávkového zpracování prochází nahrávka předzpracováním. Prvním krokem je filtrace pásmovou propustí s mezními kmitočty 40 a 4000 Hz pro odstranění šumu a nežádoucích vlivů. Filtr je vytvořen Butterworthovou aproximací a je 5. řádu. Po filtraci následuje blok decimace. Signál je oproti původním nahrávkám decimován, aby se zvýšilo frekvenční rozlišení při spektrální analýze. Decimační faktor je zvolen s hodnotou 3. Po snížení vzorků signálu následuje již segmentace signálu dle vytvořených časových známek. Signál je rozdělen na realizace plozivních souhlásek /p/-/t/-/k/ a samohlásky /a/ dle DDK promluvy /pa/-/ta/-/ka/. Každému segmentu je odhadnuto frekvenční spektrum formou periodogramu (volba odhadu spektra popsána v samostatné kapitole). Ze spektra jsou následně vypočteny jeho charakteristiky – čtyři spektrální momenty a jeho sklon. Napočítané charakteristiky jsou uloženy do odpovídající matice. Po zisku spektrálních charakteristik všech segmentů jsou hodnoty z matice zprůměrovány tak, aby každá promluva jednoho řečníka generovala pouze pět zmíněných hodnot popisující tvar spektra. Vektor spektrálních charakteristik jednotlivých nahrávek je uložen v poli buněk.

Po zpracování všech nahrávek jsou spektrální momenty a sklon testovány z hlediska jejich korelace s věkem. Hodnota korelačního koeficientu naznačuje, jak moc se mění daná spektrální charakteristika s měnícím se věkem dětí, jejichž nahrávky tvoří databázi.

Vysoké hodnoty korelace indikují podobný vývoj obou zkoumaných výběrů a jsou žádoucí pro následující úlohu rozpoznávání věku. Pro testování korelace je databáze rozdělena, z důvodů rozdílného vývoje hlasového traktu v dospívání, dle pohlaví. Korelační koeficienty jsou určeny pro chlapce a dívky zvlášť.

3.5 Popis algoritmu výpočtu spektrálních charakteristik dlouhodobého spektra

Na velmi podobném principu je založen také algoritmus pro výpočet spektrálních charakteristik dlouhodobého spektra. Jádro algoritmu je tvořeno stejným for cyklem, který slouží k dávkovému zpracování dat. Načítání nahrávek a protokolů, a také předzpracování signálu probíhá shodným způsobem, tedy nejprve filtrací pásmovou propustí a následnou decimací s faktorem 3. Signál je segmentován na základě časových protokolů a z celé nahrávky je vybrána pouze část signálu obsahující první tři sekvence DDK slabik /pa/-/ta/-/ka/. Z tohoto signálu je odhadnuto spektrum. Z důvodů hledání formantových frekvencí samohlásky je spektrum počítáno Welchovou metodou, která poskytuje vyhlazené spektrum. Ze spektra jsou získány hodnoty prvních tří vrcholů, konkrétně na jaké frekvenci (tedy x-ová osa) vrchol leží. Hodnoty frekvencí jsou uloženy do příslušných matic, kde jsou přiřazeny k autorovi promluvy a jeho věku. Tyto hodnoty jsou také rozděleny dle pohlaví dětí a podrobeny testu korelace s věkem.



Obrázek 3.2: Obecné schéma postupu algoritmů pro výpočet spektrálních charakteristik

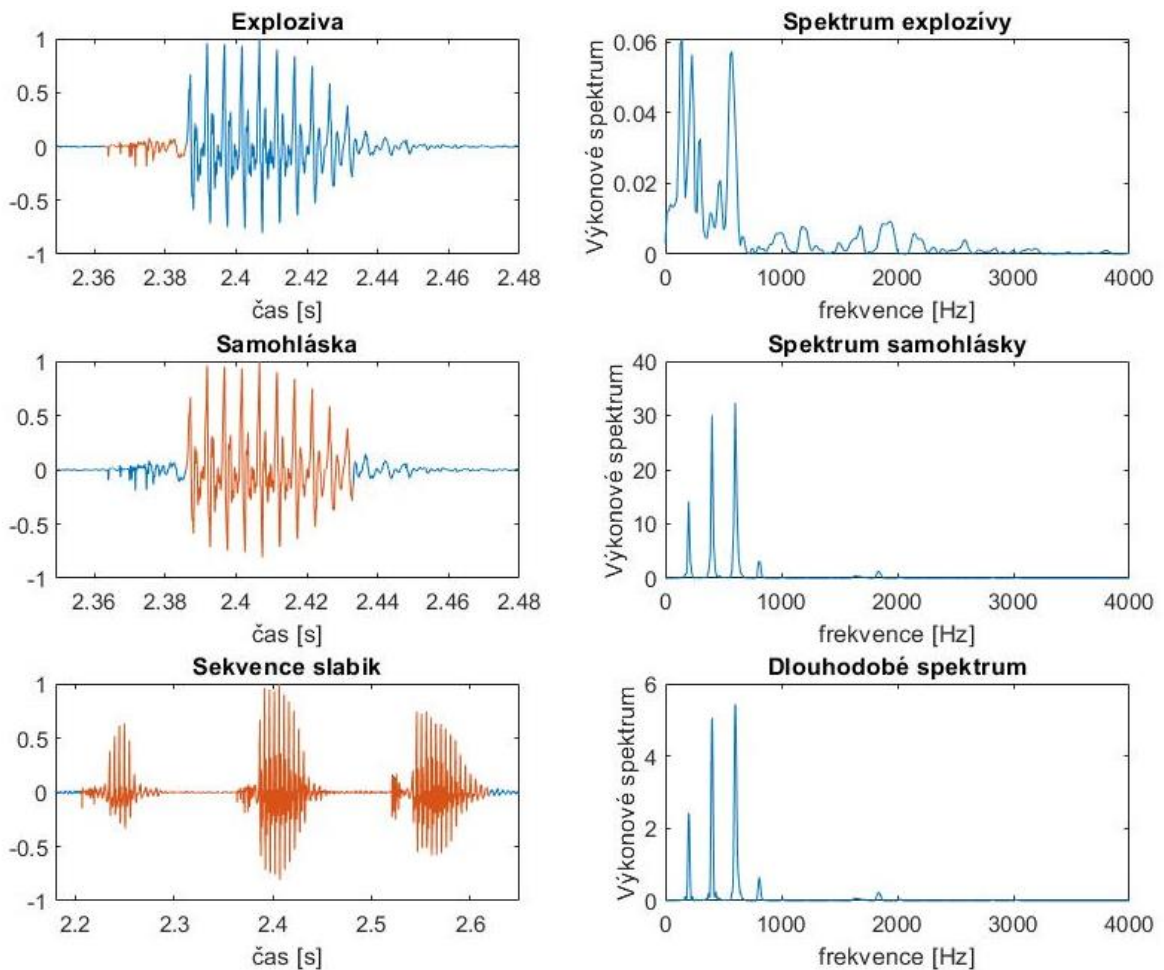
3.6 Úloha rozpoznávání věku

Na základě spektrální analýzy bude proveden experiment rozpoznávání věku, který otestuje možnost určit věk jedince podle vektoru hodnot vybraných spektrálních charakteristik. Stanoveným cílem práce je provést určení věku klasifikační úlohou. Z důvodů vysokého rozptylu v datech, který se často vyskytuje při zkoumání živých organismů, není ale stanovení věku z dat klasifikační úlohou vhodné řešení. Po domluvě s vedoucím práce byl pro úlohu určení věku dítěte použit regresní přístup. Podle vybraných dat tedy byl navržen model se spojitým vstupem a spojitým výstupem, který z dat stanoví věk dítěte. Rozdíl klasifikačních a regresních úloh spočívá právě ve výstupu daných modelů. Klasifikační pohled na data přináší výstup v podobě přiřazení zkoumaného jedince (tj. vektoru observací) do jedné z možných skupin na základě hodnot observací. Regresní úloha oproti tomu přináší nominální výstup v podobě čísla ze spojitého oboru čísel, které v aplikaci pro tento výzkum představuje právě věk jedince. Regresní modely jsou navrženy v integrované matlabovské aplikaci *RegressionLearner*, který umožňuje natrénování modelů z několika vybraných rodin modelů. Volba vhodného modelu poté může být založena na kritériu, v *RegressionLearner* je hodnotícím kritériem RMSE (root mean square error). Toto kritérium udává odmocninu z průměrné odchylky odhadnuté hodnoty věku od reálné hodnoty. Nejvěrnější model je právě takový, který má hodnotu RMSE minimální.

4 Výsledky

Na základě přehledu současného stavu (kapitola 2) bylo zjištěno, že spektrální oblast je z hlediska diadochokinetických úloh málo prozkoumanou oblastí. Pohled na signály získané při orálních diadochokinetických úloh z hlediska spektra může přinést nové poznatky do diagnostiky dětských řečových poruch. Vybrané spektrální charakteristiky, které byly použity ke zkoumání DDK úloh, lze rozdělit do dvou skupin na základě délky signálu, ze kterého bude spektrum odhadováno. Krátkodobé spektrum je počítáno ze segmentů signálu, které představují plovívu či samohlásku (viz obrázek 4.1). Dlouhodobé spektrum je odhadováno z několika realizací sekvence /pa/-/ta/-/ka/. Na základě rešerše bylo zjištěno, že často používanou metodou analýzy ve spektrální doméně je charakterizace spektra pomocí jeho momentů. Analýza spektrálních momentů, které popisují tvar spektra, má potenciál být efektivní metodou poskytující data pro určení věku promluvy u dětí od útlého věku až do dospívání. Používanou statistikou spektrální analýzy jsou také spektrální sklony. Vhodnými akustickými parametry pro výzkum diadochokinetických promluv z hlediska krátkodobého spektra byly tedy zvoleny čtyři spektrální momenty a spektrální sklon. Jako charakteristiky reprezentující dlouhodobé

spektrum byly zvoleny indexy prvních tří vrcholů spektra, které by měly odpovídat základní frekvenci a formantovým frekvencím prvního a druhého formantu.



Obrázek 4.1: Zobrazení spekter segmentovaných části signálu. Jedná se o výkonová spektra v decibelech počítaná z periodogramů.

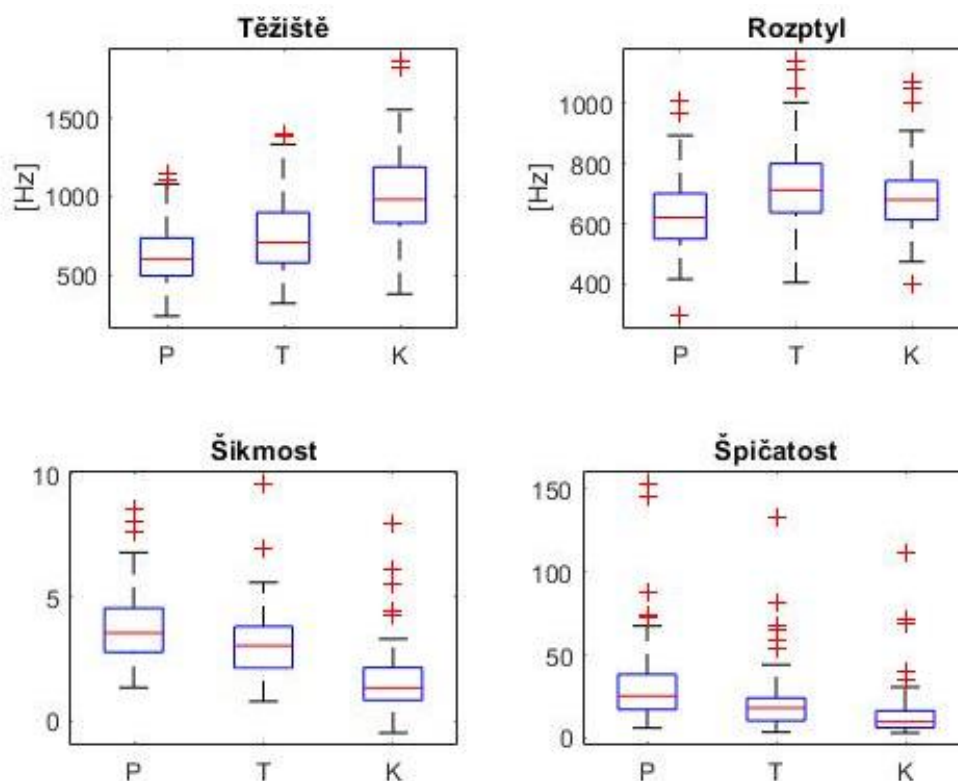
4.1 Spektrální momenty

Spektrální analýza spočívala zejména v charakteristice spekter plozív a samohlásky /a/ v DDK promluvhách. Výsledky analýzy ukazují (Obr 4.2), že spektrální těžiště (první moment) se liší pro tři různé plozivy /p/, /t/, /k/. U chlapců s má souhláska /p/ nejniže položený první spektrální moment, který je roven $(632,7 \pm 176,9)$ Hz. Těžiště spektra souhlásky /t/ je položeno výše na $(751,4 \pm 225,9)$ Hz a nejvýše je těžiště souhlásky /k/ - $(1004,3 \pm 243,6)$ Hz. Stejný trend je pozorován i u dívčích výsledků (Obr. 4.2). První moment /p/ je roven $(672,6 \pm 168,8)$ Hz, nad ním je položen první moment /t/ s $(766,4 \pm 206,3)$ Hz a nejvyšší těžiště má opět souhláska /k/ s $(1099,0 \pm 245,8)$ Hz u dívek. U prvních spektrálních momentů plozív není pozorován významný vliv pohlaví dítěte.

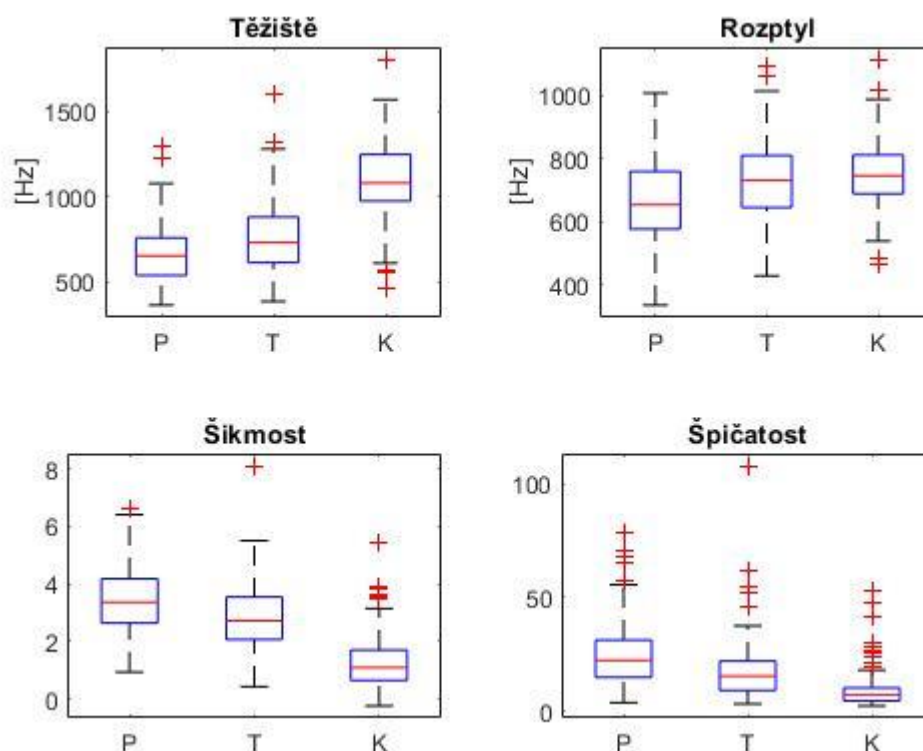
Podobný trend již nenalzáme pro druhý spektrální moment – spektrální rozptyl, který může popisovat kvalitu artikulace. Při nejasné artikulaci dochází k zastoupení více frekvenčních složek a spektrální rozptyl bude vykazovat vyšší hodnotu. Rozptyl se

pohybuje všech tří neznělých plozív /p/, /t/, /k/ mezi hodnotami 628,4 – 720,4 u chlapců a 672,6 – 754,6 u dívek.

