

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD

KATEDRA KYBERNETIKY

TBD

DIZERTAČNÍ PRÁCE

SRPEN 2019

AUTOR: ING. PETR STANISLAV

ŠKOLITEL: PROF. ING. JOSEF PSUTKA, CSc.

OBOR: KYBERNETIKA

Obsah

1	Úvod	1
2	Příčiny a léčba trvalé ztráty hlasu	2
2.1	Příčiny ztráty hlasu	2
2.1.1	Rakovina hrtanu	3
2.2	Rehabilitace hlasu po totální laryngektomii	7
2.2.1	Foniatrické metody	8
2.2.2	Chirurgicko-protetická metoda	12
2.2.3	Hrtanu podobné struktury	15
2.2.4	Transplantace hrtanu	17
2.2.5	Shrnutí	18
3	Řečová rozhraní	21
4	Experimenty	22
4.1	Analýza dat a první modely	23
4.1.1	Vytvoření korpusu EL promluv	24
4.1.2	Analýza získaných dat	27
4.1.3	Prvotní experimenty	34
4.1.4	Redukce fonetické sady	34
4.2	Provnání člověk vs. stroj	40

4.3	Protahování na příýnacích	40
4.4	Modely pracující s protaženými daty	40
5	Trenažér	42
6	Závěr	43
	Seznam použité literatury	44
	Dodatky	46

Kapitola 1

Úvod

Kapitola 2

Příčiny a léčba trvalé ztráty hlasu

Lidská řeč tvoří jeden ze stavebních kamenů lidského dorozumívání. Pro člověka postiženého dočasnou či trvalou ztrátou hlasu představuje běžná lidská komunikace mnohem náročnější úkol než pro člověka zdravého. Takový jedinec se musí dennodenně potýkat s problémy, které by za normálních okolností řešit nemusel. V mnoha případech doprovází ztrátu hlasu i zvýšená psychická zátěž, například strach z reakce okolí, a proto se problematice lidí trpících ztrátou hlasu věnuje nemalá pozornost. V této kapitole si nejprve v části 2.1 přiblížíme možné příčiny ztráty hlasivek, a tedy i trvalé ztráty hlasu, a následně v části 2.2 představíme dostupné metody rehabilitace hlasu.

2.1 Příčiny ztráty hlasu

Nejčastěji je trvalá ztráta hlasu zapříčiněna chirurgickým zákrokem zvaným totální laryngektomie¹ neboli úplné odstranění hrtanu. Odstraněním hrtanu, a tím i hlasivek (glottis), přichází člověk o schopnost rozvibrovat vzduch vycházející z plic, který je dále modulován artikulačním ústrojím. Nejběžnější příčinou vedoucí k totální laryngektomii představuje rakovina hrtanu v pokročilém stádiu. V mnohem nižší míře je na vině rakovina hltanu či poškození hrtanu automobilovou nebo jinou traumatickou

¹laryngektomie: larynx, laryngos - hrtan, ectos, ectomia - odstranění, vynětí

nehodou. Podle [1] přibude v České republice ročně přibližně 400 nových onemocnění rakoviny hrtanu, z toho je přibližně jedna třetina léčena pomocí totální laryngektomie. To představuje více než 100 nových případů trvalé ztráty hlasu každý rok.

2.1.1 Rakovina hrtanu

Jak již bylo zmíněno, rakovina hrtanu je jedním z hlavních důvodů odstranění hrtanu. Tento typ rakoviny postihuje převážně muže ve věku 50-60 let. V posledních letech je však zřejmý trend snižujícího se průměrného věku pacientů [2]. Z celkovém počtu pacientů zhruba 20% představují ženy.

Přesná příčina vzniku nádorového onemocnění hrtanu doposud není známa, ale z průzkumů je zřejmá korelace mezi vznikem rakoviny a konzumací alkoholu či kouřením. Jinými slovy, mezi rizikovou skupinu patří lidé, kteří jsou pravidelně vystavováni vlivu kouření, ať již aktivně (sami kouří) či pasivně (vdechují cigaretový kouř) a zároveň si dopřávají nemalé množství alkoholu. Podle [2] 90% pacientů aktivně kuří.

Příznaky onemocnění

Vznikající nádorové onemocnění v oblasti hrtanu se může projevovat různými způsoby. Mezi hlavní faktory ovlivňující počáteční příznaky patří umístění a velikost nádoru.

Již ve velmi raném stádiu, kdy je nádor umístěn přímo na hlasivkách, je příznakem **chrapot**. Ve většině případů se samozřejmě jedná o krátkodobé postižení hlasivek virovou infekcí. Nicméně pokud chrapot trvá déle než tři týdny, je již doporučováno navštívit odborného lékaře. U nádorů nacházejících se ve vchodu do hrtanu a v polykacích cestách se mohou jako příznak objevovat **polykací obtíže**. Mezi další možné příznaky patří **bolesti v krku**, jednostranné bolesti vystřelující do ucha či nepříjemný pocit při polykání. I v tomto případě krátkodobý výskyt nemusí nutně znamenat rakovinu hrtanu, nicméně při obtížích trvajících déle než měsíc je doporučováno důkladné vyšetření lékařem. Na základě umístění nádoru se může objevovat

dráždivý kašel s možným vykašláváním krve. Dalším možným příznakem je vznik **zduření na krku**. V tomto případě je vhodné neprodleně vyhledat lékaře.

Z výše uvedených příznaků je zřejmé, že prvotní indicie o vážném onemocnění mohou být podceněny a tím značně snížena šance na plné uzdravení pacienta. V případě včasného diagnostikování rakoviny hrtanu či hltanu je možnost úplného vyléčení pacienta bez trvalých následků více než 90% [1].

Léčba nádorového onemocnění

U nádorovitých onemocnění se v drtivé většině případů využívá **chirurgické léčby**, **aktinoterapie** neboli ozařování a **chemoterapie**. Nejinak tomu je i v případě rakoviny hrtanu a polykacích cest obecně. Majoritní část pacientů je zpravidla nejprve konfrontována s chirurgickou léčbou. Mezi nejčastější zákroky patří **tracheostomie**, parciální laryngektomie, **totální laryngektomie** a chordektomie. V rámci této práce budou blíže popsány pouze léčebné postupy přímo související s úplným odstraněním hrtanu a hlasivek.

Totální laryngektomie (TL), jak už název napovídá, představuje chirurgický zákrok, při kterém je úplně odstraněn hrtan. V určitých případech může být odstraněna i menší či větší část hltanu. Tento zákrok, ve spojení s léčbou rakoviny hrtanu, poprvé vykonal Dr. Theodor Billroth 31. prosince roku 1873 ve Vídni [3] a do dnešní doby přežil v podstatě nezměněn. Cílem této operace je odstranění orgánu zasaženého rakovinným bujením, a tedy zamezení dalšího šíření nemoci. Součástí hrtanu je také hrtanová příklopka (latinsky epiglottis), která zamezuje vdechnutí potravy nebo tekutin do dýchacích cest. Po odstranění hrtanu by tedy potrava a tekutiny mohly být vdechnuty do plic a z tohoto důvodu jsou jícen a průdušnice trvale odděleny. Rozdíl mezi zdravým člověkem a osobou po totální laryngektomii je znázorněn na obr. 2.1.

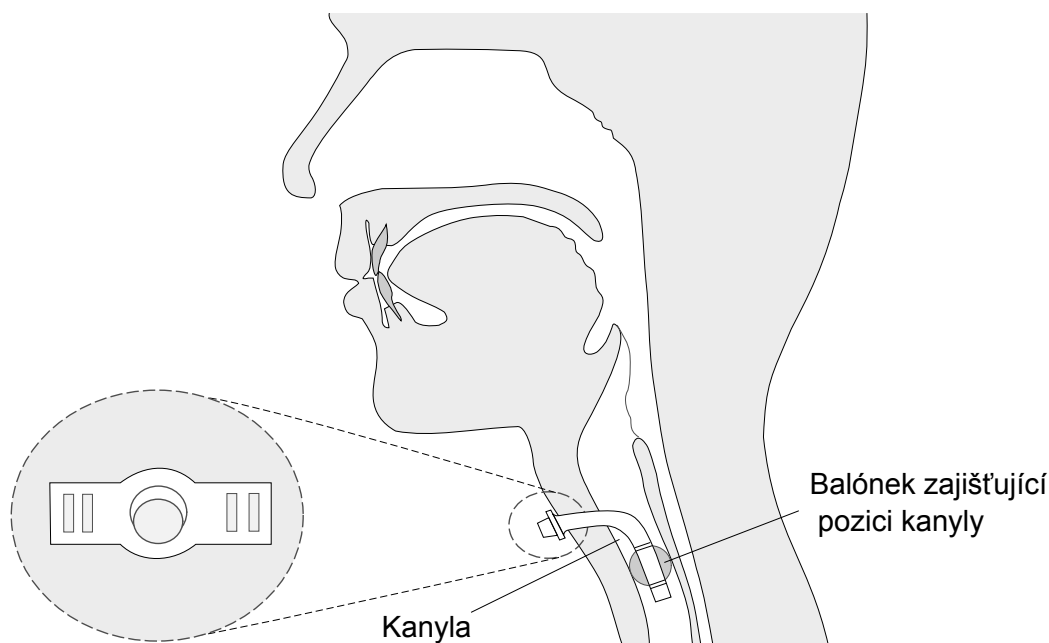
Odstraněním spojení průdušnice a jícnu je zahrazena cesta vzduchu do plic. Z tohoto důvodu je nezbytné společně s TL vykonat také **tracheostomii**. Cílem tohoto



Obrázek 2.1: (A) Schéma dýchacích cest zdravého člověka (B) Schéma dýchacích cest po totální laryngektomii

zároku není léčba nádorovitěho onemocnění, nýbrž vytvoření vstupu pro vzduch směřující do plic a z nich. Samotný zákrok se využívá i v situacích, kdy dojde k uzávěře hrtanu a postižená osoba se dusí. K tomuto může dojít například při alergické reakci na včelí bodnutí, otoku hrtanu, úrazu apod. Při tracheostomii se provádí řez skrz kůži a průdušnici. Do vzniklého otvoru se zavádí kanyla, která slouží k dýchání. Místo výkonu zákroku a princip kanyly je znázorněn na obr. 2.2. Pro lepší názornost je znázorněna tracheostomie se zavedenou kanylou u zdravého člověka. Výsledek operace může být dočasný (například v případě alergické reakce) nebo trvalý.