Spektrální šikmost je u chlapců i dívek nejvyšší pro /p/ s hodnotou ($3,45 \pm 1,16$) pro dívky a ($3,81 \pm 1,41$) pro chlapce. Následuje souhláska /t/, která má šikmost ($2,93 \pm 1,10$), resp. ($3,04 \pm 1,27$) a nejmenší šikmost vykazuje /k/, která vykazuje šikmost ($1,29 \pm 0,94$) pro dívky a ($1,58 \pm 1,22$) pro chlapce. Spektrální špičatost vykazuje stejný sestupný trend hodnoty momentů pro souhlásky jako šikmost. Nejvíce špičaté spektrum nalezneme pro souhlásku /p/, které činí ($25,16 \pm 14,55$) a ($31,11 \pm 22,35$) pro dívky a pro chlapce. Pro další dvě souhlásky /t/ a /k/ se špičatost snižuje, špičatost spektra /t/ činí ($18,38 \pm 13,40$) u dívek a ($20,40 \pm 16,67$) u chlapců. Spektrum souhlásky /k/ je tedy nejméně šikmé i špičaté, špičatost se pohybuje v ($13,08 \pm 13,54$) pro chlapecké nahrávky a ($9,56 \pm 7,96$) pro nahrávky dívčí. Třetí a čtvrtý spektrální momenty podobně jako spektrální těžiště není významně ovlivněno pohlavím dítěte, charakteristiky vykazují podobné hodnoty pro obě pohlaví. Z důvodů velké variability živých probandů data rozložení hodnot momentů často obsahují odlehlé hodnoty, zejména třetí a čtvrtý moment (viz spodní řádek grafů, Obr 4.2 a 4.3).



Obrázek 4.2: Rozložení dat spektrálních čtyř momentů plozivních souhlásek /p/, /t/ a /k/ v DDK úlohách u chlapců.



Obrázek 4.3: Rozložení dat spektrálních čtyř momentů plozivních souhlásek /p/, /t/ a /k/ v DDK úlohách u dívek

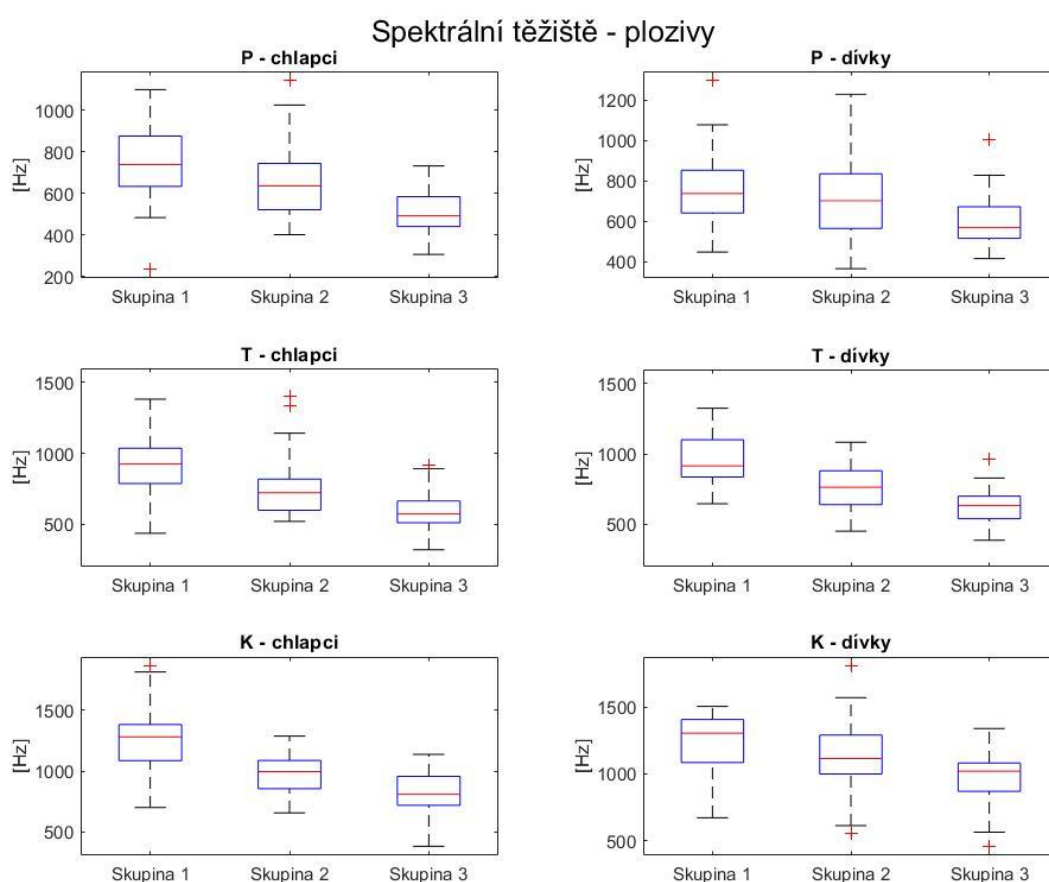
4.2 Porovnání charakteristik dle věkových skupin

Cílem práce je zkoumat věkovou závislost spektrálních charakteristik. Databáze nahrávek byla rozdělena do tří věkových skupin. Hranice skupiny tvořené nejmladšími účastníky je 8 let. Druhá skupina byla tvořena probandy od 8 do 12 let. V tomto přechodném období před pubertálním věkem lze začít pozorovat změny v spektrálních charakteristikách částečně způsobené zdokonalováním artikulačních schopností. Poslední skupina skýtá nahrávky účastníků nad 12 let. V tomto věkovém rozmezí se již plně projevují fyziologické změny hlasu způsobené dospíváním, zejména růstem hrtanu. U chlapců probíhá mutace, což vede k výrazné změně základní frekvence, a tedy výšce hlasu.

4.2.1 Plozivy

Vývoj spektrálních charakteristik s rostoucím věkem je zobrazen na obr. 4.4. První spektrální moment hlásky /p/ u chlapců klesá s každou věkovou skupinou. Pro děti do 8 let těžiště klesne z průměrné hodnoty $(745,5 \pm 188,8)$ Hz, přes $(646,8 \pm 157,9)$ Hz u druhé věkové skupiny, na hodnotu $(516,0 \pm 99,1)$ Hz pro nejstarší děti. Podobný trend vykazují i první momenty zbývajících plozivních souhlásek (/t/ a /k/). Spektrální rozptyl se také zmenšuje s rostoucím věkem u všech exploziv, což pravděpodobně indikuje zlepšení artikulačních schopností. Třetí a čtvrtý spektrální moment naopak korelují s věkem pozitivně.

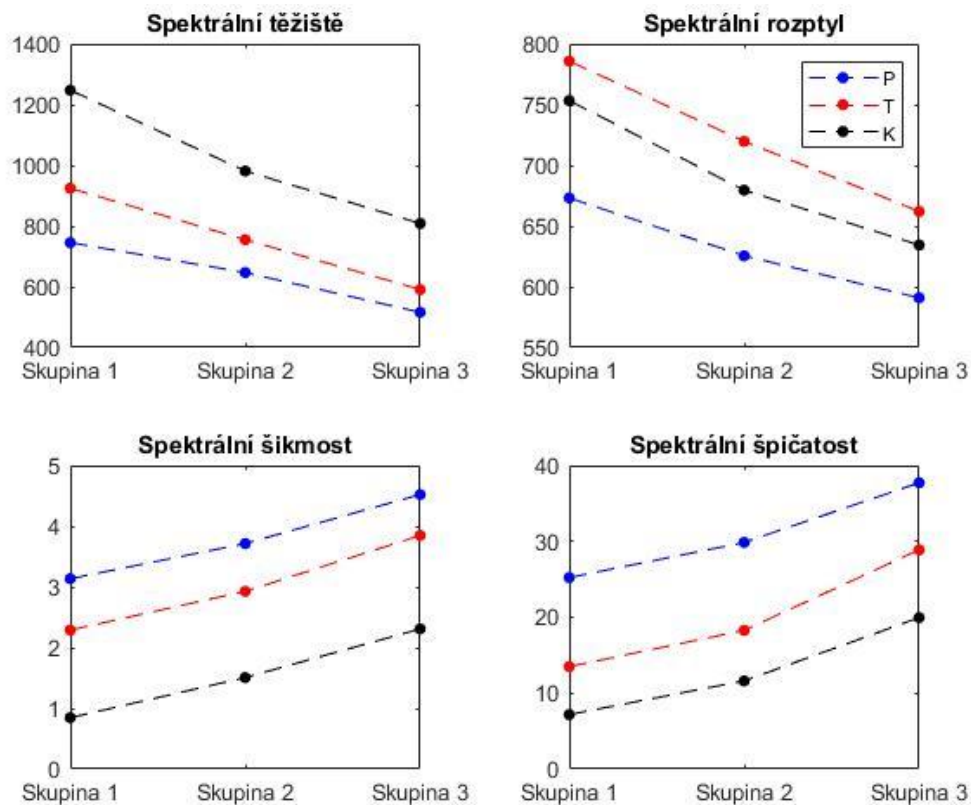
Průměrná hodnota spektrálního těžiště klesá s rostoucím věkem také u dívek v případě všech plozivních souhlásek. Průměrné hodnoty těžiště pro souhlásku /p/ se snížily v jednotlivých věkových skupinách z $(751,7 \pm 175,3)$ Hz u první skupiny na $(600,0 \pm 121,0)$ Hz u skupiny nejstarších dětí. Pro souhlásku /t/ došlo ke snížení z $(960,6 \pm 170,2)$ Hz u první skupiny, přes $(788,1 \pm 197,0)$ Hz u druhé skupiny na $(629,7 \pm 112,2)$ Hz u nejstarší skupiny. Souhláska /k/ vykazuje shodný sestupný trend, s rostoucím věkem klesla průměrná hodnota spektrálního těžiště z $(1236,1 \pm 224,0)$ Hz a $(1141,2 \pm 257,7)$ Hz pro první dvě nižší věkové skupiny, na $(979,7 \pm 190,4)$ Hz pro skupinu třetí. Rozložení napříč věkovými skupinami jsou poměrně homoskedastické, rozptyly rozložení jsou podobné. Některé věkové skupiny ovšem vykazují výrazně vyšší rozptyl dat (např. druhá věková skupina u hlásky /p/).



Obrázek 4.4: Rozložení hodnot spektrálního těžiště souhlásek /p/, /t/ a /k/ ve třech věkových skupinách (řazeno od nejmladší po nejstarší). V grafech v levém sloupci jsou data chlapců, v pravém sloupci dívek.

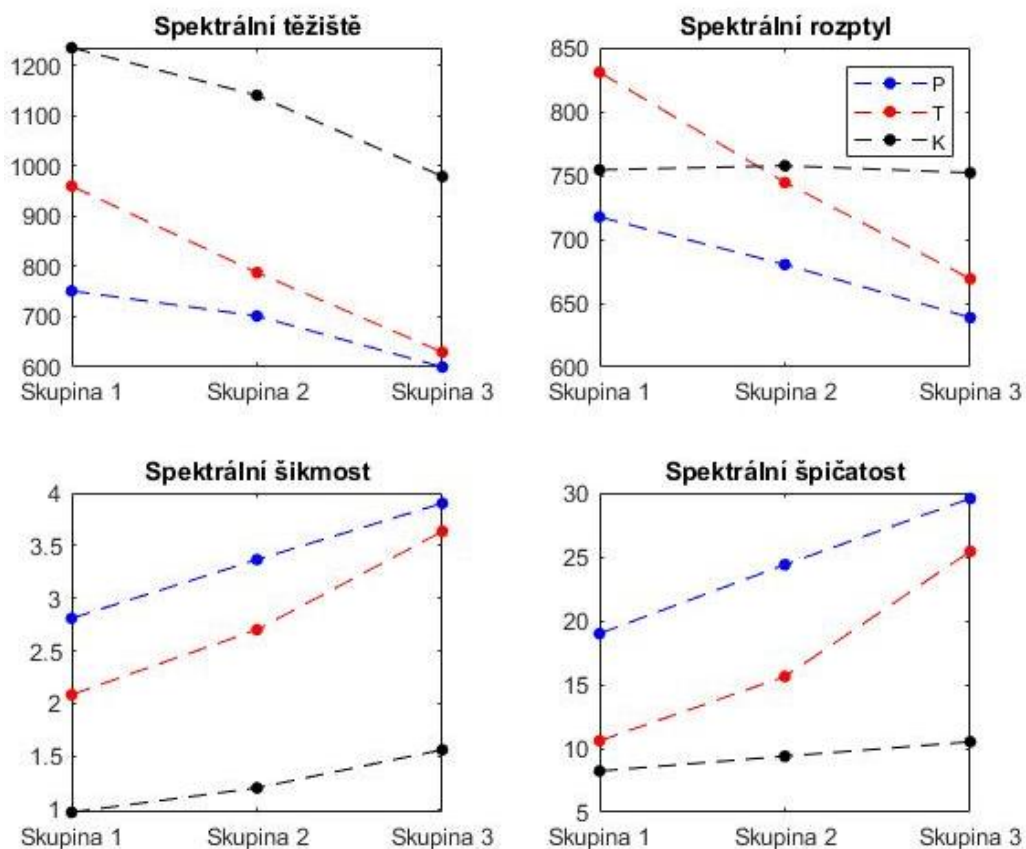
Na obrázku 4.5 můžeme pozorovat vývoj průměrných hodnot všech čtyř spektrálních momentů pro tři věkové skupiny od nejmladších k nejstarším pro chlapecké nahrávky. U všech momentů vidíme zřejmou věkovou závislost průměrné hodnoty. Spektrální těžiště a rozptyl s rostoucím věkem klesají, což může být důsledek zvětšování se hlasového

traktu a snižování výšky hlasu. Rozptyl může klesat v důsledku zdokonalování výslovnosti a artikulace v s rostoucím věkem. Třetí a čtvrtý spektrální moment – šikmost a špičatost – korelují se zvyšujícím se věkem naopak pozitivně. Graf naznačuje šikmější a špičatější spektrum pro vyšší věk. S rostoucím věkem dochází k změně tvaru spektra směrem k více definovanému a konkrétnějšímu spektru.



Obrázek 4.5: Průměrné hodnoty spektrálních momentů souhlásek /p/ (modře), /t/ (červeně) a /k/ (černě) tří věkových, chlapeckých skupin.

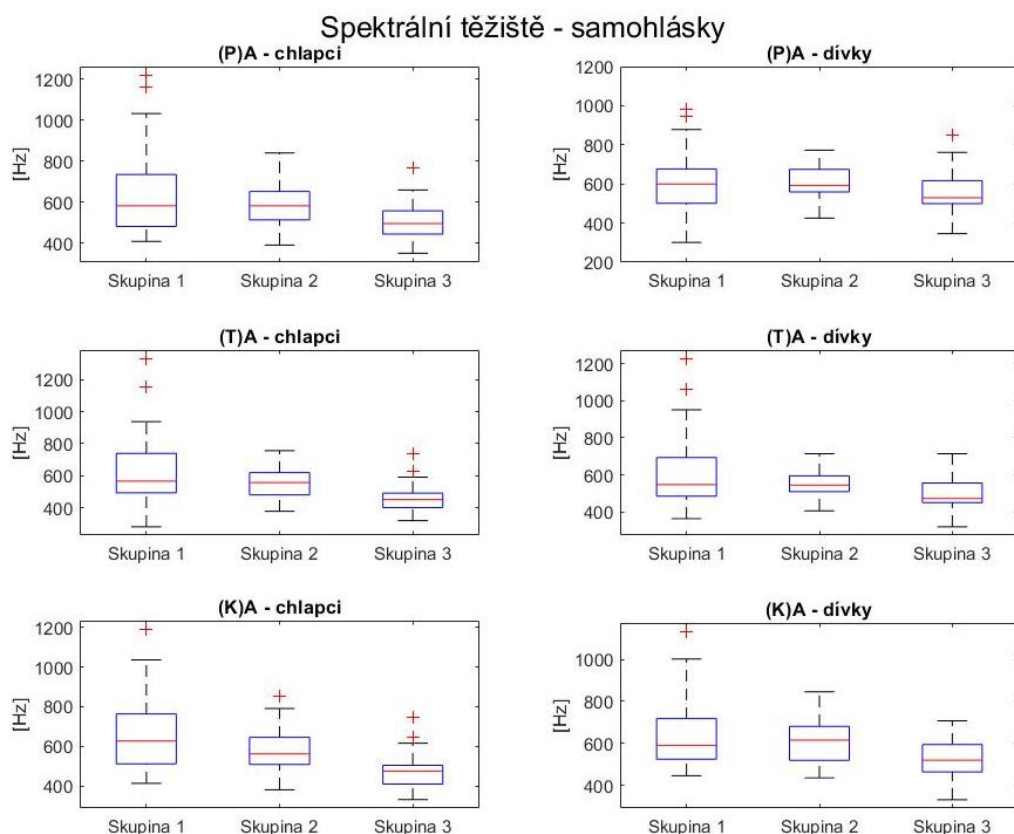
Průměrné hodnoty spektrálních momentů dívek jsou zobrazeny na obrázku 4.6. Při porovnání se zobrazenými výsledky u chlapců, nejsou některé závislosti natolik výrazné, pro některé momenty a souhlásky je závislost neprokázaná (viz tabulka 4.2). Spektrální rozptyl pro souhlásky /p/ a /k/ (pravý horní graf obrázku 4.6) nevykazují jednotný trend s rostoucím věkem dle rozdělení na věkové skupiny. Hláška /k/ nemá jednotný trend i pro spektrální špičatost (pravý dolní graf obrázku 4.6). Shodnou tendenci s chlapeckou skupinou mají první a třetí spektrální moment, který má klesající, resp. stoupající, směr. U spektrální špičatosti jsou trendy s chlapci shodné pro hlásky /p/ a /t/.