Další významnou metodou využívanou k léčbě nádorových onemocnění představuje **aktinoterapie** neboli léčba ozařováním. Podstatou postupu je periodické vystavování buňky ionizujícímu záření. Energie z tohoto záření je předávána buňce, která je tím poškozována. Tento postup se opírá o předpoklad, že nádorové buňky jsou náchylnější k poškození. Záření ovšem ovlivňuje i zdravé buňky, a proto je tato léčba pro organismus velkou zátěží. Aktinoterapie je možné využít jednak u případů, kdy je cílem terapie úplné vyléčení, tak i v případech, kdy naprosté odstranění onemoc-



Obrázek 2.2: Tracheostomie

nění není možné. V druhém případě je metoda využívána k prodloužení a zkvalitnění života [1].

Aktinoterapii je možné využít jako hlavní léčebnou metodu (primární aktinoterapie) nebo i ve spojení s ostatními metodami. V případě primární se k léčbě využívá pouze ozařování a cílem je úplné odstranění všech defektních buněk. Z podstaty metody, zejména dopadů léčby na lidský organismus, je zřejmé, že tímto způsobem je ve většině případů možno léčit pouze malé nádory.

Ve spojení s chirurgickou léčbou rozlišujeme předoperační, pooperační nebo tzv. sandwich (tj. před a po chirurgickém zákroku) aktinoterapii. Předoperační ozařování je užíváno v případech, kdy není možné původní nádor vyoperovat. Cílem je zmenšení tumoru do takové míry, aby jej bylo možné chirurgicky odstranit. Někdy je předoperační ozařování spojeno s chemoterapií. U pooperační aktinoterapie je záměrem odstranění potencionálních mikroskopických zbytků tumoru, které by mohly znovu začít růst.

Velmi často se ve spojení s léčbou rakoviny mluví i o proceduře zvané **chemoterapie**. Podstatou je podávání léků zastavujících buněčné dělení, tzv. cytostatik. Zjednodušeně řečeno se jedná o velmi toxický koktejl látek sloužící k zahubení buňky tím, že poškodí určitou její část a zastaví tak proces dělení. Na tuto léčbu jsou citlivé převážně rychle se dělící buňky. Právě defektní buňky v tumoru mají obvykle určitým způsobem poškozeny opravné mechanismy a cytostatiky zasažená rakovinná buňka tak s větší pravděpodobností zahyne. Samozřejmě nelze u chemoterapie hovořit o přesně zacílené léčbě. Cytostatika postihují všechny buňky v lidském těle, a proto je možná namíste srovnání s kobercovým bombardováním. S aplikací cytostatik je tak spojena celá řada vedlejších rizik. Mezi nejzávažnější patří poškození ledvin nebo poškození krvetvorby.

Z výše uvedeného je zřejmé, že postižená osoba má velkou šanci na kompletní vyléčení. V mnoha případech má však pacient trvalé následky (trvalá ztráta hlasu) z důvodu podcenění prvotních příznaků vážného onemocnění.

2.2 Rehabilitace hlasu po totální laryngektomii

Nesporná výhoda totální laryngektomie neoddiskutovatelně spočívá v likvidaci primárního nádorového onemocnění. Následky operace však s sebou nesou obrovský zásah do kvality života pacienta. Okem nejviditelnější změnu představuje přítomnost tracheostomie a s ní spojený způsob dýchání. Tato skutečnost má spoustu, na první pohled ne úplně očividných, následků. Postižený člověk ztrácí přirozené zvlhčování, ohřev a filtraci vdechovaného vzduchu, jež má za následek vyšší náchylnost k respiračním onemocněním. Příčina spočívá v průchodu vzduchu do průdušnice přes tracheostomii a nikoli přes nosní dutiny.

Pro samotného pacienta je však nejspíše nejobtížnější se vypořádat s trvalou ztrátou vlastního hlasu. Z tohoto důvodu se již samotný autor procedury doktor Billroth

zaobíral otázkou rehabilitace hlasu. Jeho první pokusy s kovovou tracheostomickou kanylou sice umožňovaly pacientovi hovořit, ale svou konstrukcí pacienta spíše ohrožovaly na životě [4]. Proto se více uchytila metoda tzv. jícnového hlasu [5]. Ve stejnou dobu, tedy přibližně začátkem minulého století, se začaly objevovat první interní a externí hlasové aparáty. V současnosti je rehabilitace hlasu možná pomocí:

- **foniatických metod**, mezi které patří jícnový hlas a elektrolarynx,
- **chirurgicko-protetickým způsobem**, který spočívá ve vytvoření kanálku skrze stěnu mezi průdušnicí a jícnem,
- **vytvoření hrtanu podobných struktur chirurgickým způsobem**,
- **transplantace hrtanu**.

Z uvedeného výčtu se může zdát, že máme k dispozici relativně širokou škálu možností, jak pacientovi vrátit schopnost vyjadřování pomocí mluvené řeči. Ovšem je nutné si uvědomit, že je potřeba volit konkrétní metodu podle stavu a možností pacienta. Jinými slovy, ne každá metoda se hodí pro každého pacienta a žádná z metod není univerzální pro všechny pacienty.

2.2.1 Foniatické metody

Ačkoli odstranění hrtanu vyústí ve ztrátu hlasu, neznamena to, že by byla úplně eliminována schopnost produkovat řeč. V procesu vytváření hlasu zastává odstraněný orgán pouze (i když velmi zásadní) roli generátoru zvuku. Zbylé orgány (hrdelní, nosní a ústní dutina a další) zůstávají nedotčeny a mohou i nadále plnit svou funkci. Logicky se tak nabízí myšlenka nahradit chybějící zdroj zvuku jiným. Mezi nejpoužívanější metody patří jícnový hlas a elektrolarynx.

Jícnový hlas

Počátek této metody se datuje do roku 1922, kdy si prof. MUDr. Miloslav Seeman [6] uvědomil, že funkci štěrbiny mezi hlasivkami (rima glottidis) přebírá tzv. pseudo-glottis, která se vytváří na úrovni horního jícnového svěrače. Zároveň vypracoval a popsal metodiku vytváření jícnového hlasu, při které se vzduch neplní do plic, ale do jícnu. Tato metoda se nazývá **aspirační**. Princip spočívá v aktivním otevření jícnového svěrače, nasáváním a vtlačováním vzduchu do jícnu pomocí polykání. Naplněním jícnu vzduchem si pacient připravuje potřebný vzduch k následné eruktaci² vzduchu a produkci řeči. Vlastní jícnový hlas poté vzniká na přechodu jícnu a hypofaryngu (spodní část hltanu). V této oblasti horního jícnového zúžení dochází k rozkmitání sliznice a podslizniční vrstvy a produkci zvuku, který je následně modulován stejně jako v případě přirozené produkce řeči. Princip tvorby „základního“ tónu jícnového hlasu je znázorněn na obr. 2.3.



Obrázek 2.3: Princip tvorby jícnového hlasu. Průchodem vzduchu přes zúžení vzniká základní tón jícnového hlasu.

²eruktace - latinsky název pro proces říhání (popřípadě krkání), při kterém dochází k úniku plynů pocházejících ze žaludku dutinou ústní.

Kromě aspirační metody je ještě možné se setkat s metodou **injekční**. Hlavní rozdíl spočívá v principu plnění vzduchu do jícnu. Při aspirační metodě se využívá polykání, zatímco v tomto případě je využito kořene jazyka, kterým je vzduch vtlačován do jícnu. Následný princip produkce hlasu je již shodný s původní metodou. S tímto principem se můžeme setkat u pacientů, kterým byla při laryngektomii odstraněna jazylka a aspirační náplň není možná.

Proces učení jícnového hlasu by měl začít co možná nejdříve po operaci. Pokud je to možné, tak se s výukou začíná ještě za pobytu pacienta na ORL klinice nebo krátce po propuštění. V první fázi se pacient učí pouze slabiky sestávající z explosivy a souhlásky. Postupně se však přidávají slabičné shluky, které sice nedávají smysl, ale pomáhají v osvojení potřebné techniky. V případě úspěšného zvládnutí se přistupuje k nácviku frází a souvislé řeči. Potřebnou dobu k nácviku jícnového hlasu nelze přesně určit, protože je závislá na mnoha faktorech. V literatuře se uvádí, že je potřeba 30 až 50 hodin velmi intenzivního tréninku k osvojení jícnového hlasu.

Míra úspěšnosti nácviku srozumitelného hlasu se uvádí v rozsahu od 14% do 75%. Takto obrovský rozsah značí o mnoha faktorech, které mohou ovlivnit úspěšné osvojení jícnového hlasu. Mezi možné příčiny neúspěchu patří fyziologické nebo anatomické problémy, psychologické problémy, nebo jednoduše neadekvátní podpora při řečové terapii [7]. Velkou roli také hraje snaha a odhodlání samotného pacienta.

Nepopíratelnou výhodou této techniky rehabilitace je nezávislost pacienta na lékaři po úspěšném osvojení jícnového hlasu a permanentní oddělení dýchacích a polykacích cest bez rizika vniknutí potravy do dýchacích cest. Mezi nesporné výhody také patří volné ruce při vytváření řeči. Za nevýhody se obecně považuje srozumitelnost produkovaného hlasu. Je to způsobeno jednak „břišním“ zabarvením, které je už z podstaty metody přítomné, a dále také nízkou intenzitou a krátkou výdrží při tvorbě tónu. Za negativum se dá také považovat množství pacientem vynaloženého úsilí potřebného k osvojení techniky. Velmi často se také mluvčí ostýchají jícnový

hlas používat, protože mají pocit, že je společensky nevhodné dorozumívat se formou blízkoúhlového říhání. Z tohoto důvodu se odhaduje, že v běžném životě využívá jícnový hlas pouze 20 až 30% pacientů, kteří se začali tuto techniku učit [8].