Obrázek 4.6: Průměrné hodnoty spektrálních momentů souhlásek /p/ (modře), /t/ (červeně) a /k/ (černě) tří věkových, dívčích skupin.

4.2.2 Samohlásky

Na obrázku 4.7 jsou zobrazeny rozložení spektrálních těžišť samohlásky /a/ ve třech věkových skupinách. Z obrázku je patrné postupné snižování střední hodnoty rozložení u samohlásek všech tří slabik orálních DDK úloh. Zároveň si lze všimnout, že se průměrné hodnoty spektrálního těžiště pohybují ve všech skupinách kolem stejných hodnot. První skupina vykazuje střední hodnotu těžiště na $(630,4 \pm 199,9)$, resp. $(628,8 \pm 214,2)$ a $(656,8 \pm 176,1)$ Hz pro /a/ ve slabikách /pa/-/ta/-/ka/. Ve druhé věkové skupině se průměrná hodnota prvního spektrálního momentu pohybuje v rozmezí $(585,7 \pm 101,4)$, resp. $(558,45 \pm 99,3)$ a $(579,2 \pm 105,7)$ Hz, opět pro samohlásky ve zmíněných slabikách. Skupina nejstarších dětí má opět podobné hodnoty momentů, /a/ ve slabice /pa/ má těžiště na $(502,8 \pm 87,1)$ Hz, ve slabice /ta/ $(455,0 \pm 83,3)$ Hz a ve slabice /ka/ $(471,6 \pm 85,7)$ Hz. Tyto data ukazují, že spektrum samohlásky není závislé na hlásce vyslovované před ní. U rozložení dat můžeme pozorovat také menší rozptyl hodnot, než jak tomu bylo u plovíz. Nejvyšší rozptyl vykazuje první věková skupina a rozptyl se snižuje s každou další věkovou skupinou. Tento jev může být způsoben zdokonalováním artikulace v dospívání.

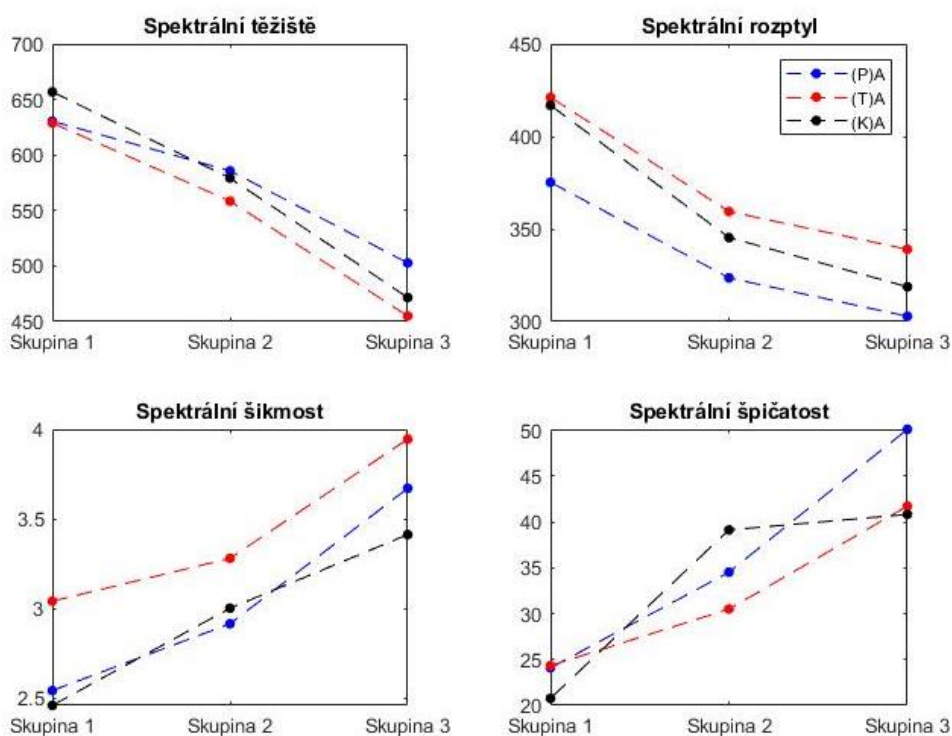


Obrázek 4.7: Rozložení hodnot spektrálního těžiště samohlásky /a/ v kontextu různých slabik. V levém sloupci jsou zobrazeny výsledky chlapců, v pravém sloupci dívek. Věkové skupiny jsou řazeny od nejmladších po nejstarší.

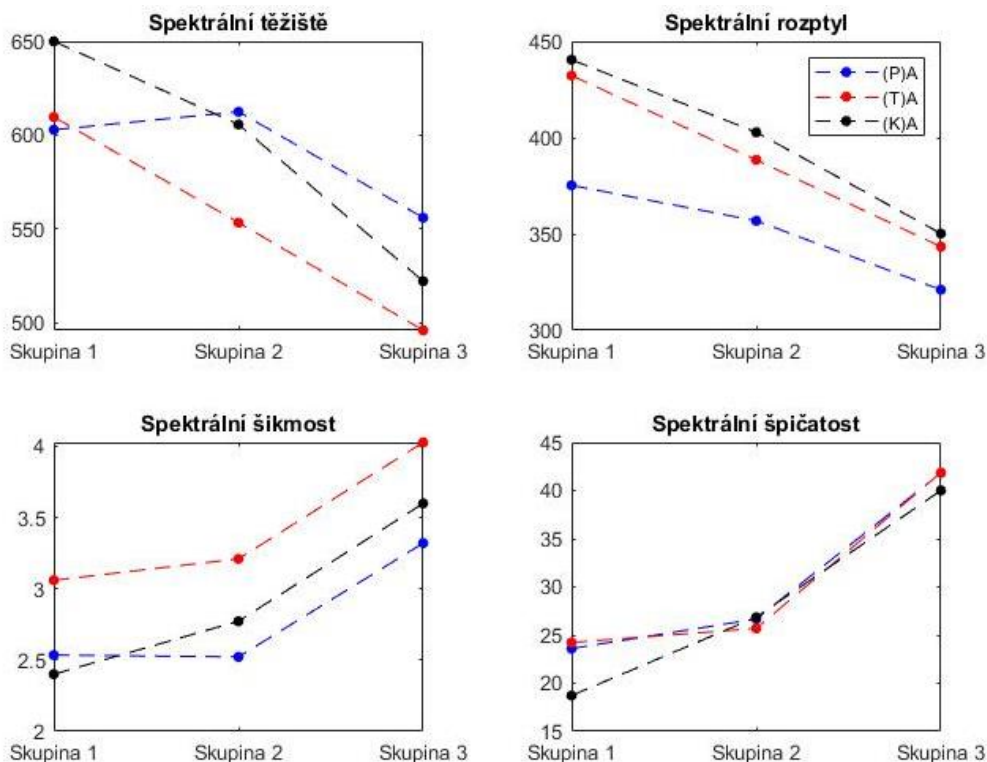
U dívek podobné trendy jako u chlapců nejsou tolik zřejmé. U samohlásky /a/ ve slabice /pa/ se dokonce objevuje nejednotný trend, kdy průměrná hodnota nejprve roste a klesá až u nejstarší věkové skupiny. Ve slabice /ka/ je trend mezi první a druhou skupinou velmi mírný. Toto může být způsobeno pomalejší změnou hlasu v pubertě, než je tomu u chlapců. Průměrné hodnoty pro samohlásku /a/ jsou opět podobné pro samohlásky v realizaci různých slabik ve stejných věkových skupinách. Výrazně rozdílné těžiště se objevuje pouze ve druhé věkové skupině. V první věkové skupině mají těžiště hodnotu $(602,8 \pm 165,0)$, resp. $(609,6 \pm 190,4)$ a $(650,0 \pm 170,0)$ Hz. Ve druhé skupině se těžiště ustaluje na $(612,4 \pm 76,8)$ Hz pro slabiku /pa/, $(553,4 \pm 78,3)$ Hz pro slabiku /ta/ a na $(605,7 \pm 104,2)$ Hz ve slabice /ka/. V nejstarší věkové skupině jsou pro slabiky /pa/-/ta/-/ka/ hodnoty těžiště $(556,0 \pm 96,7)$, resp. $(496,0 \pm 87,5)$ a $(522,2 \pm 92,9)$ Hz. U dívek nedochází ke kontinuálnímu snižování rozptylu dat v průběhu věku, ale nejvyšší rozptyl, shodně jako u chlapců, vykazuje věková skupina nejmladších dívek.

Průměrné hodnoty spektrálních momentů, které byly extrahovány ze spekter samohlásky /a/ v DDK úlohách, jsou zobrazeny na obrázcích 4.8 a 4.9. Spektrum samohlásek je výrazně ovlivněno základní frekvencí a také frekvencemi formantů, které tvoří nejvýznamněji zastoupené složky spektra. Oproti průměrům momentů exploziv jsou

zde některé trendy rozdílné a častěji zde nacházíme nejednotný vývoj průměrných hodnot charakteristik v průběhu tří věkových skupin. U chlapců (viz obr 4.8) je zde, zejména pro první dva spektrální momenty, patrný vliv mutace, v jejímž důsledku dochází ke snížení základní frekvence, která budí hlasový trakt ve znělých úsecích řeči (zejména samohlásky). Lze pozorovat patrnou změnu trendu mezi první a druhou a poté druhou a třetí věkovou skupinou. V rámci mutace je dynamika fyziologických změn hlasu prudší než při stálém vývoji, který můžeme pozorovat u dívek (Obr. 4.9). U dívek častěji pozorujeme nejednotný trend napříč věkovými skupinami, objevuje se to u samohlásky /a/ ve slabice /pa/ v prvním a třetím spektrálním momentu.



Obrázek 4.8: Průměrné hodnoty čtyř spektrálních momentů samohlásek tří věkových skupin chlapců. Samohlásky /a/ v kontextu slabiky /pa/ je značena modře, ve slabice /ta/ červeně a v /ka/ černě.



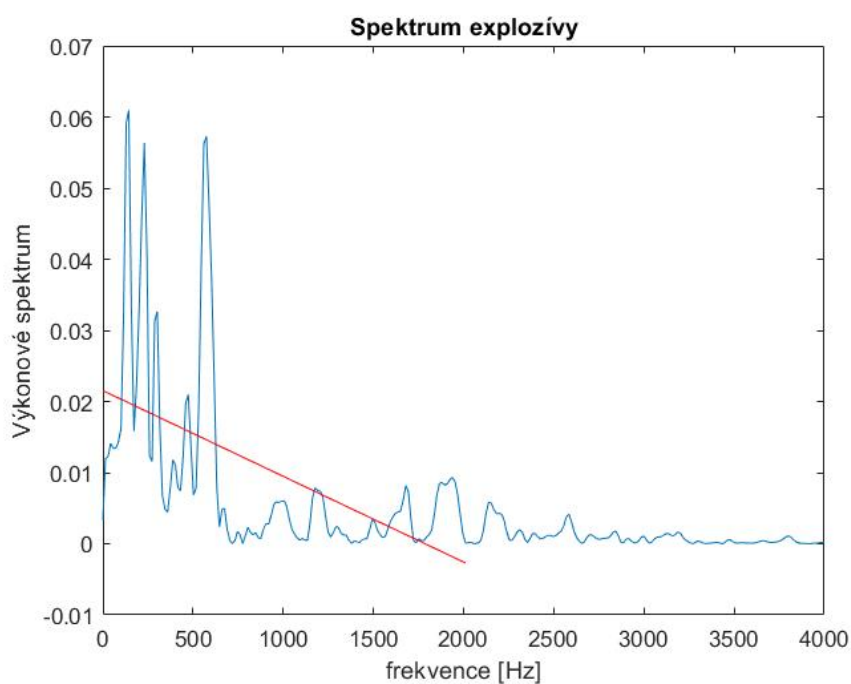
Obrázek 4.9: Průměrné hodnoty čtyř spektrálních momentů samohlásek tří věkových skupin dívek. Samohlásek /a/ v kontextu slabiky /pa/ je značena modře, ve slabice /ta/ červeně a v /ka/ černě.

4.2.3 Spektrální sklon

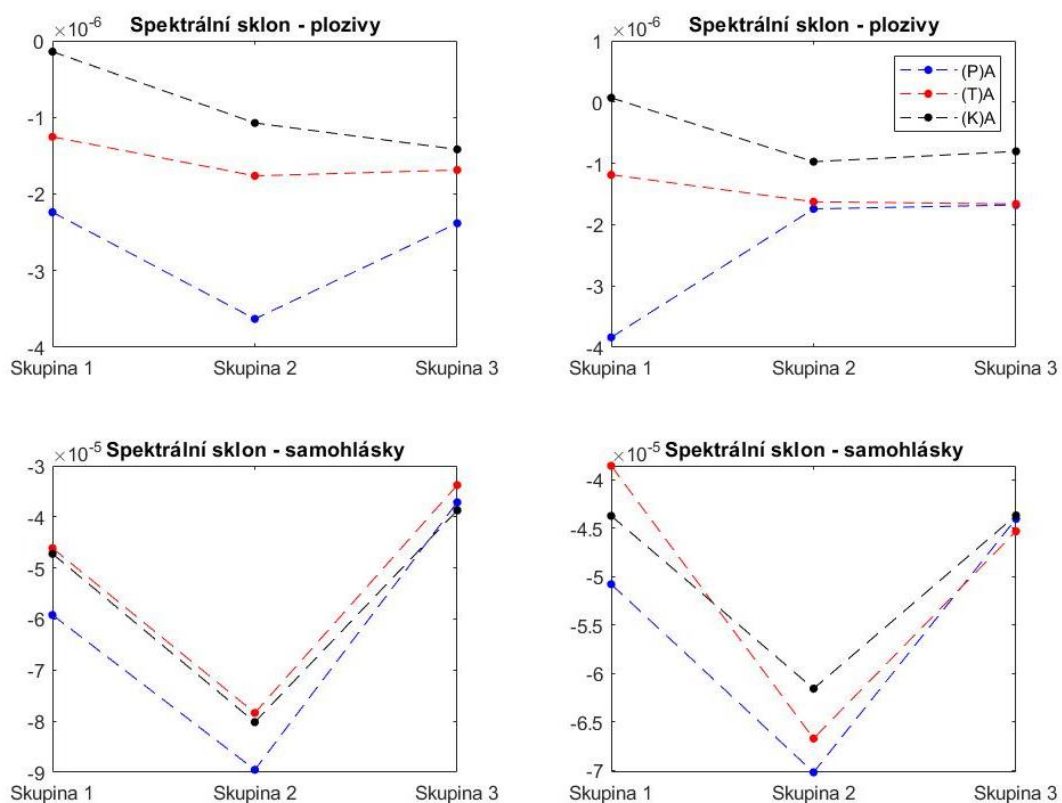
Další zkoumanou charakteristikou byl spektrální sklon. Spektrální sklon výkonového spektra byl počítán v rozmezí 0-2000 Hz (viz obrázek 4.10). Na obrázku 4.11 jsou zobrazeny střední hodnoty spektrálních sklonů ve třech věkových skupinách chlapců a dívek. Obrázek naznačuje velmi nejasnou závislost této charakteristiky na věku. Data nemají jasný trend napříč věkovými skupinami a hláskami. U spektrálních sklonů získaných ze spektra samohlásky /a/ a také u souhlásky /p/ je měnící se trend mezi první a druhou a druhou a třetí věkovou skupinou. Spektrální sklony dívek indikují podobnou nejednoznačnou závislost charakteristiky na věku. U samohlásek pozorujeme stejnou změnu trendu mezi věkovými skupinami jako u chlapců. Sklony plozivních souhlásek /t/ a /k/ mají spíše klesající závislost na věku, ovšem s velmi nízkou směrnici, souhláska /p/ má, stejně jako chlapců, výrazně odlišný trend mezi skupinami.