Elektrolarynx

Rehabilitace hlasu pomocí elektrolarynxu se řadí mezi tzv. elektromechanické metody. Princip spočívá v přikládání zařízení, které obsahuje generátor zvuku nazývaný elektrolarynx. Přiložením do oblasti spodiny úst a aktivací zařízení se generovaný zvuk a vibrace přenášejí do dutiny ústní a dalších přilehlých artikulačních orgánů. Následnou artikulací je pacient schopen hovořit. Znázorněno na obr. 2.4.



Obrázek 2.4: Princip rehabilitace hlasu pomocí elektrolarynxu.

Takto generovaná řeč se vyznačuje několika charakteristickými rysy. V první řadě řeč budí velmi mechanický dojem. Důvodem je samozřejmě samotný elektrolarynx, jelikož se jedná o elektromechanický generátor zvuku s konstantním buzením, je také základní frekvence produkovaného hlasu více či méně konstantní. Řečník tak má velmi

omezené možnosti, jak řeč emotivně zabarvovat. V průběhu času se objevily snahy průběžně měnit frekvenci zařízení a tím ovlivňovat základní frekvenci produkované řeči [9, 10, 11]. Hlavním problémem všech těchto zařízení je docílit změnu fundamentální frekvence na základě toho, co chce řečník říci. V současné době existují pouze experimentální zařízení, která umožňují ve velmi omezené míře změnu frekvence [12]. Další charakteristický rys představuje nižší srozumitelnost řeči, která se ještě snižuje s rostoucím okolním hlukem. Velmi často se stává, že posluchač, který se s takto produkovanou řečí setkává poprvé, není schopen plně porozumět. Se srozumitelností souvisí i další charakteristický rys, kterým je přítomnost zvukového podkresu produkovaného samotným přístrojem.

Za hlavní výhodu elektrolarynxu se považuje rychlost osvojení schopnosti produkovat řeč. Zároveň je tato metoda vhodná pro téměř všechny pacienty postižené ztrátou hlasu způsobenou léčbou karcinomu hrtanu. Z tohoto důvodu se hojně užívá u pacientů, kteří si neosvojili jícnový hlas nebo u nich není možné využití ostatních chirurgických metod. Za nevýhody se obecně pokládá kvalita produkované řeči, tedy monotonní a mechanicky znějící hlas. Dále potom zaměstnání jedné ruky držením nebo spouštěním zařízení.

Samostatnou kapitolou může být psychologický dopad na pacienta. Stejně jako u jícnového hlasu se řeč produkovaná pomocí elektrolarynxu jeví odlišně od řeči přirozené. Navíc se ještě přidává potřeba využití nějakého zařízení. Člověk proto v mnoha případech cítí ostych a bojí se na veřejnosti mluvit.

2.2.2 Chirurgicko-protetická metoda

Další možnost rehabilitace hlasu představuje tracheoezofageální (zkr. TE) protéza. První zmínka o vytvoření fistule³ mezi průdušnicí a jícnem pochází z roku 1932.

³fistule (česky píštěl) je abnormální otvor mezi dvěma dutými orgány, nebo mezi dutým orgánem a kůží.

V tomto roce doktor Guttman poprvé vytvořil tracheoezofageální shunt⁴ („umělá píštěl“). Hlavní myšlenka spočívá ve vytvoření cesty prostřednictvím píštěle, pomocí které u tracheostomovaného člověka může proudit vzduch z plic do úst. Za normálních okolností vzduch proudí skrze tracheostomii a do úst se tak nedostane. Zacpe-li si pacient stomu, může proud vzduchu proudit skrze píštěl do úst. Vzduch procházející přes fistuli naráží do stěn jícnu a je rozvibrován. Tyto vibrace jsou následně modulovány pomocí artikulačních ústrojí a tak vzniká řeč. Tento ojedinělý zákrok otevřel cestu k chirurgické hlasové rehabilitaci. Vzniklo několik operačních metod, které se navzájem lišili víceméně jen umístěním fistule [4].

Hlavní snahou chirurgů bylo vytvoření bezpečné, správně nasměrované píštěle umožňující tvorbu hlasu. Bohužel v mnoha případech byly tyto zákroky spojené s vážnými komplikacemi (infekce, zápalý či těžká krvácení). Důležitým problémem, se kterým se jednotliví tvůrci museli vypořádat, byla stálost vytvořeného otvoru tak, aby jím neprotékaly tekutiny špatným směrem a nedocházelo k zatékání do dýchacích cest a orgánů. Jelikož se jednalo o velmi náročné techniky, a bylo s nimi spojeno velké množství rizik, došlo v 80.letech 20.století k opadnutí snah tyto metody aplikovat.

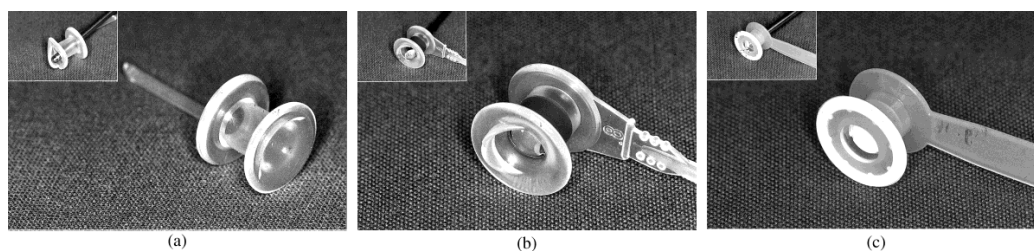
Svou renesanci zažily s vložením jednocestného ventilu, který umožňoval pouze jednosměrný průchod tekutin skrze píštěl, jak je ilustrováno na obr. 2.5. První komerčně dostupná protéza se objevila v 80.letech 20.století v USA. Na obr. 2.6 jsou zobrazeny příklady různých typů protéz. Na používané protézy jsou kladeny přísné nároky a musí vyhovovat určitým požadavkům. Předně se musí vyrábět z biokompatibilního materiálu, který odolává biodegradaci. Tím je zaručena dlouhodobá trvanlivost a správná funkce. Potřebný tlak k otevření faryngoezofageálního segmentu by měl být co nejnižší, aby bylo možné vytvářet plynulou řeč. První vyráběné protézy měly tento tlak příliš vysoký a omezovaly tak množinu potencionálních pacientů. Nejmodernější

⁴shunt - kanál, kterým je tekutina odkloněna z přirozené dráhy. Tento kanál může být vytvořen chirurgicky nebo pomocí syntetické trubice.

protézy se již vyznačují velmi nízkým otevíracím fonačním tlakem. V neposlední řadě by měla být protéza samofixační a snadno vyměnitelná.



Obrázek 2.5: Průchod vzduchu tracheoezofageální protézou.



Obrázek 2.6: Ilustrace používaných TE protéz (a) Gronigenova nízkotlaká protéza, (b) Provox2 a (c) Blom-Singer protéza.

V praxi se používá několik druhů protéz. Hlavním rozdílem mezi nimi však je zda se pacient přímo účastní výměny ventilu, jehož fundamentální funkcí je vytvoření průchodu pro vzduch proudící z průdušnice do jícnu. U protéz, které jsou vyměňovány operačně, se doba používání pohybuje od 3 do 6 měsíců. Tento interval velmi významně ovlivňuje tvorba biofilmu na povrchu náhrady. K tvorbě dochází následkem přímého kontaktu protézy s tělními tekutinami a potravou. Rychlost tvorby biofilmu

ovlivňuje tvar a materiál, ze kterého je náhrada vytvořena [13]. U typů, které si nositel může měnit sám, se předpokládá, že budou čištěny nebo měněny přibližně jednou za dva týdny.

Samotný zákrok zavedení protézy je možné provést zároveň s výkonem totální laryngektomie (tzv. primární zavedení hlasové protézy) nebo až po zotavení pacienta z náročné léčby nádorového onemocnění (tzv. sekundární zavedení). Primární zavedení umožňuje začít s hlasovou rehabilitací krátce po odstranění hrtanu. Zároveň pacient nemusí v krátké době podstupovat druhou operaci, při které by se vkládal jednocestný ventil do vytvořené fistule.

V praxi se ukázalo, že úspěšnost rehabilitace je více než 80% [14]. Důležitým faktorem, stejně jako u jícnového hlasu, je funkčnost faryngozofageálního segmentu. Dále také otevírací tlak horního jícnového svěrače. Hlas tvořený protézou se vyznačuje vysokou kvalitou, dobrou srozumitelností, individuálním zabarvením a relativně dlouhou fonační dobou dosahující průměrně 20 sekund [15]. Oproti jícnovému hlasu není potřeba tak intenzivní edukace pacienta k plnému osvojení hlasu. V současnosti se jedná o nejpoužívanější metodu rehabilitace hlasu.

2.2.3 Hrtanu podobné struktury

S rozvojem mikrovaskulárních⁵ transplantátů se začaly objevovat postupy, které umožňovaly rehabilitovat hlas pouze pomocí chirurgického zákroku. Tyto techniky umožňují permanentní spojení hypofaryngu s tracheou pomocí vlastní tkáně pacienta.

První takovouto metodu představil v roce 1984 doktor Ehrenberger [4], který popsal tzv. „řečový sífón“ (angl. **speech siphon**). Tento sífón je vytvořen z části tenkého střeva zvané lačník (jejunum). Spojení mezi hrtanem a hltanem je dvakrát esovitě zahnuto tak, aby bylo minimalizováno riziko sekundární aspirace. Schéma „řečového sífónu“ podle Ehrenberga je znázorněno na obr. 2.7 A. Již na první pohled

⁵mikrovaskulární - část oběhového systému složeného z nejmenších cév, jako jsou kapiláry, žilky aj.

je zřejmé, že se jedná o velmi náročný chirurgický zákrok. První články publikované autorským kolektivem prezentovaly velmi dobré funkční výsledky metody. Podle [5] bylo doposud operováno přibližně 60 pacientů.