Tato pozorování podporují i výsledky p-hodnot z testování shody náhodných veličin (tabulka 4.1 a 4.2) a hodnoty korelačních koeficientů (obrázky 4.6 a 4.7). V tabulce 4.1 zobrazené p-hodnoty podávají silný důkaz pro zamítnutí nulové hypotézy na hladině významnosti $\alpha=0,05$ u spektrálních sklonů samohlásek a souhlásky /k/. Samohlásky jsou ale nekonzistentní ve svém trendu, což naznačují hodnoty korelačních koeficientů v tabulce 4.5 a 4.6. Závislost na věku tak vykazuje pouze souhláska /k/. V tabulkách 4.2

a 4.6 jsou kvantifikovány závislosti spektrálních sklonů dívek. Tabulky 4.1 a 4.2 s p-hodnotami ukazuje, že nulovou hypotézu na hladině významnosti $\alpha=0,05$ nelze zamítnout v žádném uvedeném případě. Ve shodě s tímto výsledkem jsou i výsledky testu korelace, které naznačují pouze malé míry korelace spektrálních sklonů. Koeficienty mají také nejasnou směrnicí, pro chlapecká i dívčí data se často objevují koeficienty indikující pozitivní a negativní korelaci i v rámci jedné skupiny hlásek, tj. samohlásek či plozivních souhlásek. Tyto výsledky ukazují, že spektrální sklony, s výjimkou chlapecké souhlásky /k/, nejsou významně závislé na věku, a proto nejsou zařazeny do prediktorů pro úlohu rozpoznávání věku na základě spektrálních charakteristik získaných z DDK promluv.



Obrázek 4.10: Spektrální sklon (červená linie) ve spektru explozivny ve frekvenčním rozsahu 0-2000 Hz



Obrázek 4.11: Vývoj středních hodnot spektrálního sklonu ve třech věkových skupinách. V horní řadě jsou zobrazeny data pro plozivní souhlásky, v dolní řadě pro samohlásky. V levém sloupci jsou zobrazeny data chlapců, v pravém dívěk.

4.2.4 Testování středních hodnot spektrálních charakteristik

V tabulkách 4.1 a 4.2 jsou zobrazeny výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) v podobě *p-hodnot*. V rámci anovy byla zkoumána hypotéza, zdali jsou střední hodnoty momentů shodné pro tři věkové skupiny. V tabulce, která popisuje chlapecká data, lze pozorovat, že na hladině významnosti $\alpha=0,05$ je zamítnutá nulová hypotéza pro všechny charakteristiky. Tento fakt indikuje rozdílné střední hodnoty všech spektrálních momentů plozív a samohlásky /a/ pro různé věkové skupiny. Všechny charakteristiky se tedy v průběhu věku mění vždy alespoň v jedné skupině a naznačují tak věkovou závislost těchto charakteristik. Toto tvrzení je podpořeno i grafy na obrázcích (obr. 4.11), kde lze pozorovat sestupnou či sestupnou tendenci středních hodnot spektrálních momentů. Závislost charakteristik na věku naopak nelze, na základě zobrazených dat, potvrdit u spektrálních sklonů.

Tabulka 4.1: p-hodnoty anovy pro testování shody středních hodnot spektrálních charakteristik tří věkových skupin chlapců

Chlapci	Těžiště	Rozptyl	Šikmost	Špičatost	Sklon
/P/	<0,001	<0,001	<0,001	0,038	0,238
/PA/	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,003
/T/	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,316
/TA/	<0,001	<0,001	0,002	<0,001	0,001
/K/	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001
/KA/	<0,001	<0,001	0,002	0,017	0,003

V tabulce 4.2 vidíme výsledky anovy pro dívčí data rovněž v podobě p-hodnot. I zde dochází na základě testů k zamítnutí nulových hypotéz pro téměř všechny spektrální charakteristiky. Na rozdíl od chlapeckých dat vykazují na hladině pravděpodobnosti $\alpha=0,05$ shodné střední hodnoty dvě charakteristiky – spektrální rozptyl (s p-hodnotou 0,968) a špičatost (p-hodnota 0,425) hlásky /k/. Toto je pozorovatelné i na obrázku 4.6, kde nedochází (nebo dochází pouze k nepatrné) změně středních hodnot pro tři věkové skupiny. Naopak, u všech ostatních spektrálních momentů souhlásek /p/, /t/ a /k/ a samohlásky /a/ jsou pozorovatelné změny středních hodnot napříč věkovými skupinami. Na rozdíl od chlapecké skupiny, nelze shodu středních hodnot zamítnout pro žádnou z uvedených charakteristik.

Tabulka 4.2: p-hodnoty anovy pro testování shody středních hodnot spektrálních charakteristik tří věkových skupin dívek

Dívky	Těžiště	Rozptyl	Šikmost	Špičatost	Sklon
/P/	<0,001	0,002	<0,001	0,003	0,068
/PA/	0,032	<0,001	<0,001	<0,001	0,120
/T/	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,721
/TA/	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,169
/K/	<0,001	0,968	0,012	0,425	0,212
/KA/	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,334

4.3 Porovnání charakteristik dle pohlaví

Data získaných spektrálních charakteristik byla rozdělena dle pohlaví na skupiny chlapců a dívek. Obě skupiny byly porovnány t-testem pro testování shody středních hodnot. Tabulka 4.3 obsahuje výsledky t-testů, které porovnávaly střední hodnoty všech spektrálních parametrů exploziv a samohlásek, ve formě *p-hodnot*. Dle původní hypotézy bylo předpokládáno, že se v první věkové skupině do 8 let nebude signifikantně odlišovat střední hodnoty chlapců a dívek z důvodu vysoké podobnosti hlasů dětí před začátkem dospívání. Ve druhé skupině se v důsledku počínajícího dospívání a rozdílné dynamiky vývoje hlasového traktu očekávají první signifikantní rozdíly mezi chlapci a děvčaty. Ve třetí věkové skupině bylo předpokládán již velmi malý počet shodných středních hodnot spektrálních parametrů. Tento předpoklad byl vztažen zejména k samohláskám, jejichž

tvar spektrum je výrazně ovlivněn základní frekvencí hlasu a formanty. Tyto frekvenční charakteristiky jsou v přímém vztahu s výškou hlasu, jejíž vývoj se v dospívání velmi liší. Souhlásky, v případě DDK úloh neznělé explozivny, nejsou natolik závislé na výšce hlasu, a proto u exploziv tento předpoklad nemusel být naplněn.

Předpoklad pro první věkovou skupinu byl testováním potvrzen. Žádná charakteristika spektra nevykazuje na hladině významnosti $\alpha=0,05$ signifikantní rozdíl mezi chlapci a dívkami (tabulka 4.3) Ve druhé skupině se v některých případech začínají objevovat rozdílné střední hodnoty výběrů charakteristik. Předpoklad nebyl zcela naplněn pro věkovou skupinu nejstarších dětí. Pro souhlásky /p/ a /k/ jsou rozdílné střední hodnoty všech spektrálních momentů a také sklonu u /k/. Zcela shodné jsou spektrální momenty a sklony souhlásky /t/, která jejíž výslovnost se tedy jeví jako nejméně závislá na pohlaví.

U samohlásky /a/ v kontextu slabik /pa/-/ta/-/ka/ se předpoklady potvrdily pouze pro nejmladší věkovou skupinu. U nejstarších z dětí se signifikantně rozlišuje pouze spektrální těžiště, které je ale nejvíce ovlivněno základní hlasovou frekvencí f_0 , a také rozptyl samohlásky /a/ v kontextu slabiky /ka/. Ostatní charakteristiky mají dle výsledků testů shodné střední hodnoty.

Tabulka 4.3: p-hodnoty testů shody středních hodnot krátkodobých spektrálních charakteristik. V rámci testů byly porovnávány charakteristiky chlapců a dívek ve třech věkových skupinách. Tučně jsou zvýrazněny signifikantní p-hodnoty, které indikují zamítnutí nulové hypotézy shody středních hodnot na hladině významnosti $\alpha=0,05$.

	P			T			K		
Věkové skupiny	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Těžiště	0,88	0,13	<0,01	0,43	0,44	0,11	0,84	<0,01	<0,01
Rozptyl	0,20	0,04	0,02	0,11	0,36	0,75	0,97	<0,01	<0,01
Šikmost	0,22	0,20	0,01	0,29	0,26	0,39	0,52	0,09	<0,01
Špičatost	0,18	0,18	0,02	0,20	0,20	0,37	0,43	0,15	<0,01
Sklon	0,28	0,03	0,20	0,87	0,81	0,96	0,31	0,89	0,04
	(P)A			(T)A			(K)A		
Věkové skupiny	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Těžiště	0,53	0,16	<0,01	0,69	0,78	0,02	0,87	0,24	<0,01
Rozptyl	0,99	0,01	0,06	0,67	0,07	0,74	0,34	<0,01	<0,01
Šikmost	0,98	0,08	0,16	0,95	0,73	0,74	0,78	0,35	0,47
Špičatost	0,90	0,05	0,08	0,98	0,16	0,98	0,50	0,13	0,88
Sklon	0,58	0,30	0,45	0,43	0,54	0,24	0,78	0,28	0,61

Samohláskami dominované charakteristiky dlouhodobého spektra splňují uvedenou hypotézu ve všech třech věkových skupinách. Dle *p-hodnot* uvedených v tabulce 4.4 lze pozorovat, že střední hodnoty frekvencí, kterých leží tři spektrální vrcholy, jsou mezi

chlapci a dívkami shodné pro věkovou skupinu nejmladších, dle výsledků testování. Ve druhé skupině dochází ke snižování *p-hodnot* a druhý střední hodnota druhého spektrální vrcholu je již na hladině významnosti rozdílná. Věková skupina nad 12 let již vykazuje podstatné rozdíly mezi charakteristikami chlapců a dívek.

Tabulka 4.4: *p*-hodnoty testů shody středních hodnot dlouhodobých spektrálních charakteristik a základní frekvence. Testy shody probíhaly mezi chlapci a dívkami ve třech věkových skupinách. V tabulce jsou zvýrazněny *p*-hodnoty indikující rozdílné střední hodnoty charakteristik.

	G1	G2	G3
1. spektrální vrchol	0,29	0,83	<0,01
2. spektrální vrchol	0,15	0,15	<0,01
3. spektrální vrchol	0,18	0,10	<0,01

4.4 Korelace s věkem

V rámci cílů práce je otestováno, jakým způsobem jsou spektrální charakteristiky závislé na věku dítěte. Pro vyjádření míry závislosti je použit korelační koeficient, který nabývá hodnot v intervalu od -1 do 1. Na datech byly provedeny Pearsonovy testy korelace. Výsledky pro chlapce i dívky jsou zobrazeny v tabulkách 4.5 a 4.6. V tabulkách můžeme pozorovat poměrně vysoké korelace dat. Pro chlapce dosahují nejvyšších hodnot korelačních koeficientů spektrální těžiště, nejvíce u hlásky /k/, kde data korelují s hodnotou -0,682, což určuje poměrně silnou negativní závislost dat. Slabě korelují spektrální sklony. Hodnoty korelací v tabulce odpovídají trendům, které jsou zobrazeny v grafech na obrázku 4.9 a také v tabulkách 4.1 a 4.2 s výsledky testování anovy v podobě *p*-hodnot.

Tabulka 4.5: Hodnoty korelačních koeficientů spektrálních charakteristik a věku u chlapců

Chlapci	Těžiště	Rozptyl	Šikmost	Špičatost	Sklon
/P/	-0,492	-0,258	0,354	0,193	0,01
/PA/	-0,464	-0,475	0,405	0,486	0,161
/T/	-0,556	-0,320	0,431	0,313	-0,107
/TA/	-0,534	-0,381	0,342	0,364	0,151
/K/	-0,682	-0,471	0,474	0,356	-0,326
/KA/	-0,602	-0,509	0,341	0,237	0,135

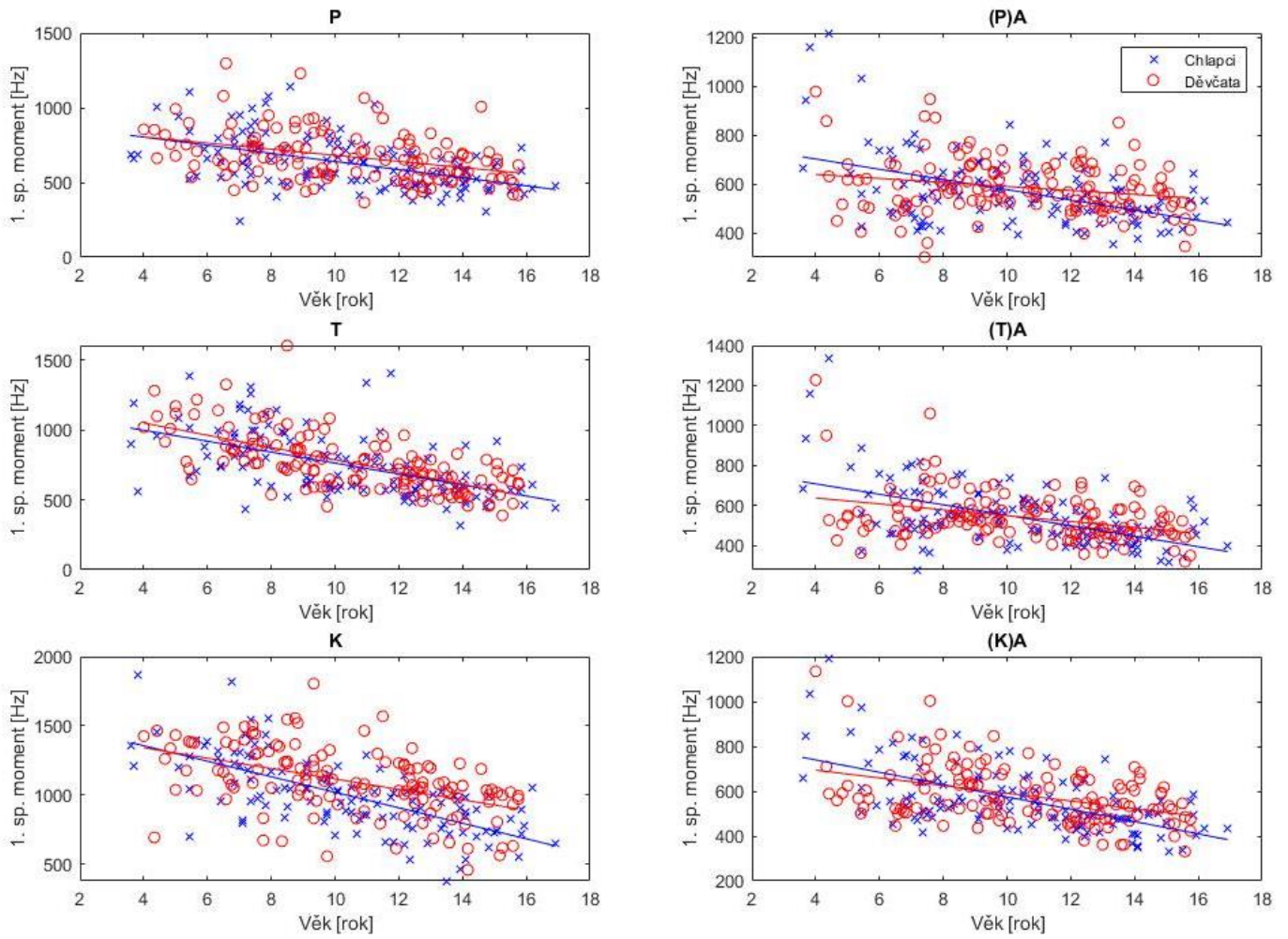
U dívek nejsilněji korelují všechny spektrální momenty plozívky /t/, nejvíce první a třetí moment, u kterých korelační koeficienty dosahují hodnoty -0,667, resp. 0,615. Nejslabší korelaci vykazuje rozptyl souhlásky /k/, koeficient -0,092 naznačuje velmi

nízkou míru korelace. Toto lze pozorovat také na obrázku 4.5, kde jsou v pravém horním grafu zobrazeny střední hodnoty rozptylu souhlásky /k/ tří věkových skupin. Hodnota rozptylu zůstává pro všechny skupiny přibližně stejná, což je ve shodě s touto nízkou hodnotou koeficientu a také s p-hodnotou anovy prováděné na věkových skupinách (tabulka 4.2). V porovnání s chlapci u dívek ve většině případů méně korelují spektrální momenty samohlásky /a/, zřejmě z důvodů zmíněné mutace chlapců v pubertě. Nevýrazné jsou, stejně jako u chlapců, korelace spektrálních sklonů.

Tabulka 4.6: Hodnoty korelačních koeficientů spektrálních charakteristik a věku u dívek

Dívky	Těžiště	Rozptyl	Šikmost	Špičatost	Sklon
/P/	-0,380	-0,238	0,390	0,300	0,108
/PA/	-0,225	-0,346	0,311	0,392	0,069
/T/	-0,667	-0,543	0,615	0,511	-0,077
/TA/	-0,363	-0,341	0,331	0,352	-0,007
/K/	-0,48	-0,092	0,292	0,161	-0,133
/KA/	-0,417	-0,382	0,410	0,371	0,019

Na obrázku 4.12 jsou hodnoty prvních spektrálních momentů zobrazených v závislosti na věku jedince. Směrnice přímky lineární regrese má vždy sestupný trend, což indikuje pokles těžiště spektra s rostoucím věkem a potvrzuje to výsledky testů anova i míry korelace (tabulky 4.5 a 4.6). Z grafů je patrné, že data získaná od reálných dětí s různou úrovní artikulace, výslovnosti a vývoje přináší vysoký rozptyl. Vysoký rozptyl dat není příliš vhodný vzhledem k následující regresní úloze a úloze rozpoznávání věku jedince na základě jeho spektrálních charakteristik. V datech lze také pozorovat několik odlehlých hodnot, např. některé hodnoty chlapců (modré křížky) i dívek (červená kolečka) u spektrálních těžišť samohlásek, zejména pro nejmladší jedince, u kterých se nahrávaly orální DDK úlohy. Tyto vysoké hodnoty spektrálního těžiště souvisí se základní frekvencí hlasu, která může být pro nejmenší jedince dosahovat až 300 Hz. Z tohoto důvodu mohou být některé hodnoty momentů samohlásek natolik odlehlé od ostatních.

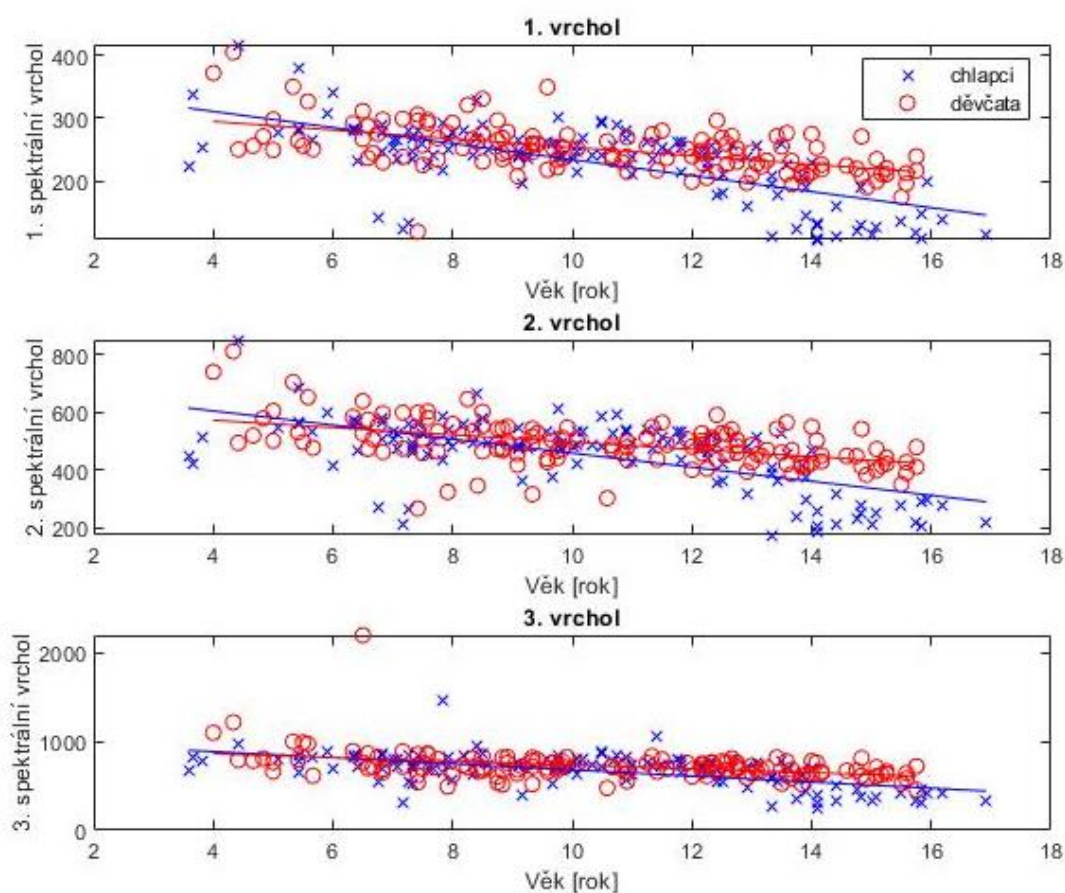


Obrázek 4.12: Zobrazení závislosti prvního momentu plozív /p/, /t/ a /k/ (levý sloupec) a samohlásky /a/ v kontextu slabik /pa/-/ta/-/ka/ (pravý sloupec) na věku. Dle sklonu regresní přímky je pozorovatelná zřejmá negativní korelace charakteristik a věku.

4.5 Spektrální charakteristiky dlouhodobého spektra

Dlouhodobé spektrum, které je odhadováno ze tří celých sekvencí DDK promluvy, bylo charakterizováno frekvencemi, na kterých leží první tři vrcholy ve vyhlazeném spektru ve frekvenčním pásmu do 2500 Hz. Tyto frekvence vrcholů jsou ovlivněny formantovými frekvencemi a korespondují se základní frekvencí hlasu. Předpokladem je negativní korelace všech frekvencí vrcholů, tedy snižování průměrné hodnoty frekvencí, na kterých vrcholy leží, v důsledku snižování tónu hlasu v průběhu dospívání.

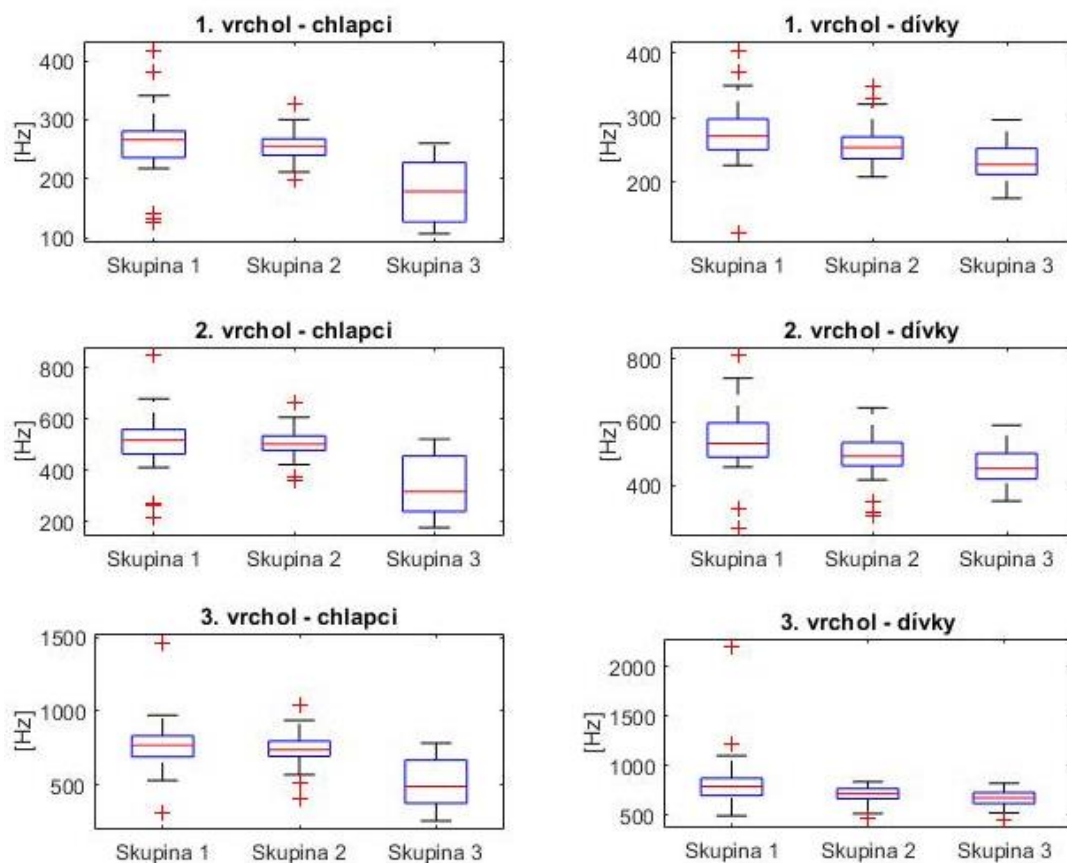
Tento předpoklad je podpořen grafy na obrázku 4.13, kde jsou zobrazeny hodnoty frekvencí prvních tří spektrálních vrcholů v závislosti na věku jedince. Přímkou lineární regrese ukazuje na sestupný trend dat všech tří vrcholů u dívek i u chlapců. Data, podobně jako tomu bylo u spektrálních momentů (obrázky 4.2 a 4.3), obsahují několik odlehklých hodnot a ovšem nevykazují tak vysoký rozptyl. Nižší rozptyl dat může být s výhodou použit při úloze rozpoznávání věku jedince na základě jeho charakteristik dlouhodobého i krátkodobého spektra. Směrnice lineární přímky má u všech tří momentů vyšší hodnotu u chlapců, u kterých se vývoj hlasového traktu projevuje v dospívání dynamičtěji. Toto lze pozorovat u skupiny chlapců nad 12 let, kde hodnoty spektrálních vrcholů chlapců leží pod stejnými hodnotami dívek.



Obrázek 4.13: Zobrazení závislosti frekvencí prvních tří spektrálních vrcholů na věku.

Rozložení dat jednotlivých vrcholů pro tři věkové skupiny chlapců i dívek je zobrazeno na obrázku 4.14. Opět je zde potvrzen klesající trend hodnot frekvencí spektrálních vrcholů v průběhu věku i občasný výskyt odlehlých hodnot. U chlapců pozorujeme zvýšený rozptyl všech tří vrcholů ve třetí věkové skupině, možnou příčinou tohoto pozorování je vysoká variabilita parametrů hlasu, zejména jeho výšky, dospělé populace mužů. Třetí věková skupina je složena z dětí mezi 12 a 16 lety a děti, hlavně chlapci, v tomto věkovém rozmezí nejsou homogenní skupinou řečníků, což může být rovněž příčinou vyššího rozptylu, než jakého dosahují předchozí skupiny. Trend vývoje středních hodnot u chlapců se mění ve druhé věkové skupině (obr. 4.15), kde začíná pokles průměrných frekvencí vrcholů výrazněji klesat.

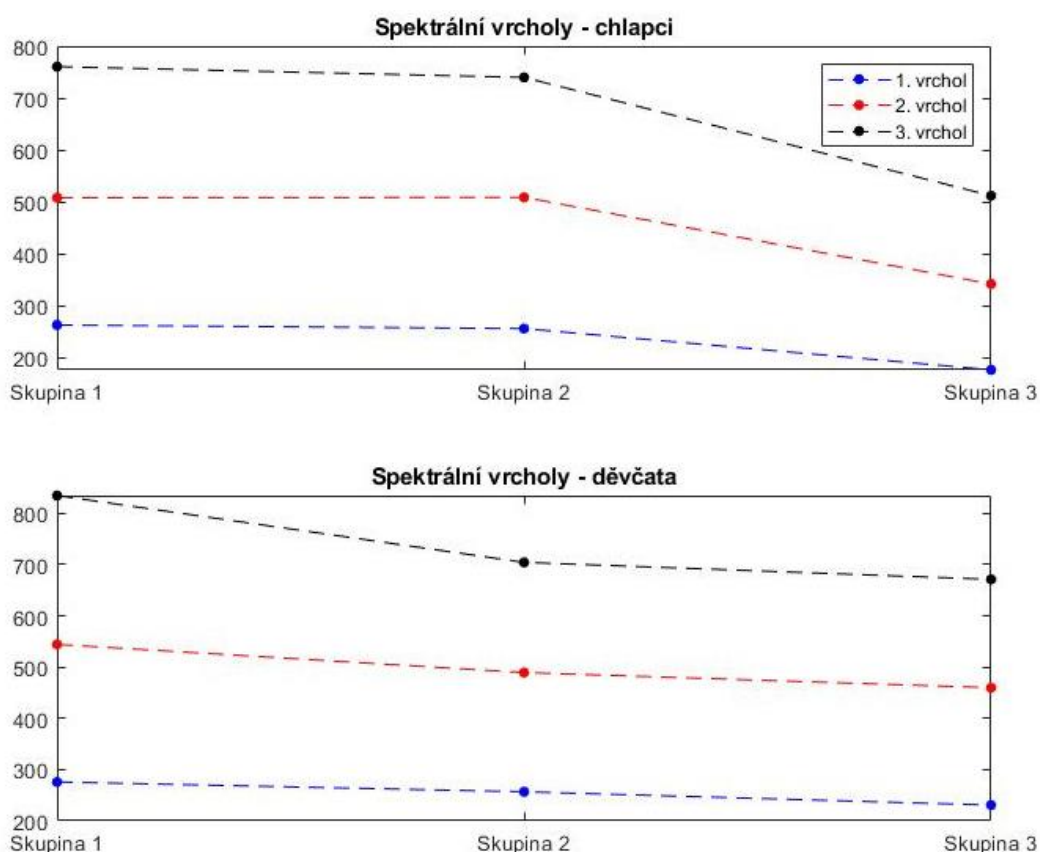
U dívek pozorujeme postupný pokles hodnot frekvencí vrcholů bez výraznější změny trend ve druhé věkové skupině. Třetí spektrální vrchol, který odpovídá druhé formantové frekvenci, u dívek vykazuje v rámci pozorovaných charakteristik velmi nízký rozptyl.



Obrázek 4.14: Rozložení hodnot tří spektrálních vrcholů ve třech věkových skupinách chlapců a dívek. Výsledky chlapeckých skupin jsou zobrazeny v levém sloupci a dívčích skupin v pravém sloupci. V řádcích obrázku jsou zobrazeny výsledky tří spektrálních vrcholů.

Testování hypotézy, zdali dochází ke signifikantnímu rozdílu střední hodnoty dat spektrálních vrcholů pro věkové skupiny byla opět použita analýza rozptylu. Výsledky testování shody náhodných veličin je zobrazeno v tabulce 4.7 v podobě p-hodnot. p-hodnoty podávají silný argument pro zamítnutí shody náhodných veličin všech spektrálních vrcholů napříč věkovými skupinami chlapců a dívek.

Tento vývoj potvrzují i grafy na obrázku 4.14, kde jsou zobrazeny střední hodnoty frekvencí vrcholů pro tři věkové skupiny chlapců a dívek. I zde je zřejmý sestupný trend v průběhu věku. Podobně jako u spektrálních momentů samohlásek vidíme u chlapců výraznou změnu trendu mezi první a druhou a druhou a třetí věkovou skupinou, tedy v období puberty, kdy dochází k mutaci hlasu.