V roce 1990 byla popsána laryngoplastika podle Hagena. V tomto případě se vytváří tzv. **neolarynx**, k jehož vytvoření se používá štěp z předloktí. Vnitřek neolaryngu je kryt kůží. Neoglottis je vyztužen chrupavkou a překrývá vchod do neolaryngu tak, aby nedocházelo k sekundární aspiraci. Laryngoplastika podle Hagena je znázorněna na obr. 2.7 B. Doposud bylo operováno přibližně 300 pacientů [5].



Obrázek 2.7: A) Schéma „řečového sifónu“ tak jak jej představil Ehrenberg. B) Laryngoplastika podle Hagena

Bohužel v současné době tyto metody nenacházejí širší uplatnění. Především je to způsobeno chirurgickou náročností samotných metod, kvůli které se velmi těžko prosazují na dalších pracovištích. Dalším aspektem, který limituje tyto metody, je vliv na samotného pacienta. Metody předpokládají další chirurgický zákrok vykonaný po totální laryngektomii. Tento zákrok představuje další zátěž pro pacienta nemluvě o možných komplikacích. I přes nedostatky těchto metod je pochopitelná snaha lékařů o intenzivní výzkum v této oblasti. Při úspěšné léčbě je pacient schopen produkovat

hlas velmi dobré kvality a ve většině případů nepotřebuje žádnou péči ze strany lékařů ORL.

2.2.4 Transplantace hrtanu

Nejkomplexnější možnost rehabilitace hlasu představuje transplantace hrtanu. V tomto případě pacient obdrží implantovaný hrtan od dárce. Pokud je transplantace úspěšná, přebírá transplantovaný orgán plně funkci původního orgánu a velmi významně zvyšuje šance pacienta na plné zotavení bez trvalých následků.

První informace spojené s výzkumem možností provedení transplantace hrtanu se objevují již v 60. letech 20. století⁶. Přesto byla první totální hrtanová transplantace provedena až profesorem Marshalllem Stromem v roce 1998 [16] a do dnešních dnů byly provedeny pouze 2 kompletní transplantace.

Prvním pacientem, který podstoupil transplantaci, byl čtyřicetiletý muž z USA. K laryngektomii v jeho případě vedla motocyklová nehoda, při které si pacient rozdrtil hrtan. K incidentu došlo 20 let před transplantací. Před zákrokem používal k produkci řeči elektrolarynx. Dárcem orgánu byl taktéž čtyřicetiletý muž, který zemřel na mozkové aneurysma. Úspěch transplantace se na příjemci projevil již třetí den po operaci, kdy poprvé po 20 letech promluvil (vyslovil anglické slovo „hello“). Přibližně po 36 měsících od transplantace byl produkován hlas srovnatelný s hlasem zdravého člověka. Podle vlastních slov pacienta se po operaci jeho kvalita života „nesmírně“ zlepšila. [17] Doposud poslední úspěšně vykonaná transplantace byla zaznamenána v říjnu 2010.

Mezi hlavní důvody takto malého počtu zákroků patří množství pacientů vhodných pro tuto proceduru. Jelikož se jedná o transplantaci dárcovského orgánu je nutné použití imunosupresiv, tedy medikamentů zabráňujících odmítnutí orgánu. Imunosupresiva jsou však v současné době nepoužitelná u lidí trpících rakovinou hrtanu z důvodu

⁶Vůbec první úspěšná transplantace orgánu (ledvin) se uskutečnila v roce 1954.

velmi vysokého rizika rozšíření rakoviny [16]. Další problém představuje náročnost samotného zákroku. Předně je potřeba provést reinervaci a obnovení krevního oběhu v implantovaném orgánu. U první provedené transplantace se nepodařilo dosáhnout kompletní reinervace. Výsledkem tak byl velmi kvalitní generovaný hlas, ale zároveň nebylo možné pomocí hrtanu zabezpečit bezproblémové dýchání a bylo proto nutné ponechat tracheostomii.

Poslední výzkum v oblasti imunosuprese však naznačuje, že by v dohledné době mohlo dojít k pokroku a umožnit transplantaci hrtanu i u lidí trpících rozsáhlou rakovinou v oblasti krku [16]. Prozatím je však tato metoda vhodná pro pacienty netrpící rakovinou, případně ty, u kterých převažovaly benigní nádory a již 5 let nedošlo k recidivě.

2.2.5 Shrnutí

Rehabilitaci pacientů, kteří prodělali chirurgické odstranění hrtanu, je ve vyspělých zemích věnována značná pozornost, jelikož následky této operace, oproti jiným druhům léčby, velmi významně ovlivňují kvalitu života pacientů. V první řadě se léčení musí vyrovnat se ztrátou hlasu. Tato situace je již sama o sobě velmi náročnou psychickou zkouškou. Ztráta hlasu je však pouze jedním z vícero problémů, se kterými je potřeba se vypořádat. Mezi další patří možná ztráta čichu či vyšší náchylnost k respiračním onemocněním. Neméně významnou roli sehrává i fyzická odlišnost a z toho pramenící psychická zátěž pacienta po absolvované léčbě.

V současnosti nejpoužívanějšími metodami rehabilitace hlasu jsou **tracheoezofageální píštěl** (popsáno v části 2.2.2), **jícnový hlas** (2.2.1) a použití **elektrolarynxu** (2.2.1). Existují samozřejmě i další a přehled v současnosti používaných je uveden v tab. 2.1.

Většina pacientů je tedy rehabilitována pomocí tracheoezofageálního píštěle, který principiálně vychází z jícnového hlasu, jehož negativa se snaží eliminovat. O úspěchu

	Kvalita	Výhody	Nevýhody
Tracheoezofageální píštěl	Vysoká	Vysoká míra osvojení, dlouhá fonační doba	Zanášení píštěle a s ním spojené čištění, případně dodatečná lékařská péče
Jícnový hlas	Dobrá	Volné ruce při mluvení, není potřeba dodatečné lékařské péče	Velmi náročná metoda k naučení, nepřirozený hlas
Elektrolarynx	Nízká	Snadné k naučení	Monotonní až robotický hlas, nutné nosit externí elektrické zařízení
Hrtanu podobné struktury	Vysoká	Nezávislost pacienta na pravidelné lékařské péči	Velmi náročná chirurgická procedura, která pacienta vystavuje dalším možným rizikům
Transplantace hrtanu	Velmi vysoká	Transplantovaný hrtan přejímá funkci odstraněného orgánu	Velmi náročná chirurgická procedura, která je vhodná jen pro malé procento pacientů

Tabulka 2.1: Přehled dostupných metod rehabilitace hlasu

rehabilitace, stejně jako u jícnového hlasu, tak především rozhodují vlastnosti faryngoezofageálního segmentu. Pokud pacient není schopen si osvojit jícnový hlas, případně nemá voperován píštěl, je použit elektrolarynx. Bohužel tyto metody neřeší další problémy spojené s odstraněním hrtanu, a proto se lékaři stále snaží zdokonalovat rehabilitační metody. Za nejkomplexnější se dá považovat úplná transplantace hrtanu, která řeší víceméně všechny problémy spojené s odstraněním hrtanu. Bohužel tento zákrok je velmi náročný a vhodný pouze pro malou část pacientů. I když je tedy

v současné době lékařská věda schopna rehabilitovat hlas, tak zde zůstává otevřený prostor pro inovace a tím zlepšení kvality života lidí postižených ztrátou hrtanu.

Kapitola 3

Řečová rozhraní

Jedním z hlavních důsledků TL (popsané v [xx]) je ztráta hlasivek a tím i hlasu.

TBD

Problematikou komunikace pomocí mluvené řeči i v situacích, kdy akustický řečový signál není k dispozici, se zabývají systémy zpracovávající „tichou“ řeč (angl. Silent speech interface, zkr. SSI). Ve většině případů se snaží získat informaci, která je normálně zakódována v akustickém signálu získat jinou cestou.

Produkce mluvené řeči je komplexní proces, který začíná v možku a končí produkcí slyšitelného zvuku. Pokud odstraníme komponentu starající se o vznik zvuku, ještě to neznamena, že i ostatní komponenty také ztrácejí svou funkci. Tento fakt je základní premisou pro funkci všech v současnosti vyvíjených SSI systémů.

- lehce popsat technické přístupy
 - NAM
 - magnety
 - brain interface

Kapitola 4

Experimenty

V předchozích sekcích bylo zmíněno, že velmi významný problém představuje psychologický faktor ztráty hlasu. Ten sebou nese i na první pohled néúplně zřejmou komplikaci. A tou je obtížnost získávání řečníků po TL, kteří jsou ochotní spolupracovat na výzkumu.

Jedním z možných řešení je, že se výzkumníci sami naučí používat jednu z výše [c4l1])zmíněných metod produkce řeči. Pro účely našeho výzkumu a rámec této práce by se jednalo o elektrolarynx. I když se tato možnost jeví poměrně jednoduše, tak zdání klame. Přestože je zdravý řečník schopen obstojně mluvit (pomocí EL), za relativně krátkou dobu tak k tomu, aby produkováná řeč svými parametry odpovídala zkušenému řečníkovi po TL, je potřeba relativně dlouhá doba.

V našem případě se podařilo získat pouze jednoho zkušeného řečníka¹, který podstoupil TL před více než 15 lety a EL používá aktivně každý den. Je to jeho jediná možnost jak produkovat slyšitelnou řeč.

Díky spolupráci s tímto řečníkem jsme byli schopni získat cca 15 hodin promluv (více o získaných datech v 4.1 a 4.2), které byly použity pro všechny dosavadní experimenty. Z pohledu standardních obecných systémů rozpoznávání řeči se to může

¹Jedná se o ženu v důchodovém věku, která ale stále působí na akademické půdě a jednou za čas i přednáší.

jevit jako velmi malé množství, ale jak ukáží následné experimenty, tak to není velký problém. Jelikož už před prvními experimenty se jevílo jako prozaičtější vytvářet individuální modely pro každého řečníka a výsledky experimentů toto jen podpořily.

Při rozhovorech s řečníkem se potvrdil psychický aspekt ztráty hlasu na člověka po TL. Konkrétní osoba ještě dlouhá léta po operaci nebyla schopna telefonovat, natož mluvit na veřejnosti. Kvalita života se tímto velmi snížila a trvalo prý velmi dlouhou dobu, než se daná osoba odvážila i jen odpovědět na nečekaný telefonní hovor. To pro nás představovalo nezanedbatelnou porci motivace v práci.

V následujícím textu si přiblížíme a zanalyzujeme pořízená data (4.1) a na základě těchto prvotních experimentů nadefinujeme cíle a určíme další postup. V části (4.2) si popíšeme normalizaci dat a porovnáme schopnosti člověka a stroje. V sekci 4.3 rozebereme prvotní ověřovací experimenty s upravenými daty a v sekci 4.4 představíme výsledky modelů zohledňujících i délku fónému.

4.1 Analýza dat a první modely

Rozpoznávání řeči se věnuje nemalé usílí již od 50. let 20. století a v současné době nikoho nepřekvapí téměř bezchybně fungující obecný rozpoznávač v mobilních zařízeních. Pro obecné systémy dokonce existují korpusy s desítkami či stovkami a více hodin promluv, které je možné využít při vytváření těchto systémů.

Tyto korpusy však obsahují ve většině případů pouze „standardní“² řeč. Pokud je snaha vytvořit nebo ověřit funkčnost systému za specifických podmínek (ať už se jedná o rušné prostředí či speciální typy promluv), tak je nezbytné získat potřebná data.

²Slovením spojením „standardní řeč“ je myšlena řeč neobsahující výrazné řečové vady, případně jiné formy produkce a často v nepříliš akusticky náročném prostředí.

4.1.1 Vytvoření korpusu EL promluv

Na začátku byla idea o pomoci skupině lidí mající problémy s přirozenou řečí. Vůbec prvním předpokladem, na cestě k úspěšnému dosažení vůbec nějakého cíle, jsou data. Jelikož se jedná o velmi specifická data, tak je potřeba zajistit co možná největší množství kvalitních³ a přesných dat.

V části 2.1 bylo zmíněno, že ročně se objeví více než 100 nových případů trvalé ztráty hlasu ročně. Zároveň bylo řečeno [2], že více rizikovými osobami jsou starší lidé, kteří intenzivně kouří a konzumují alkohol. Přesto je patrný trend snižujícího se věku pacientů a s tím souvisejícím nárůstem případů ztráty hlasu. Přičteme-li již zmíněný psychologický aspekt jeho ztráty, tak je zřejmé, jak komplikované je získat ke spolupráci i jen jednoho řečníka ochotného podstoupit naročné⁴ nahrávání.

Při libovolné práci s pacienty po TL, dřív nebo později dojde k určité formě spolupráce s oddělením ORL, které má na starosti péči o tyto pacienty. V našem případě nejprve s ORL klinikou při Fakultní nemocnici v Plzni a poté i s ORL klinikou Fakultní nemocnice v Motole. S jejich pomocí jsme získali ke spolupráci jednoho řečníka. Konkrétně se jedná o dámu v duchodovém věku, která podstoupila TL před více než 15 lety. Po překonání ostychu⁵ se byla schopna naplno vrátit do běžného života a dokonce v určité formě opět přednášet o stomatologii na Lékařské fakultě v Plzni Univerzity Karlovy.

S její pomocí jsem, v 1. etapě nahrávání, byli schopni pořídit přes 10 hodin promluv, viz tab. 4.1. Nahrávání probíhala v relativně spartánských podmínkách za plného běžného provozu katedry. Přesto získaná data neobsahují žádný nežadoucí ruch, kromě toho produkovaného samotným EL.

³Kvalitou je myšlena věrnost dat dané doméně, dále se mluví o přesnosti ve smyslu bezchybnosti přepisů.

⁴I pro zdravého člověka je někdy několikahodinové nahrávání vysilující. Pro jedince po TL to je z mnoha důvodů ještě řádově náročnější.

⁵Podle jejích vlastních slov nebyla schopna několik let po operaci ani zvednout nečekaný telefonní hovor, natož mluvit na veřejnosti.

Nahravací aparátura sestávala z miniaturního profesionálního mikrofону (DPA d:screet 4061-FM), zesilovačem (DPA MMA6000), externí zvukovou kartou a běžného notebooku. Mikrofon byl pomocí bezpolštářkové náplasti přilepen poblíž pravého koutku úst, abychom zaznamenaná řeč měla co možná nejvyšší kvalitu.

Celé nahrávání bylo v 1. etapě rozděleno do 14 samostatných sezení a probíhalo od prosince roku 2010 do května roku 2011. Každé sezení trvalo přibližně dvě hodiny během kterých se podařilo získat necelou hodinu akustických dat. Samotné nahrávání se sestávalo z 10 - 20 minutového úseku pořizování nahrávky a přibližně 10 minut dlouhého odpočinku. Ten byl nezbytný hlavně z důvodu únavy řečníka.

Ještě před samotným nahráváním byly pečlivě vybrány a vytvořeny 2 sady vět:

1. sada obsahující všechny možné české fonémy - *40 vět*.
2. sada obsahující věty s reálnou četností fonémů - *5000 vět* [18].

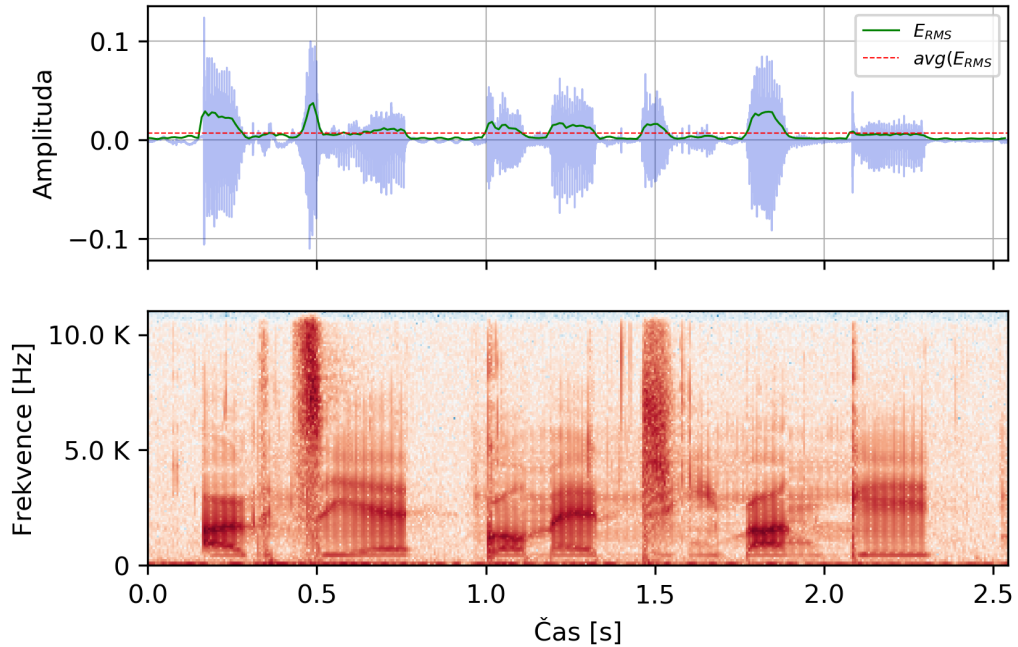
Pořízené nahrávky vždy odpovídají 10 - 20 minutovému úseku nepřerušovaného nahrávání a soubory tak vždy obsahují několik vět. Ty jsou od sebe odděleny minimálně 5 sekundovým úsekem ticha. Nahrávky dále mohou obsahovat opakování chybně vyslovené věty, přeréknutí, kýchnutí a další neřečové události. Z tohoto důvodu bylo nezbytné pořízené nahrávky anotovat, přestože byly pořízené na základě připravené sady vět.

Ještě před samotným anotováním byly nahrávky, podle úseků s tichem, rozsekány na menší části. V tomto případě úplně dobře nefungovali⁶ standardně používané sofistikovanější metody pro voice activity detection (angl. zkratka VAD), a proto bylo využito principu energie. Pro každou nahrávku obsahující více vět se pomocí vzorce

$$E_{RMS}(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|^2}, \quad (4.1)$$

⁶Problémem byl zvuk EL, se kterým nebylo při návrhu VAD počítáno.

kde N představuje počet vzorků v nahrávce a $x(n)$ představuje pravoúhlé okénko vzorku n . Pro tento případ se ukázalo jako vhodnější volit root-mean-square energy (E_{RMS}) a empiricky se ukázalo, že vhodná délka okénka je v rozmezí 10 – 100 ms. Na obr. 4.1 je zobrazena podoba audio signálu a spektrogram promluvy „*Akcie Komerční banky*“. Zároveň je zde vypočtené hodnoty energie a celková průměrná energie. Tyto hodnoty slouží pro určení míst kde začíná a končí věta. Na začátku a konci každé věty je dobré mít minimálně 0.5 s ticha. Tím pádem, pokud energie nějakého úseku x je $E_{RMS}(x) < avg(E_{RMS})$ a zároveň délka tohoto úseku $dur(x) \geq 1$ [s], tak nahrávku můžeme v tomto úseku rozdělit.



Obrázek 4.1: Průběh a spektrogram promluvy a vyznačenou energií EL promluvy.