Obrázek 4.15: Vývoj středních hodnot frekvencí, na kterých leží spektrální vrcholy, ve věkových skupinách chlapců a dívek

Tabulka 4.7: p-hodnoty z testování shody náhodných veličin frekvencí spektrálních vrcholů tří věkových skupin chlapců a dívek

	1. spektrální vrchol	2. spektrální vrchol	3. spektrální vrchol
Dívky	<0,001	<0,001	<0,001
Chlapci	<0,001	<0,001	<0,001

V tabulce 4.8 jsou zobrazeny hodnoty korelačních koeficientů tří vrcholů dlouhodobého spektra a věků dětí, které DDK promluvy namluvily. V tabulce lze pozorovat, že charakteristiky dlouhodobého spektra lépe korelují u chlapců než u dívek, což je patrně opět důsledek již zmíněné mutace v pubertálním věku chlapců. Pro obě pohlaví vykazuje nejvyšší hodnotu korelace první spektrální vrchol.

Tabulka 4.8: hodnoty korelačních koeficientů spektrálních vrcholů pro chlapce a dívky

	1. spektrální vrchol	2. spektrální vrchol	3. spektrální vrchol
Dívky	-0,554	-0,497	-0,389
Chlapci	-0,678	-0,633	-0,590

4.6 Rozpoznávání věku na základě spektrálních charakteristik

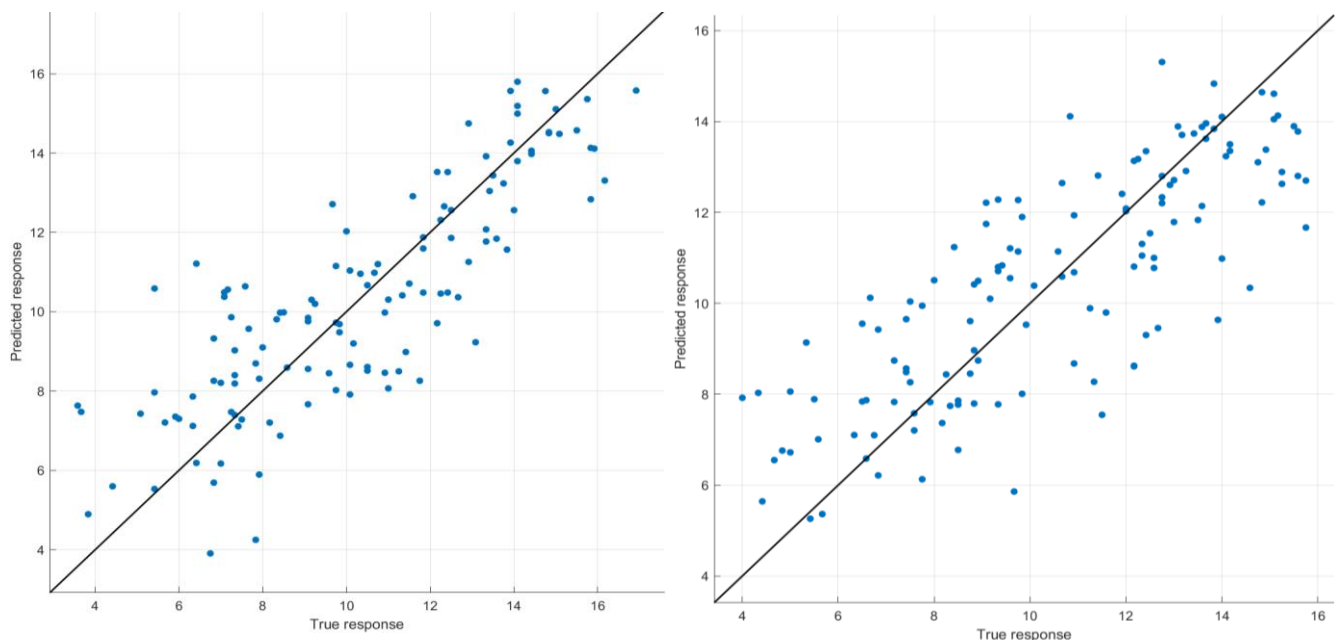
Dle získaných dat z krátkodobých i dlouhodobých spekter DDK promluv byl proveden experiment rozpoznání věku řečníka dle vektoru jeho pozorovaných charakteristik. Experiment rozpoznávání byl rozdělen dle pohlaví kvůli rozdílné dynamice vývoje hlasového traktu v průběhu dospívání. V důsledku rozdělení databáze na chlapce a dívky se očekává zpřesnění rozpoznávání. Prediktory, z nichž byly sestaveny regresní modely v aplikaci *Regression Learner* integrované v MATLABu, byly vybrány podle hodnoty korelačních koeficientů, výsledků testování shody náhodných výběrů analýzou rozptylu a nízkého rozptylu výběru. Prediktory byly zároveň zvoleny tak, aby splňovaly uvedené podmínky pro skupinu chlapců a dívek. Sada prediktorů se tedy mezi skupinami pro porovnání výsledků neliší. V prostředí aplikace *Regression Learner* byly natrénovány modely ze všech rodin modelů – modely lineární regrese, regresní stromy, metoda podpůrných vektorů (support vector machines), regresní modely Gaussovských procesů. Model byl ověřen křížovou validací (cross-validací). Dle hodnoty kritéria RMSE byl určen nejpřesnější z regresních modelů.

Použité spektrální charakteristiky pro úlohu rozpoznávání věku řečníka jsou zobrazeny v tabulce 4.9.

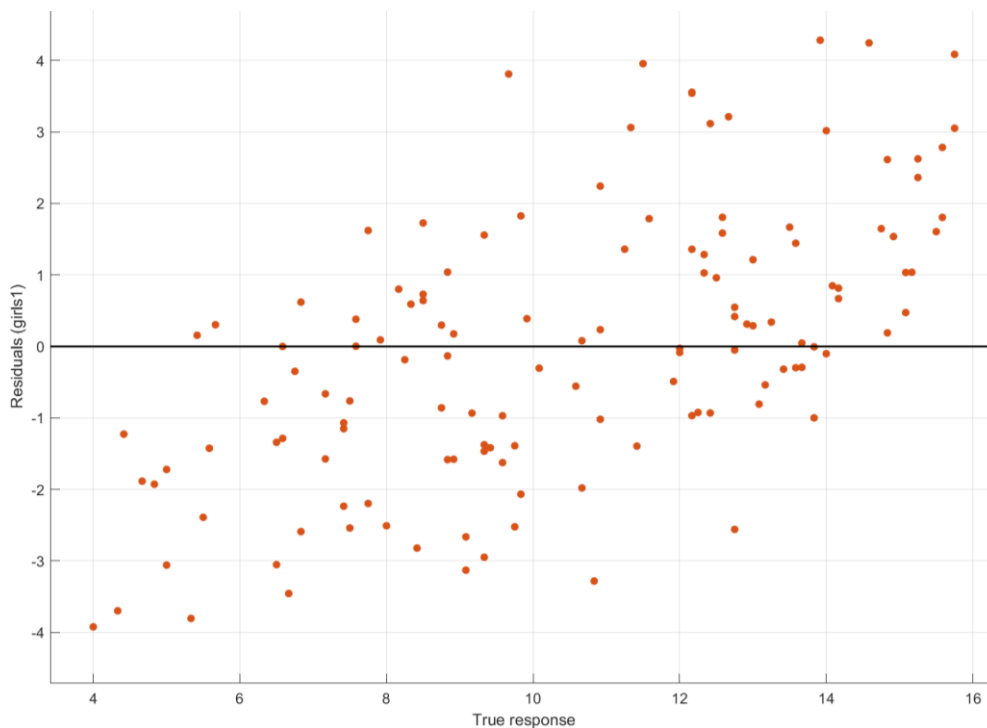
Tabulka 4.9: zvolené spektrální charakteristiky jako prediktory regresního modelu dat

Prediktory	<ul style="list-style-type: none"> • Spektrální těžiště – /P/, /T/, /K/, /TA/, /KA/ • Základní frekvence • 1. – 3. spektrální vrchol dlouhodobého spektra
------------	--

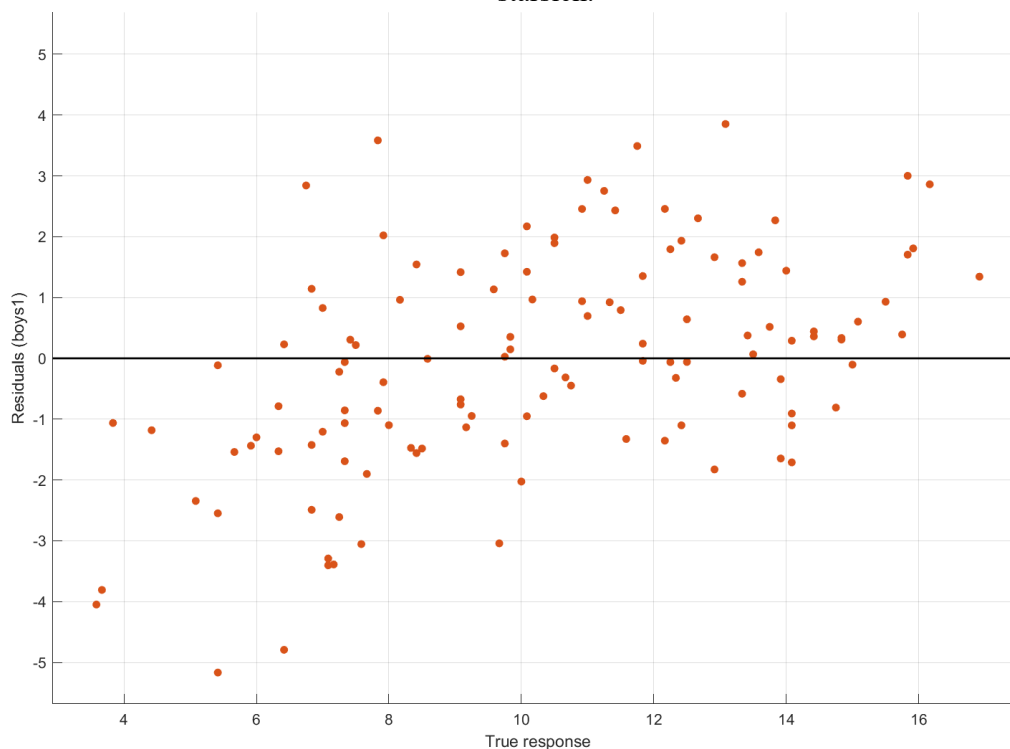
Z modelů, které *Regression Learner* poskytuje, dosahovaly nejpřesnějších výsledků modely metody podpurných vektorů (SVM), z tohoto důvodu jsou zobrazeny výsledky právě nejlepších SVM modelů. U chlapců byl se zvolenými prediktory dosažen nejlepší výsledek RMSE 1,79 lineárním SVM modelem, u dívek kritérium RMSE dosáhlo minima na 1,88. Na obrázku 4.16 jsou zobrazeny grafy, kde jsou vyneseny proti sobě reálné a odhadované hodnoty věku. Ideální model má všechny vynesené body na úhlopříčce grafu. Model je tím přesnější, čím více se vynesené body blíží úhlopříčce, která je v grafu zvýrazněná. Na obou grafech lze pozorovat rozptýlení většiny bodů v blízkosti úhlopříčky, nicméně některé body jsou od ideální hodnoty predikce vzdálené. Rozdíly skutečných věků a predikovaných hodnot jsou zobrazeny na obrázku 4.17 a 4.18. Ideální stav je opět zvýrazněn tlustou horizontální linií, která je rovna ose y , tj. $y=0$. Dle rozptýlení bodů v grafech lze pozorovat jev, že u mladších dětí, cca do 8. roku u dívek a do 10. roku u chlapců, jsou odhadované věky spíše nadhodnoceny, a naopak u starších dětí jsou modelem generované hodnoty věku podhodnoceny vůči skutečnému věku dětí.



Obrázek 4.16: Zobrazení přesnosti regresních SVM modelů pro chlapce (vlevo) a dívky (vpravo). Na ose x jsou vyneseny hodnoty skutečného věku dětí, na ose y jsou vyneseny hodnoty věku odhadované modelem. Ideální model je znázorněn zesílenou úhlopříčkou. V obou grafech pozorujeme rozptyl bodů v okolí úhlopříčky.



Obrázek 4.17: Rozdíly skutečných hodnot věku a predikovaných hodnot věků u chlapců. Ideální rozdíl je naznačen zesílenou linií, která leží na ose $y=0$. Z rozptýlení bodů je patrné, že zvolený model má tendence nadhodnocovat věk mladších dětí, a naopak podhodnocovat věk dětí starších.



Obrázek 4.18: Rozdíly skutečných hodnot věku a predikovaných hodnot věků u dívek. Ideální stav je roven $y=0$. V grafu lze pozorovat nadhodnocování věku nejmladších dětí. Věk starších dětí bývá často podhodnocován.

5 Diskuse

V rámci práce byla zkoumána možnost objektivizace orálních DDK úloh pomocí několika spektrálních charakteristik. Diagnostika řečových poruch je v klinické praxi založena na subjektivním rozhodnutí odborníka založeném na jeho znalostech a zkušenostech a mohou se mezi odborníky lišit. Objektivizace řeči pomocí počítačového zpracování přináší možnosti pomoci odborníkům v podpoře jejich diagnostiky několika charakteristikami.

Hlavním cílem práce bylo zkoumání změny řečového signálu z orálních diadochokinetických úloh ve spektrální doméně v průběhu dospívání dětí. Spektrum bylo nahrazeno několika vybranými charakteristikami, které částečně zachycují jeho tvar. Tyto charakteristiky byly vybrány na základě rešerše. V rámci práce také proběhlo testování několika druhů výpočtů spektra (kap. 3.1), k periodogramu byly zkoumány i vyhlazené varianty odhadů spektra Welchovou metodou, metodou Multitaper a také bylo zkoumáno LPC spektrum. Ze všech testovaných variant byl zvolen pro odhad krátkodobého spektra periodogram z důvodů zisku nejvyšších hodnot korelačního koeficientu pro testování závislosti spektrálních charakteristik na věku řečníka. Metody výpočtu poskytující zprůměrované spektrum v rámci okně signálu utlumovaly počáteční část časového průběhu explozív a samohlásek, která nesla informaci. Pro výpočet dlouhodobého spektra byla použita Welchova metoda, která poskytuje zprůměrované spektrum. Tato metoda byla zvolena kvůli vyhlazení spektra a snadnějšímu určení spektrálního vrcholu.

Spektrum DDK úloh bylo zkoumáno z hlediska krátkodobého, kdy bylo spektrum odhadováno ze segmentů nahrávky, který odpovídal buď souhláске, nebo samohláске slabiky DDK promluv, a také z hlediska dlouhodobého spektra, které bylo odhadováno ze tří realizací sekvence /pa/-/ta/-/ka/. Z krátkodobých charakteristik byly zvoleny spektrální momenty, které jsou frekventovaně používanou sadou numerik k popisu spektra, a také spektrální sklon [15],[17]. V dlouhodobém spektru byly pozorovány frekvence, na kterých leží tři vrcholy, které se ve spektru objevují. Jako charakteristika byla použita základní frekvence hlasu. Bylo zjištěno, že některé krátkodobé i dlouhodobé spektrální charakteristiky signifikantně korelují s věkem dětí. Vysokou míru korelace vykazují spektrální momenty souhlásek DDK promluv, zejména těžiště – první spektrální moment, jehož hodnoty korelačního koeficientu v některých případech přesahují -0,6. Podobné výsledky jsou uvedeny i v studii z roku 2005 [17], která byla zaměřena na výzkum popis vývoje sykavek. V této studii autoři zmiňují vliv věku na první, třetí a čtvrtý spektrální moment, spektrální rozptyl má dle jejich zjištění nesignifikantní interakci s věkem. Zde se porovnání výsledků studií liší, v této práci byla zjištěna signifikantní korelace pro některé hlásky (tabulky 4.5 a 4.6). Naopak, ve porovnání se studií slabou míru korelace vykazoval spektrální sklon. Pro lepší výzkum spektrálního sklonu je vhodnější použít výkonové spektrum v decibelech, ve kterém spektrum neklesá tak rychle k minimu. Studie z roku 2020 [15] uvádí věkovou závislost pro první a třetí

moment spekter frikativ. Podobné výsledky pro popis spektra explozív s různými místy artikulace uvádí i Lousada a spol. [21]. I v této studii bylo ukázáno, že hodnota spektrálního těžiště se liší pro plozivý obouretné, předodásňové i měkkopatrové (obr 4.1 a 4.2). Věková závislost charakteristik byla podrobena testu středních hodnot metodou analýzy rozptylů. Dle výsledků (tabulky 4.1 a 4.2) ve formě p-hodnot lze pozorovat, že střední hodnoty spektrálních charakteristik tří věkových skupin se liší vždy alespoň v jedné skupině téměř u všech parametrů, tzn. že z hlediska výslovnosti a artikulace nejsou děti homogenní skupinou řečníků. Ke stejným závěrům došla studie zkoumající spektrální změny spojené s dospíváním [19]. Výjimku z hlediska shody středních hodnot tvoří druhý a čtvrtý spektrální moment u dívek (tabulka 4.2), což může naznačovat, že výslovnost hlásky /k/ se v průběhu věku příliš nemění. Výsledky testování středních hodnot metodou ANOVA doplňují testy korelací v tvrzení, že spektrum hlásek se v průběhu dospívání mění.