Samozřejmě pokud řečník v průběhu věty z libovolného důvodu udělal větší pauzu než 1 s, tak tato věta byla rozdělena. Jelikož jsou výsledné kratší useky promluv následně anotovány, tak to nepředstavuje problém. Pro budoucí zpracování není podstatné zda promluva je opravdu celá věta, ale to jestli je tento úsek správně přepsán. Fakt, že některé věty jsou rozděleny je důvodem proč v tab. 4.1 více souborů než vět.

K anotaci posloužil interní nástroj určený k tomuto účelu a podíleli se na něm celkem 3 anotátoři z řad studentů, kteří si vzájemně kontrolovali své anotace. Ačkoli bylo potřeba anotovat relativně malé množství dat (cca 10 hodin audio záznamu), tak anotace zabrala přibližně 2 měsíce. Hlavním důvodem byla relativně dlouhá doba, po kterou se anotátoři adaptovali na specifická EL řeči. Problémem bylo to, že nejprve nebyli vůbec schopni porozumět obsahu promluvy a tím pádem jej správně přepsat.

Pokud je pro produkci řeči použit elektrolarynx, tak vedlejším produktem je neza-nedbatelný ruch způsobený samotným zařízením 2.2.1. Přeci jen jeho jedinou funkcí je vybudit vzduch v dutině ústní a tím umožnit produkci slyšitelné řeči. Z tohoto důvodu byly v průběhu anotace ignorovány v podstatě všechny skupiny neřečových událostí, protože většinu obsahu nahrávek by bylo nezbytné anotovat jako, že obsahují šum.

Výsledný korpus tedy představuje 5040 unikátních vět rozdělených do 6385 souborů (viz tab. 4.1), které v průměru obsahují 7 slov o průměrné délce 5 znaků. Tento korpus slouží jako základ pro všechny budoucí experimenty.

Nahrávání	Délka [HH:MM:SS]	Počet vět	Počet souborů
2010.12 - 2011.05	11:42:42	5040	6385

Tabulka 4.1: Infoemace o korpusu nahrávek z 1. etapy nahrávání.

4.1.2 Analýza získaných dat

Po dokončení anotace obsahuje korpus přes 10 hodin akustických záznamů promluv a více či méně přesných prepisů⁷. Když jsou k dispozici data je možné se podívat na specifika EL řeči a případně porovnat se zdravým řečníkem.

Pro potřeby porovnání byl použit začátek promluvy „*Akcje Komerční banky...*“. Tuta promluva je součástí standardní množiny vět používaných při vytváření řečových

⁷I přes nemalou snahu a několikastupňovou kontrolu, je téměř jisté, že by nebylo obtížné najít prepis, který obsahuje chybu například ve formě překlepu.

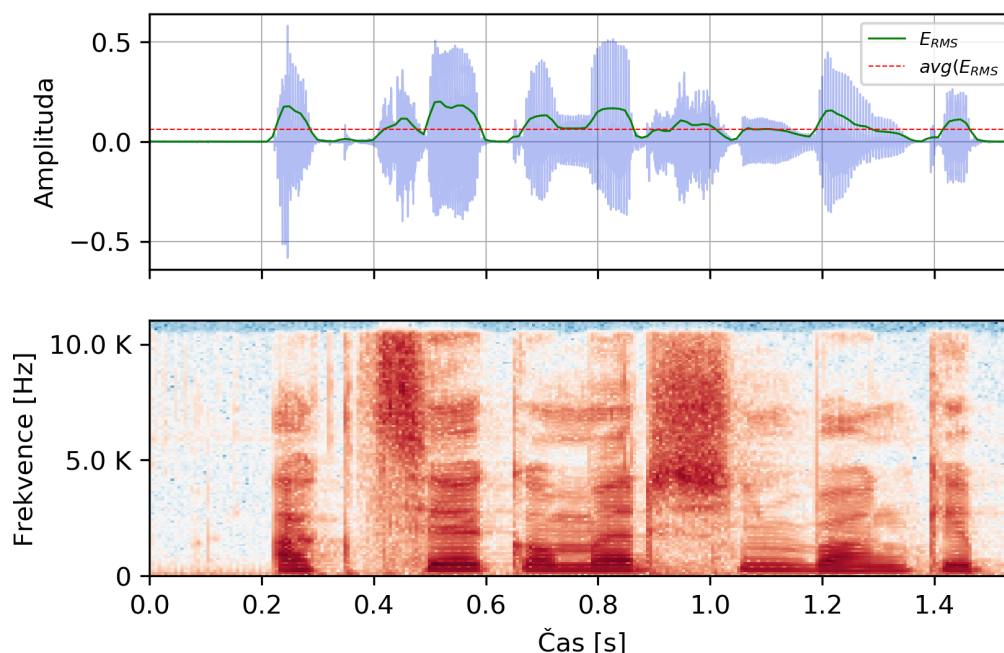
korpusů na KKY při ZČU. Tím pádem je k dispozici v relativně velkém množství příkladů pro zdravé řečníky a také je součástí korpusu EL řeči.

Na obr. 4.1 a 4.2 je zobrazen průběh signálu a spektrogram vybrané promluvy. Už na první pohled je možné zaznamenat určité rozdíly. Prvním takovým je délka promluvy, v případě zdravého řečníka je o celou 1 vteřinu kratší než v případě EL řeči. Tempo řeči je samozřejmě velmi individuální, ale z principu je EL řeč pomalejší. Z průběhu signálu na obr. 4.1 je patrné, že řečník dělá výraznější pauzy mezi jednotlivými slovy promluvy. To může být způsobené například potřebou naplnit jícen vzduchem. Po TL je dýchání realizováno přes tracheu a pokud nebyl voperován shunt (více v 2.2.2), tak je trvale oddělen hrtan a hltan. Přesto, pro produkci některých neznělých fonémů je potřeba exhalovat vzduch z dutiny ústní. Zkušený EL řečník to dělá naprosto automaticky, nicméně „polykání“ vzduchu zabere nějaký čas. Nevyhnutelným důsledkem je pak velmi častý výskyt samovolného říhání v průběhu promluvy⁸.

Dalším důvodem může být je nutnost správné artikulace. Při používání EL je to nezbytné, aby bylo produkováné řeči alespoň trochu dobře rozumnět. A pokud se dobře artikuluje, tak není snadné mluvit rychle. Při nahrávání bylo také velmmi běžné, že v průběhu promluvy řečník udělal pauzu, aby mohl lépe umístit EL, protože jeho umístění má velký vliv na kvalitu produkováné řeči. Nicméně je třeba říci, že tempo není a priori pro ASR systémy problém, protože různá délka fonémů je v relativně snadno modelována, např. v HMM přechodem ze stavu do stejného stavu.

Dalším způsobem jak ukázat rozdíly mezi promluvou zdravého řečníka a řečníka s EL je srovnání ve frekvenční oblasti. Pro větší názornost jsou na obr. 4.3 vedle sebe zobrazeno spektrum ukázková promluva zdravého řečníka (4.3a) a toho s EL (4.3b). Obsah obou promluv je identický a přesto jsou obě spektra odlišná.

⁸Fakt, že je říhání jako neřečová událost běžnou součástí téměř každé promluvy, vedl k ignorování těchto událostí během anotace.



Obrázek 4.2: Průběh a spektrogram promluvy a vyznačenou energií promluvy.

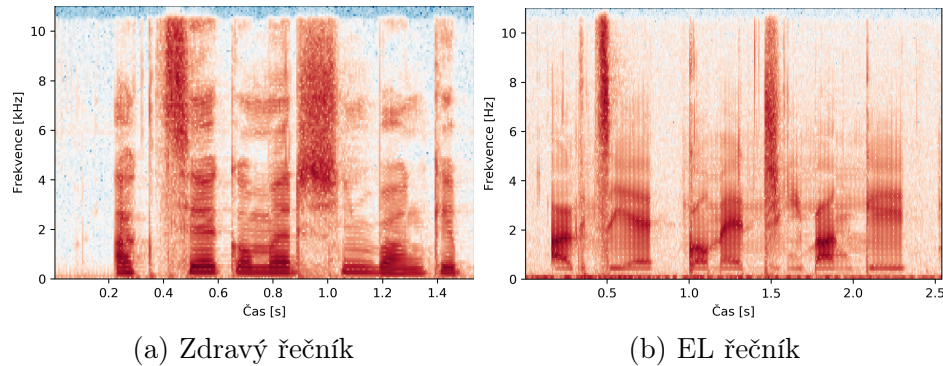
Prvním markantním rozdílem je mnohem větší zastoupení šumu v úsecích „ticha“ na obr. 4.3b. To je nepochybně způsobnemo samotným EL, který řečník nevypíná mezi jednotlivými slovy. Na obr. 4.1 je to také zřetelně patrný, zejména na průběhu energie, šum zejména před prvním a druhým slovem promluvy. Zajímavá je přítomnost šumu v celém frekvenčním spektru, přestože EL produkuje konstantní buzení. Toto buzení je ve spektru, na obr. 4.3b, viditelná jako výrazná souvislá linie v nízkých frekvencích. Přítomnost šumu ve vyšších frekvencích je způsobena umístěním mikrofonu, který je nalepen na pokožku a tím pádem snímá namodulované vibrace, přenášené měkkou tkání. Tento fakt se potvrdil v dalších etapách nahrávání (viz [porovnání](#)), kde byl použit studiový mikrofon vzdálený od úst minimálně 15 cm. Nicméně z pohledu použitelnosti nějakého budoucího systému je nezbytné počítat i se situací, kdy mikrofon bude zaznamenávat i vibrace přenášené tkání.

Dalším markantním rozdílem je absence vyšších frekvencí u většiny produkovaných fonémů. Vyjimku tvoří afrikáty /c/ a /č/, u kterých jsou hlasivky (u zdravého

přidat
zmínku o
tom, že
v dalších
etapách
to je kra-
pet jinak

jedince) v klidu a vznikají uvolněním nahromaděného vzduchu v dutině ústní⁹ [19]. V tomto případě není, u řečníka po TL, principiálně tento mechanismus produkce těchto fonémů ovlivněn. Problémem teoreticky může být zdroj vzduchu, jelikož jej z plic není možné dostat do dutiny ústní, ale jak už bylo zmíněno (a spektrogram to potvrzuje) zkušený uživatel EL se dokáže adaptovat.

Absence vyšších frekvencí se dá vysvětlit použitím EL, kde samotný EL má vždy konstantní frekvenci buzení a dále tím, že nedochází k modulaci v ve všech dutinách vokálního traktu. Nicméně nejdůležitější složky, zajišťující srozumitelnost, se vyskytují ve frekvenčním pásmu od 1 kHz do 3 kHz. Vyšší frekvence se a priori podílejí na zabarvení hlasu.



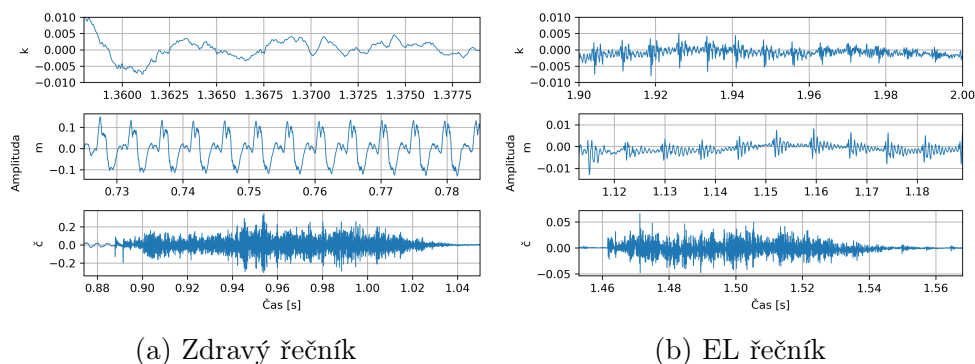
Obrázek 4.3: Spektrogram promluvy „Akcíe Komerční banky“ dvou řečníků.

Dalším způsobem jak porovnat řeč zdravého řečníka a tím s EL je pomocí analýzy jednotlivých fonémů. Na obr. 4.4 jsou zobrazeny průběhy amplitudy v čase¹⁰ pro fonémy /k/, /m/ a /č/. V případě /k/ a /m/ (1. a 2. průběh) se jedná o okluzivy, kde v prvním případě se jedná o neznělou plozivou a druhém o znělou plozivou. Tyto fonémy obecně vznikají uzavřením vydechovaného proudu vzduchu, pomocí artikulačních orgánů, což se projeví jako krátká pauza (tzv. okluze). Po té následuje náhlé jednorázové překážky a únik nahromaděného vzduchu, tzv. exploze [19]. Takto popsáno to samozřejmě funguje u zdravého jedince, ale u EL řečníka jde principiálně o

⁹Nahromadění vzduchu je realizováno přitisknutím jazyka k přední/zadní části horního patra.

¹⁰Hodnoty času, na obr. 4.4, odpovídají časům výskytu v původní promluvě.

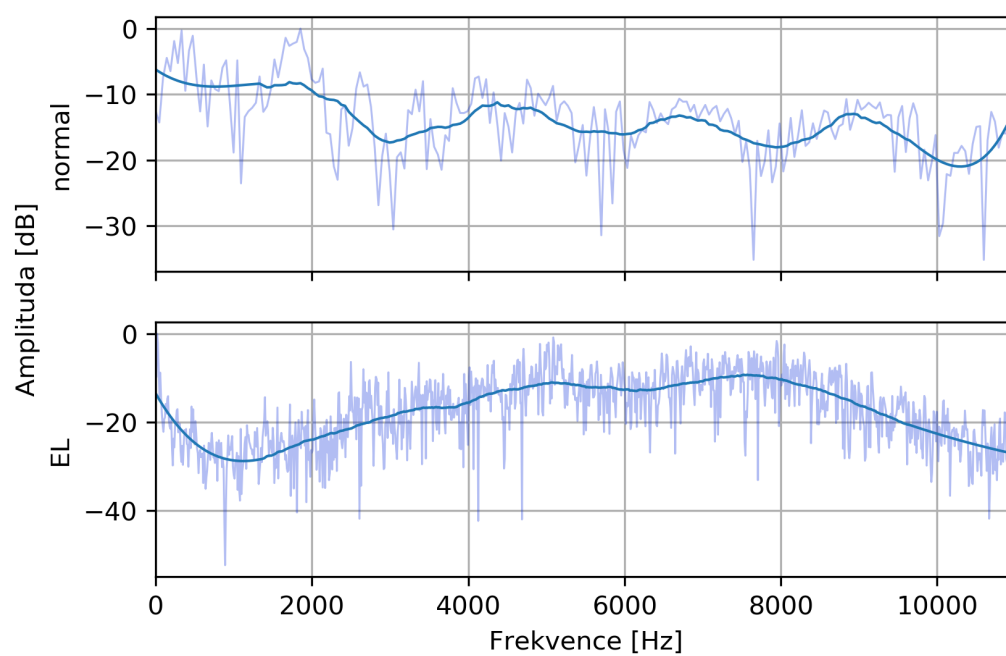
stejný mechanismus. S tím rozdílem, že vzduch nepochází z plic, ale z hltanu. Dalším rozdílem je samozřejmě absence hlasivek.



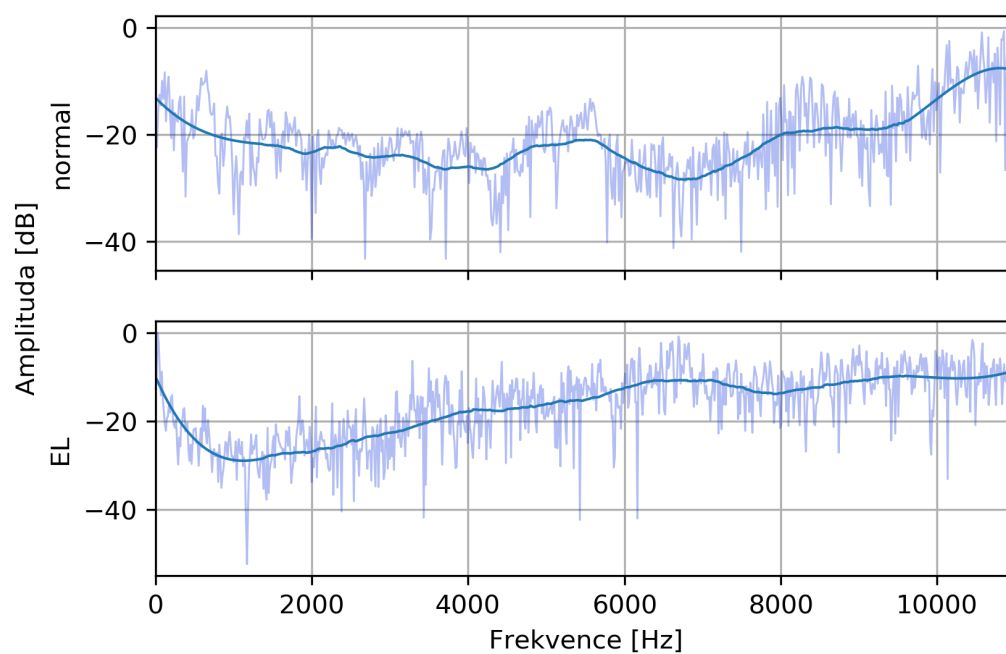
Obrázek 4.4: Ukázky průběhů amplitudy pro fonémy /k/, /m/ a /č/.

Foném /k/ představuje zástupce neznělých fonémů, ty se vyznačují tím, že do jejich produkce nezasahují hlasivky, které jsou v klidu. Zdrojem buzení je tedy šum. Pokud se podíváme na průběh amplitudy v čase u zdravého řečníka (obr. 4.4a), tak zde není vidět žádný periodický signál. Hlasivky jsou tedy opravdu v klidu. Oproti tomu u EL řečníka (obr. 4.4b) je jasně patrné, že je zde přítomno aktivní buzení vytvořené EL. Na obr. 4.5 je pak zobrazeno tzv. amplitudové spektrum, které znázorňuje vývoj amplitudy signálu ve frekvenci pro oba řečníky. V případě zdravého řečníka odpovídá vývoj očekávání tedy, že zde není žádná výrazná frekvence a také, že nedochází k výraznému útlumu. Přestože se v obou případech jedná o stejný foném, tak z časového i frekvenčního průběhu amplitudy je zřejmé, že parametry signálu se u obou řečníků diametrálně liší.

Jako druhý ukázkový foném slouží /m/. Opět se jedná o plosivu, ale v tomto případě o znělou. U těchto fonémů hrají velký vliv hlasivky, protože jsou zdrojem buzení. Z obr. 4.4a je krásně zřetelné buzení ve formě periodického průběhu amplitudy. Narozdíl tomu, u EL řečníka (obr. 4.4b) je také vidět periodický signál, ale úplně jiného průběhu. Svým způsobem dost podobný tomu, který je zřetelný u fonému /k/. Rozdíl je zřetelný i ve frekvenční oblasti (obr. 4.6), kdy u EL řečníka nedochází útlumu ve střední oblasti frekvenčního spektra.