Charakteristiky dlouhodobého spektra vykazují vysokou míru korelace pro chlapce i dívky a významné rozdíly ve středních hodnotách (tabulky 4.7 a 4.8). Podobné závěry z hlediska vlivu dospívání na výšku základní frekvence a výšky formantových frekvencí uvádějí i studie [19],[27] a [28]. Vyšší míru korelace má skupina chlapců, u kterých dochází v rámci mutace k prudké změně hlasového traktu, která se projevuje zejména na samohlásce, jejíž frekvence dominují dlouhodobému spektru. Zvláštností je vyšší korelace charakteristik dlouhodobého spektra, které je složeno z plozivy, samohlásky a okluze než u spektrálních momentů vypočítaných čistě ze segmentu samohlásky. Rozdíl mezi dlouhodobým a krátkodobým signálem je volba charakteristik. Krátkodobé úseky samohlásek byly charakterizovány pomocí spektrálních momentů. Formantové frekvence a základní frekvence jsou zřejmě významnějšími a více korelujícími spektrálními charakteristikami popisující hlasový trakt jedince než spektrální momenty, které slouží k popisu tvaru spektra, ale nejsou přímo spjaty s hlasovým traktem.

Testování shody středních hodnot mezi věkovými skupinami chlapců a dívek přinesly částečně překvapivé výsledky (tabulka 4.3). Dle očekávání by se měly signifikantní rozdíly mezi pohlavími začít objevovat ve druhé skupině a plně projevit ve skupině třetí. Důvodem je rozdílná dynamika vývoje hlasového traktu v dospívání chlapců a dívek. Tyto předpoklady byly částečně splněny u explozív /p/ a /k/, souhláska /t/ byla shodná dle výsledků testu ve všech spektrálních charakteristikách. Toto zjištění naznačuje, že souhláska /t/ je z hlediska spektra shodná mezi chlapci a dívkami a není signifikantně ovlivněna vývojem hlasového traktu. U samohlásek bylo výše uvedené očekávání splněno pouze pro první spektrální moment – těžiště, které je výrazně ovlivněno základní frekvencí a formantovými frekvencemi. Ostatní charakteristiky mají nevýznamný rozdíl mezi středními hodnotami chlapců a dívek.

Úloha rozpoznávání věku byla provedena regresním přístupem. Klasifikační přístup nebyl po domluvě s vedoucím práce použit. Získaná data spektrálních charakteristik vykazují vysoký rozptyl v celé řadě spektrálních charakteristik, což vnášelo vysokou

chybu do výsledků klasifikace. Vhodnější byl z tohoto pohledu regresní přístup, který poskytuje spojitý výstup predikované hodnoty věku. Dva regresní modely, vytvořené pro skupinu chlapců a dívek, byly sestaveny na základě zvolených prediktorů (tab. 4.9), které byly zvoleny dle korelační koeficientů a výsledků testování shody středních rozptylů metodou ANOVA. Hodnotící kritérium RMSE dosáhlo minimální hodnoty 1,79 let u chlapců a 1,88 let u dívek, v obou případech se jako nejlepší modely jevíly modely podpůrných vektorů (SVM). Pro zpřesnění výsledků rozpoznávání věku dětí dle numerik charakterizující jejich DDK promluvy by bylo vhodným krokem kombinace spektrálních a temporálních parametrů a také případné rozšíření databáze.

6 Závěr

V rámci práce bylo stanoveno několik cílů, které byly směřovány k prozkoumání spektrální oblasti orálních DDK úloh /pa/-/ta/-/ka/ u zdravých dětí se zaměřením na závislost zvolených spektrálních charakteristik na věku dítěte. Spektrální charakteristiky, které byly vybrány na základě rešerše, mohou být rozděleny na dvě kategorie: charakteristiky počítané z dlouhodobého spektra, které je odhadnuto ze tří segmentů celé promluvy /pa/-/ta/-/ka/, a charakteristiky krátkodobého spektra, které je odhadnuto pouze ze segmentů plozív a samohlásek. Zvolené charakteristiky z kategorie krátkodobého spektra byly čtyři spektrální momenty – těžiště, rozptyl, šikmost a špičatost, a také spektrální sklon. Dlouhodobé spektrum bylo charakterizováno třemi spektrálními vrcholy, které korespondují se základní frekvencí a formantovými frekvencemi prvních dvou formantů. Spektrální analýza ukázala závislost většiny zkoumaných charakteristik na věku. Věková závislost byla zkoumána Pearsonovými testy korelace a kvantifikována korelačním koeficientem. Děti z databáze byly také rozděleny do tří věkových skupin, první skupina byla složena z jedinců do věku 8 let, druhá čítala děti mezi osmým a dvanáctým rokem života, třetí skupina byla složena z nejstarších dětí nad 12 let. V rámci těchto skupin byly poté prováděny testy shody náhodných veličin spektrálních charakteristik pomocí analýzy rozptylu (ANOVA). Výsledky testů shody náhodných veličin byly prezentovány p-hodnotami. p-hodnoty pod 0,05 naznačují rozdílnost alespoň jedné věkové skupiny z hlediska střední hodnoty spektrální charakteristiky. Výsledné p-hodnoty a korelační koeficienty určily, jak jsou charakteristiky závislé na věku. Charakteristiky dlouhodobého spektra vykazují významnou míru korelace ve všech případech. Z charakteristiky krátkodobého spektra nejlépe korelují spektrální těžiště, naopak jako věkově nezávislé se ukázaly spektrální sklony. Z hlediska pohlaví mají více korelující spektrální charakteristiky chlapci, dobře to lze demonstrovat na výsledcích dlouhodobého spektra. Tento jev může vznikat v důsledku prudšího vývoje hlasového traktu u chlapců v dospívání. Na základě zvolených spektrálních charakteristik byl také proveden experiment rozpoznávání věku jedince. Ze zvolených prediktorů byl vytvořen

model aplikaci *RegressionLearner*, která je integrovaná v MATLABU. Pro chlapecký model bylo dosaženo minimální RMSE 1,79 let. U dívek bylo minimální RMSE 1,88 let.

Seznam použité literatury

- [1] MALEK, Ayyoub, Shahrokh AMIRI, Issa HEKMATI, Jaber PIRZADEH a Hossein GHOLIZADEH. A Comparative Study on Diadochokinetic Skill of Dyslexic, Stuttering, and Normal Children. *ISRN Pediatrics*. 2013, **2013**, 1-7. ISSN 2090-4703. Dostupné z: doi:10.1155/2013/165193
- [2] ALSHAHWAN, Majid I., Patricia E. COWELL, Sandra P. WHITESIDE, Jaber PIRZADEH a Hossein GHOLIZADEH. Diadochokinetic rate in Saudi and Bahraini Arabic speakers: Dialect and the influence of syllable type. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2020, **27**(1), 303-308. ISSN 1319562X. Dostupné z: doi:10.1016/j.sjbs.2019.09.021
- [3] Speech Sound Disorders. *American Speech-Language-Hearing Association* [online]. Rockville, MD 20850-3289 USA: ASHA, 2010 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.asha.org/public/speech/disorders/speech-sound-disorders/>
- [4] SKARNITZL, Radek, Pavel ŠTURM a Jan VOLÍN. *Zvuková báze řečové komunikace: fonetický a fonologický popis řeči*. V Praze: Univerzita Karlova v Praze, nakladatelství Karolinum, 2016. ISBN 978-80-246-3272-8.
- [5] BERNTHAL, John E., Nicholas W. BANKSON a Peter FLIPSEN. *Articulation and Phonological Disorders*. 6. vyd. Boston: Allyn & Bacon., 2008. ISBN 978-0205569267.
- [6] ŠKODOVÁ, Eva a Ivan JEDLIČKA. *Klinická logopedie*. 2. vyd. Praha: Portál, 2003. ISBN 80-7117-8546-6.
- [7] KLENKOVÁ, Jiřina a Ivan JEDLIČKA. *Logopedie: narušení komunikační schopnosti, logopedická prevence, logopedická intervence v ČR, příklady z praxe*. 2. vyd. Praha: Grada, 2006. Pedagogika (Grada). ISBN 978-80-247-1110-2.
- [8] FABUS, Renee. Assessment of Articulation and Phonological Disorders. STEIN-RUBIN, Cyndi a Renee FABUS. *A Guide to Clinical Assessment and Professional Report Writing in Speech-Language Pathology*. 2. vyd. Delmar Publications, 2011, s. 139-174. ISBN 978-16-309-1372-4.
- [9] NOVOTNY, Michal, Jan MELECHOVSKY, Kriss ROZENSTOKS, Tereza TYKALOVA, Petr KRYZE, Martin KANOK, Jiri KLEMPER a Jan RUSZ. Comparison of Automated Acoustic Methods for Oral Diadochokinesis Assessment in Amyotrophic Lateral Sclerosis. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2020, **63**(10), 3453-3460. ISSN 1092-4388. Dostupné z: doi:10.1044/2020_JSLHR-20-00109

- [10] STACKHOUSE, Pam Williams, Joy. *Rate, accuracy and consistency: diadochokinetic performance of young, normally developing children*. 2009, **14**(4), 267-293. ISSN 0269-9206. Dostupné z: doi:10.1080/02699200050023985
- [11] WILLIAMS, Pam a Joy STACKHOUSE. *Diadochokinetic Skills: Normal and Atypical Performance in Children Aged 3–5 Years*. 1998, **33**(S1), 481-486. ISSN 1368-2822. Dostupné z: doi:10.3109/13682829809179472
- [12] PIERCE, John E., Susan COTTON a Alison PERRY. *Alternating and sequential motion rates in older adults*. 2013, **48**(3), 257-264. ISSN 13682822. Dostupné z: doi:10.1111/1460-6984.12001
- [13] ICHT, Michal a Boaz M. BEN-DAVID. *Oral-diadochokinetic rates for Hebrew-speaking school-age children: Real words vs. non-words repetition*. 2014, **29**(2), 102-114. ISSN 0269-9206. Dostupné z: doi:10.3109/02699206.2014.961650
- [14] GAUTAM, Sumanlata a Latika. Developmental changes of spectral parameter in children speech. *2016 3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. IEEE, 2016, 2016, , 220-225. ISBN 978-1-4673-9197-9. Dostupné z: doi:10.1109/SPIN.2016.7566692
- [15] TAYLOR, Sammi, Christopher DROMEY, Shawn L. NISSEN, Kristine TANNER, Dennis EGGETT a Kim CORBIN-LEWIS. Age-Related Changes in Speech and Voice: Spectral and Cepstral Measures. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2020, **63**(3), 647-660. ISSN 1092-4388. Dostupné z: doi:10.1044/2019_JSLHR-19-00028
- [16] DROMEY, Christopher, Elise HUNTER a Shawn L. NISSEN. Speech Adaptation to Kinematic Recording Sensors: Perceptual and Acoustic Findings. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2018, **61**(3), 593-603. ISSN 1092-4388. Dostupné z: doi:10.1044/2017_JSLHR-S-17-0169
- [17] NISSEN, Shawn L. a Robert Allen FOX. Acoustic and spectral characteristics of young children's fricative productions: A developmental perspective. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2005, **118**(4), 2570-2578. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.2010407
- [18] GEROSA, Matteo, Diego GIULIANI a Fabio BRUGNARA. Acoustic variability and automatic recognition of children's speech. *Speech Communication*. 2007, **49**(10-11), 847-860. ISSN 01676393. Dostupné z: doi:10.1016/j.specom.2007.01.002
- [19] DILLEY, Laura C., Elizabeth A. WIELAND, Jessica L. GAMACHE, J. Devin MCAULEY a Melissa A. REDFORD. Age-Related Changes to Spectral Voice Characteristics Affect Judgments of Prosodic, Segmental, and Talker Attributes for Child and Adult Speech. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*.

2013, **56**(1), 159-177. ISSN 1092-4388. Dostupné z: doi:10.1044/1092-4388(2012/11-0199)

- [20] BUNNEL, Timothy, James POLIKOFF a Jane MCNICHOLAS. *Spectral Moment vs. Bark Cepstral Analysis of Children's Word-initial Voiceless Stops*. INTERSPEECH 2004 - ICSLP, 8th International Conference on Spoken Language Processing, Jeju Island, Korea, 2004.
- [21] LOUSADA, Marisa Lobo, Luis M. T. JESUS a Daniel PAPE. Estimation of stops' spectral place cues using multitaper techniques. *DELTA: Documentação de Estudos em Lingüística Teórica e Aplicada*. 2012, **28**(1), 1-26. ISSN 0102-4450. Dostupné z: doi:10.1590/S0102-44502012000100001
- [22] MATURO, Steve, Courtney HILL, Glenn BUNTING, Cathy BALLIF, Rie MAURER a Christopher HARTNICK. Pediatric Laryngeal Diadochokinetic Rates. *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*. 2012, **146**(2), 302-306. ISSN 0194-5998. Dostupné z: doi:10.1177/0194599811426259
- [23] PERCIVAL, Donald B. a Andrew T. WALDEN. Spectral Analysis for Physical Applications: Multitaper and Conventional Univariate Techniques. *Technometrics*. 1993, 2009-12-04, **38**(3), 294. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9780511622762
- [24] PEETERS, Geoffroy, Bruno L. GIORDANO, Patrick SUSINI, Nicolas MISDARIIS a Stephen MCADAMS. The Timbre Toolbox: Extracting audio descriptors from musical signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2011, **130**(5), 2902-2916. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.3642604
- [25] LERCH, Alexander. *An Introduction to Audio Content Analysis*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2012. ISBN 978-1-118-26682-3.
- [26] MCLOUGHLIN, Ian. *Applied Speech and Audio Processing*. 2009. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9780511609640
- [27] GOBERMAN, Alexander M. a Michael P. ROBB. Acoustic Examination of Preterm and Full-Term Infant Cries. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 1999, **42**(4), 850-861. ISSN 1092-4388. Dostupné z: doi:10.1044/jslhr.4204.850
- [28] REUBOLD, Ulrich, Jonathan HARRINGTON a Felicitas KLEBER. Vocal aging effects on F0 and the first formant: A longitudinal analysis in adult speakers. *Speech Communication*. 2010, **52**(7-8), 638-651. ISSN 01676393. Dostupné z: doi:10.1016/j.specom.2010.02.012
- [29] CHODROFF, Eleanor a Colin WILSON. Burst spectrum as a cue for the stop voicing contrast in American English. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2014, **136**(5), 2762-2772. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.4896470

Seznam příloh

A. Kompletní výsledky statistického zpracování

B. Obsah přiloženého CD

Tabulka 1: Výsledky statistického zpracování dat spektrálních charakteristik krátkodobého spektra celou databází.

Celek		Těžiště	Rozptyl	Šikmost	Špičatost	Sklon
P	Průměr	653,30	651,16	3,62	28,04	-3,24E-06
	Rozptyl	30125,04	16165,67	1,66	358,83	3,56E-11
	Sm. odchylka	173,57	127,14	1,29	18,94	5,97E-06
T	Průměr	759,16	728,06	2,98	19,36	-2,07E-06
	Rozptyl	46527,06	16566,14	1,40	227,30	9,52E-12
	Sm. odchylka	215,70	128,71	1,18	15,08	3,09E-06
K	Průměr	1053,06	721,76	1,43	11,27	-6,00E-07
	Rozptyl	66725,60	12621,07	1,20	124,16	7,13E-12
	Sm. odchylka	258,31	112,34	1,09	11,14	2,67E-06
(P)A	Průměr	579,39	339,82	2,95	34,28	-6,62E-05
	Rozptyl	16877,23	4119,05	1,54	481,22	5,83E-09
	Sm. odchylka	129,91	64,18	1,24	21,94	7,63E-05
(T)A	Průměr	544,47	376,36	3,47	32,17	-6,39E-05
	Rozptyl	20112,14	7920,68	1,45	416,55	6,55E-09
	Sm. odchylka	141,82	89,00	1,20	20,41	8,10E-05
(K)A	Průměr	574,84	375,00	3,00	32,08	-6,22E-05
	Rozptyl	18981,76	7795,00	1,45	871,06	4,94E-09
	Sm. odchylka	137,77	88,29	1,20	29,51	7,03E-05

Tabulka 2: Výsledky statistického zpracování dat spektrálních charakteristik krátkodobého spektra chlapeckou skupinu.

Chlapci		Těžiště	Rozptyl	Šikmost	Špičatost	Sklon
P	Průměr	632,76	628,36	3,81	31,11	-3,60E-06
	Rozptyl	31289,26	13369,33	1,98	499,89	3,17E-11
	Sm. odchylka	176,89	115,63	1,41	22,36	5,63E-06
T	Průměr	751,42	720,44	3,04	20,41	-2,10E-06
	Rozptyl	51011,26	17558,80	1,60	277,86	4,89E-12
	Sm. odchylka	225,86	132,51	1,26	16,67	2,21E-06
K	Průměr	1004,28	686,84	1,58	13,08	-7,00E-07
	Rozptyl	69303,15	11796,15	1,48	183,50	5,11E-12
	Sm. odchylka	263,25	108,61	1,22	13,55	2,26E-06
(P)A	Průměr	571,33	332,40	3,06	36,60	-7,10E-05
	Rozptyl	20905,73	4018,65	1,60	523,48	6,88E-09
	Sm. odchylka	144,59	63,39	1,26	22,88	8,30E-05
(T)A	Průměr	545,00	371,44	3,43	32,41	-6,50E-05
	Rozptyl	24562,51	7459,17	1,43	386,71	4,77E-09
	Sm. odchylka	156,72	86,37	1,20	19,66	6,91E-05
(K)A	Průměr	566,57	358,28	2,98	34,07	-6,53E-05
	Rozptyl	21347,55	5876,06	1,51	1212,11	4,52E-09
	Sm. odchylka	146,11	76,66	1,23	34,82	6,72E-05

Tabulka 3: Výsledky statistického zpracování dat spektrálních charakteristik krátkodobého spektra dívčí skupinu.

Dívky		Těžiště	Rozptyl	Šikmost	Špičatost	Sklon
P	Průměr	672,61	672,58	3,45	25,16	-2,90E-06
	Rozptyl	28486,81	17959,98	1,31	211,84	3,93E-11
	Sm. odchylka	168,78	134,01	1,15	14,55	6,27E-06
T	Průměr	766,44	735,22	2,93	18,38	-2,04E-06
	Rozptyl	42561,84	15653,95	1,22	179,56	1,39E-11
	Sm. odchylka	206,31	125,12	1,10	13,40	3,73E-06
K	Průměr	1098,89	754,56	1,29	9,56	-5,05E-07
	Rozptyl	60445,35	11253,76	0,90	63,33	9,06E-12
	Sm. odchylka	245,86	106,08	0,95	7,96	3,01E-06
(P)A	Průměr	586,97	346,79	2,85	32,10	-6,17E-05
	Rozptyl	13104,28	4143,71	1,47	435,31	4,84E-09
	Sm. odchylka	114,47	64,37	1,21	20,86	6,96E-05
(T)A	Průměr	543,98	380,97	3,51	31,94	-6,29E-05
	Rozptyl	16086,57	8370,10	1,47	447,63	8,28E-09
	Sm. odchylka	126,83	91,49	1,21	21,16	9,10E-05
(K)A	Průměr	582,62	390,70	3,02	30,20	-5,93E-05
	Rozptyl	16779,58	9143,51	1,40	550,18	5,36E-09
	Sm. odchylka	129,54	95,62	1,18	23,46	7,32E-05

Tabulka 4: Výsledky statistického zpracování dat spektrálních charakteristik krátkodobého spektra první věkovou skupinu dívek.

D1		Těžiště	Rozptyl	Šikmost	Špičatost	Sklon
P	Průměr	751,69	717,48	2,81	18,99	-4,94E-06
	Rozptyl	30755,90	19781,23	0,91	153,71	1,31E-10
	Sm. odchylka	175,37	140,65	0,95	12,40	1,15E-05
T	Průměr	960,57	830,77	2,08	10,60	-1,54E-06
	Rozptyl	28955,74	12804,32	0,31	33,76	7,47E-12
	Sm. odchylka	170,16	113,16	0,56	5,81	2,73E-06
K	Průměr	1236,14	754,38	0,97	8,23	6,46E-07
	Rozptyl	50198,20	12674,18	0,64	48,54	5,01E-12
	Sm. odchylka	224,05	112,58	0,80	6,97	2,24E-06
(P)A	Průměr	602,86	375,25	2,54	23,60	-5,71E-05
	Rozptyl	27233,26	3603,37	1,94	393,11	3,38E-09
	Sm. odchylka	165,03	60,03	1,39	19,83	5,82E-05
(T)A	Průměr	609,65	432,23	3,06	24,23	-4,16E-05
	Rozptyl	36258,49	13818,47	1,55	292,67	2,22E-09
	Sm. odchylka	190,42	117,55	1,25	17,11	4,71E-05
(K)A	Průměr	650,00	440,44	2,40	18,72	-4,76E-05
	Rozptyl	27887,27	15881,45	0,71	137,93	3,28E-09
	Sm. odchylka	166,99	126,02	0,84	11,74	5,72E-05

Tabulka 5: Výsledky statistického zpracování dat spektrálních charakteristik krátkodobého spektra druhou věkovou skupinu dívek.

D2		Těžiště	Rozptyl	Šikmost	Špičatost	Sklon
P	Průměr	701,70	680,28	3,37	24,39	-2,21E-06
	Rozptyl	32762,24	21995,47	1,26	201,66	7,61E-12
	Sm. odchylka	181,00	148,31	1,12	14,20	2,76E-06
T	Průměr	788,15	744,54	2,70	15,63	-2,15E-06
	Rozptyl	38798,40	15886,43	0,76	73,52	2,18E-11
	Sm. odchylka	196,97	126,04	0,87	8,57	4,67E-06
K	Průměr	1141,23	757,62	1,20	9,39	-1,02E-06
	Rozptyl	66398,31	14561,34	0,94	67,95	2,10E-11
	Sm. odchylka	257,68	120,67	0,97	8,24	4,58E-06
(P)A	Průměr	612,45	356,85	2,52	26,67	-7,61E-05
	Rozptyl	5908,01	5002,66	0,67	235,78	7,48E-09
	Sm. odchylka	76,86	70,73	0,82	15,36	8,65E-05
(T)A	Průměr	553,39	388,45	3,21	25,69	-8,43E-05
	Rozptyl	6140,18	6160,14	0,66	198,61	1,60E-08
	Sm. odchylka	78,36	78,49	0,81	14,09	1,27E-04
(K)A	Průměr	605,72	402,80	2,77	26,85	-7,39E-05
	Rozptyl	10848,53	7203,38	0,73	391,33	8,42E-09
	Sm. odchylka	104,16	84,87	0,85	19,78	9,18E-05

Tabulka 6: Výsledky statistického zpracování dat spektrálních charakteristik krátkodobého spektra třetí věkovou skupinu dívek.

D3		Těžiště	Rozptyl	Šikmost	Špičatost	Sklon
P	Průměr	600,03	638,73	3,90	29,57	-2,23E-06
	Rozptyl	14663,52	11715,08	1,17	219,31	8,10E-12
	Sm. odchylka	121,09	108,24	1,08	14,81	2,85E-06
T	Průměr	629,71	669,06	3,64	25,43	-2,25E-06
	Rozptyl	12594,48	7554,23	1,19	267,65	1,16E-11
	Sm. odchylka	112,23	86,92	1,09	16,36	3,41E-06
K	Průměr	979,74	752,11	1,56	10,52	-7,77E-07
	Rozptyl	36255,96	8060,78	0,91	68,75	8,32E-13
	Sm. odchylka	190,41	89,78	0,95	8,29	9,12E-07
(P)A	Průměr	556,02	321,02	3,32	41,82	-5,25E-05
	Rozptyl	9357,72	2646,55	1,53	476,57	3,43E-09
	Sm. odchylka	96,74	51,44	1,24	21,83	5,86E-05
(T)A	Průměr	496,01	343,42	4,03	41,86	-5,80E-05
	Rozptyl	7666,70	4111,41	1,67	594,37	5,11E-09
	Sm. odchylka	87,56	64,12	1,29	24,38	7,15E-05
(K)A	Průměr	522,19	350,20	3,60	40,01	-5,43E-05
	Rozptyl	8629,60	3695,25	1,78	762,07	3,99E-09
	Sm. odchylka	92,90	60,79	1,34	27,61	6,32E-05

Tabulka 7: Výsledky statistického zpracování dat spektrálních charakteristik krátkodobého spektra první věkovou skupinu chlapců.

CH1		Těžiště	Rozptyl	Šikmost	Špičatost	Sklon
P	Průměr	745,51	673,10	3,13	25,24	-2,91E-06
	Rozptyl	35377,06	21570,11	1,53	578,11	2,40E-11
	Sm. odchylka	188,09	146,87	1,24	24,04	4,90E-06
T	Průměr	924,57	785,79	2,29	13,50	-1,66E-06
	Rozptyl	43099,24	14678,90	0,94	139,51	5,87E-12
	Sm. odchylka	207,60	121,16	0,97	11,81	2,42E-06
K	Průměr	1247,41	753,30	0,85	7,18	1,06E-07
	Rozptyl	62825,29	14255,34	0,60	16,20	9,51E-13
	Sm. odchylka	250,65	119,40	0,78	4,02	9,75E-07
(P)A	Průměr	630,46	375,27	2,54	24,10	-6,96E-05
	Rozptyl	39961,02	5752,24	1,24	242,75	1,00E-08
	Sm. odchylka	199,90	75,84	1,11	15,58	1,00E-04
(T)A	Průměr	628,81	421,14	3,04	24,33	-5,70E-05
	Rozptyl	45873,21	9928,98	1,71	335,48	2,90E-09
	Sm. odchylka	214,18	99,64	1,31	18,32	5,38E-05
(K)A	Průměr	656,85	416,84	2,46	20,76	-5,34E-05
	Rozptyl	31040,49	6300,54	0,81	181,56	2,72E-09
	Sm. odchylka	176,18	79,38	0,90	13,47	5,21E-05

Tabulka 8: Výsledky statistického zpracování dat spektrálních charakteristik krátkodobého spektra pro druhou věkovou skupinu chlapců.

CH2		Těžiště	Rozptyl	Šikmost	Špičatost	Sklon
P	Průměr	646,80	625,49	3,71	29,86	-4,58E-06
	Rozptyl	24956,30	9874,00	1,89	548,29	5,13E-11
	Sm. odchylka	157,98	99,37	1,38	23,42	7,16E-06
T	Průměr	755,08	719,73	2,93	18,27	-2,27E-06
	Rozptyl	42028,62	15966,40	1,00	115,65	3,10E-12
	Sm. odchylka	205,01	126,36	1,00	10,75	1,76E-06
K	Průměr	981,09	679,52	1,51	11,62	-6,97E-07
	Rozptyl	24768,37	7616,31	0,52	37,96	6,07E-12
	Sm. odchylka	157,38	87,27	0,72	6,16	2,46E-06
(P)A	Průměr	585,68	323,59	2,92	34,52	-9,60E-05
	Rozptyl	10288,88	2429,66	1,58	456,01	8,44E-09
	Sm. odchylka	101,43	49,29	1,26	21,35	9,19E-05
(T)A	Průměr	558,52	359,46	3,28	30,50	-9,21E-05
	Rozptyl	9867,72	5423,23	1,16	313,50	8,62E-09
	Sm. odchylka	99,34	73,64	1,08	17,71	9,29E-05
(K)A	Průměr	579,22	345,39	3,00	39,13	-9,04E-05
	Rozptyl	11182,65	4029,68	1,92	2491,56	7,66E-09
	Sm. odchylka	105,75	63,48	1,39	49,92	8,75E-05

Tabulka 8: Výsledky statistického zpracování dat spektrálních charakteristik krátkodobého spektra pro třetí věkovou skupinu dívek.

CH3		Těžiště	Rozptyl	Šikmost	Špičatost	Sklon
P	Průměr	516,03	590,88	4,52	37,73	-3,19E-06
	Rozptyl	9816,62	6983,44	1,62	324,44	1,79E-11
	Sm. odchylka	99,08	83,57	1,27	18,01	4,23E-06
T	Průměr	590,93	662,05	3,85	28,89	-2,31E-06
	Rozptyl	15872,86	15232,74	1,69	463,50	5,88E-12
	Sm. odchylka	125,99	123,42	1,30	21,53	2,42E-06
K	Průměr	808,59	634,37	2,31	19,96	-1,43E-06
	Rozptyl	30639,99	7564,21	2,32	413,13	6,96E-12
	Sm. odchylka	175,04	86,97	1,52	20,33	2,64E-06
(P)A	Průměr	502,80	302,85	3,67	50,10	-4,59E-05
	Rozptyl	7591,59	1636,05	1,37	537,08	1,41E-09
	Sm. odchylka	87,13	40,45	1,17	23,18	3,76E-05
(T)A	Průměr	455,01	339,02	3,95	41,73	-4,38E-05
	Rozptyl	6937,74	4209,98	1,10	375,29	1,35E-09
	Sm. odchylka	83,29	64,88	1,05	19,37	3,68E-05
(K)A	Průměr	471,62	318,81	3,41	40,82	-4,98E-05
	Rozptyl	7339,43	2763,38	1,34	621,22	2,00E-09
	Sm. odchylka	85,67	52,57	1,16	24,92	4,47E-05

Tabulka 9: Výsledky statistického zpracování dat spektrálních charakteristik dlouhodobého spektra pro chlapce, dívky a všechny děti z databáze.

	1. sp. vrchol [Hz]	2. sp. vrchol [Hz]	3. sp. vrchol [Hz]
Celek	241,10	471,96	697,00
	2624,81	10900,21	32700,68
	51,23	104,40	180,83
Dívky	250,91	491,06	723,49
	1496,77	6293,22	29692,93
	38,69	79,33	172,32
Chlapci	230,65	451,63	668,80
	3634,18	15087,62	34615,30
	60,28	122,83	186,05

Tabulka 10: Výsledky statistického zpracování dat spektrálních charakteristik dlouhodobého spektra tří dívčích, věkových skupin.

	1. sp. vrchol [Hz]	2. sp. vrchol [Hz]	3. sp. vrchol [Hz]
D1	275,90	544,36	834,86
	2420,84	10791,17	82284,31
	49,20	103,88	286,85
D2	256,75	489,39	704,47
	861,40	4247,96	7944,42
	29,35	65,18	89,13
D3	230,77	459,87	671,27
	691,78	2750,58	6307,12
	26,30	52,45	79,42

Tabulka 11: Výsledky statistického zpracování dat spektrálních charakteristik dlouhodobého spektra tří chlapčích, věkových skupin.

	1. sp. vrchol [Hz]	2. sp. vrchol [Hz]	3. sp. vrchol [Hz]
CH1	262,30	507,67	760,44
	3139,70	11621,01	28359,87
	56,03	107,80	168,40
CH2	255,50	508,47	739,68
	642,17	3235,12	12064,96
	25,34	56,88	109,84
CH3	175,91	341,39	511,63
	2730,01	12555,04	27120,68
	52,25	112,05	164,68

Obsah přiloženého CD

Název souboru	Popis
DP_Samuel_Maduda.pdf	Kompletní diplomová práce
Zadani_prace.pdf	Naskenované zadání práce
shorttime_analysis.m	Program pro krátkodobé zpracování nahrávek
longtime_analysis.m	Program pro krátkodobé zpracování nahrávek
spectral_moments.m	Funkce pro výpočet spektrálních charakteristik
timeseg2.m	Funkce segmentující signál
plots.m	Funkce zobrazující výsledky analýzy