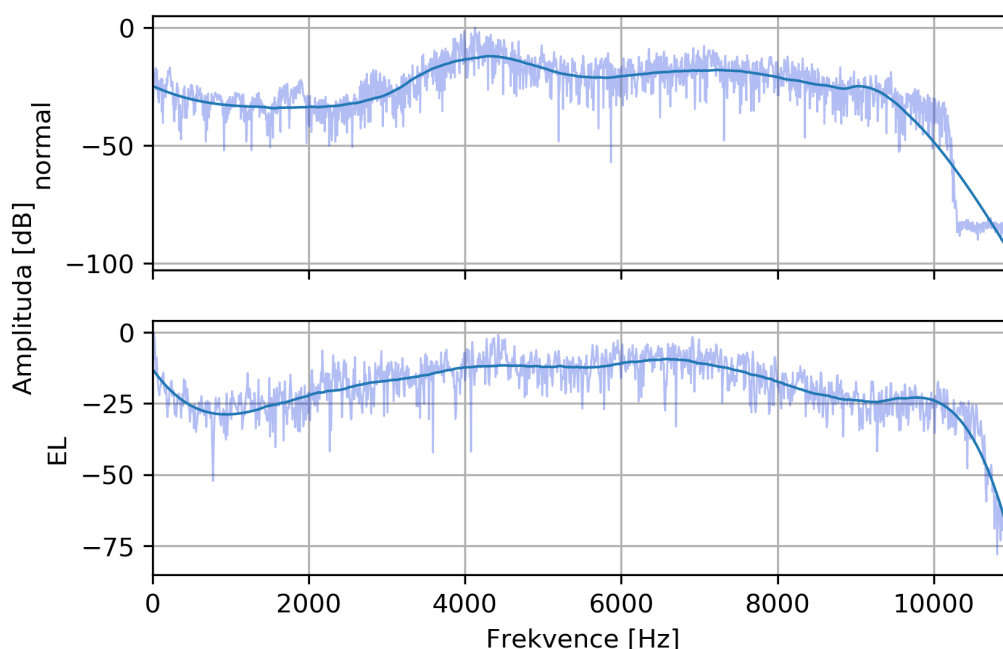


Obrázek 4.5: Vývoj amplitudy fonému /k/ ve frekvenci zdravého (horní) a EL (dolní) řečníka.



Obrázek 4.6: Vývoj amplitudy fonému /m/ ve frekvenci zdravého (horní) a EL (dolní) řečníka.

Posledním úkázkovým fonémem je již zmiňované /č/. Jedná se o neznělý foném, který vzniká přiložením jazyku k zadní části horního patra. Tím je zadržen vzduch v dutině ústní a vzniká krátká pauza. Uvolněním pak dochází k explozi a vytvoření zvuku. Do produkce se nezapojují hlasivky a produkovaný zvuk by měl být dostatečně intenzivní, aby jej (v případě EL řečníka) tolik neovlivňoval EL. Tím pádem by měl být průběh signálu, u obou řečníků podobný, a to jak v časové, tak i ve frekvenční oblasti. Na obr. 4.4 a 4.7 je pak jasně vidět, že se jedná o platný předpoklad.



Obrázek 4.7: Vývoj amplitudy fonému /č/ ve frekvenci zdravého (horní) a EL (dolní) řečníka.

Z doposud provedené analýzy plyne, že EL řeč je v mnoha charakteristikách odlišná od té produkované zdravým řečníkem. Zejména u porovnání ve frekvenční oblasti (obr. 4.5 a 4.6) je to nejvíce patrné. Tento fakt nepochybně přispívá k tomu, že standardní obecné modely rozpoznávání řeči nedosahují takové přesnosti jako v případě běžné promluvy.

Model	WER	
	8 kHz [%]	16 kHz [%]
GMM 1024	21.37	19.20
GMM 2048	20.45	18.91
GMM 4096	20.21	18.80

Tabulka 4.2: Vliv frekvence na kvalitu modelu.

4.1.3 Prvotní experimenty

4.1.4 Redukce fonetické sady

Při používání EL je přístroj v průběhu promluvy permanentně zapnutý a to i v případě neznělých fonémů. Rozdílný průběh těch neznělých je patrný na obr. 4.4. Nabízí se tak předpoklad, že všechny neznělé fonémy mají podobu znělých fonémů a tím pádem je možné redukovat fonetickou sadu. Teoreticky, pokud jsou všechny neznělé fonémy produkovány jako znělé, a je redukována fonetická sada, tak je snížena perplexita modelu a ten by měl být schopen pracovat s vyšší přesností.

K ověření tohoto předpokladu je potřeba experimentální ověření. Myšlenka experimentu je jednoduchá. Je potřeba natrénovat několik modelů, ty se liší pouze tím, jaký fonetický pár (viz tab. 4.3) byl použit pro redukcii fonetické sady. V rámci experimentu je jsou uvažovány tyto případy:

- *Baseline* - standardní model s plnou fonetickou sadou.
- $/f/ \rightarrow /v/$ - foném $/f/$ je nahrazen fonémem $/v/$.
- $/k/ \rightarrow /g/$ - foném $/k/$ je nahrazen fonémem $/g/$.
- $/s/ + /š/ \rightarrow /z/ + /ž/$ - foném $/s/$ ($/š/$) je nahrazen fonémem $/z/$ ($/ž/$).
- $/t/ + /ť/ \rightarrow /d/ + /ď/$ - foném $/t/$ ($/ť/$) je nahrazen fonémem $/d/$ ($/ď/$).
- *Náhrada všech* - všechny neznělé fonémy jsou nahrazeny znělým ekvivalentem.

Neznělé fonémy	Znělé fonémy
/f/	/v/
/k/	/g/
/s/	/z/
/š/	/ž/
/t/	/d/
/tʃ/	/dʒ/

Tabulka 4.3: Korespondující páry fonémů.

Pro porovnání jsou stejné modely vytvořeny i pro zdravého řečníka, protože v tomto případě by měl být, při libovolné redukci fonetické sady, horší než *baseline*.

K natrénování akustických modelů byly použity korpusy čítající 5000 vět¹¹ což představuje více než 10 hodin řeči pro každého řečníka. Akustická data byla parametrizována pomocí MFCC s 26 filtry a 12 keprstrálními koeficienty a energií. Dále vektor parametrů obsahoval delta a delta-delta příznaky. To dohromady dává vektor 39 příznaků pro každých 10 ms náhrávky [20].

V rámci experimentu byly otestovány dva přístupy vzájemně se lišící řečovou jednotkou. V prvním případě se jednalo o monofónový akustický model a v druhém trifónový. V obou případech byla řečová jednotka reprezentována třístavovým HMM modelem se spojitou výstupní pravděpodobnostní funkcí pro každý stav. Jelikož je pro češtinu množství trifónů opravdu velké, jsou využity fonetické rozhodovací stromy pro určení trifónů a korespondujících stavů. Pro určení optimálních parametrů modelu pro EL byly použity znalosti z části 4.1.3. Pro zdravého řečníka bylo pro každou část experimentu vytvořeno několik modelů lišící se počtem stavů a gaussovských směrů. Všechny akustické modely byly natrénovány pomocí HTK-Toolkitu v3.4. Celkem bylo vytvořeno 24 akustických modelů, 12 pro EL řečníka (6 monofónových a 6 trifónových) a 12 pro zdravého řečníka.

¹¹Pro oba řečníky byly použity stejné věty pocházející z databáze popsané v [18].

Pro otestování modelů byla vytvořena testovací sada čítající 500 vět náhodně vybraných z původních korpusů (pro oba řečníky stejná). Testovací sada tak představuje přibližně 1 hodinu řeči pro každého řečníka. Pro fungování ASR systému je potřeba, kromě akustického, i jazykový model. Ten určuje pravděpodobnost písmene/slova na základě předchozích pozorování. V rámci tohoto experimentu jsou uvažovány dva jazykové modely

1. *zerogramový jazykový model* - v tomto případě mají všechny slova v modelu stejnou pravděpodobnost $P_r(w_n|w_1, \dots, w_{n-1}) = \frac{1}{W}$, kde W je počet slov ve slovníku. V tomto případě $W = 2885$, jinými slovy perplexita modelu je 2885. Model naobsahuje OOV¹².
2. *trigramový jazykový model* - u tohoto modelu odpovídá pravděpodobnost následujícího slova $P_r(w_n|w_1, \dots, w_{n-1}) = p(w_n|w_{n-2}, w_{n-1})$. K získání $p(w_n|w_{n-2}, w_{n-1})$ posloužil SRILM Toolkit s Kneser-Ney vyhlazováním [21], které se podle [22] ukázalo jako optimální pro tyto typy modelů. Jako trénovací data byly použity texty z novinových článků, webových stránek a přepisů televizních pořadů. Celkem model obsahuje 360K nejvíce frekventovaných slov. OOV bylo 3.8% a perplexita 3380.

V kombinaci s vytvořenými akustickými modely to představuje 4 dílčí experimenty.

Tab. 4.4 a 4.5 zobrazují výsledky pro monofónový akustický model a zerogramový jazykový model, resp. trigramový jazykový model. V obou případech je vidět očekávané chování přesnosti modelu u zdravého řečníka. Ke konečné podobě fonetické sady se dospělo po dlouholetém výzkumu a počet fonémů je tak optimální. Redukcí fonetické sady je omezena komplexita modelu a tím pádem dochází ke zhoršení přesnosti. Překvapující může být horší výsledky u zdravého řečníka v tab. 4.5. Toto chování

¹²Out-of-vocabulary (OOV) - slova, která nejsou obsažena ve slovníku jazykového modelu.

může být vysvětleno vyšší perplexitou trigramového jazykového modelu v kombinaci s relativně jednoduchým monofónovým akustickým modelem.

U EL řečníka je vidět dílčí zlepšení u 2 modelů (tab. 4.4), resp. 1 modelu v případě trigramového modelu (tab. 4.5). Ve většině případech však redukce fonetické sady vedla ke zhoršení přesnosti. U EL řečníka došlo ke zlepšení při použití trigramového jazykového modelu, to nasvědčuje tomu, že monofónový akustický model není úplně ideální pro odhad sekvence fonémů.

Model	Zdravý [%]	EL [%]
Baseline	91.35	83.05
$/f/ \rightarrow /v/$	89.96	83.05
$/k/ \rightarrow /g/$	90.68	83.10
$/s/+/š/ \rightarrow /z/+/ž/$	88.77	83.71
$/t/+/t'/ \rightarrow /d/+/d'/$	90.05	82.47
Náhrada všech	86.58	82.78

Tabulka 4.4: Vliv redukce fonetické sady na přesnost ASR systému s monofóním akustickým a zerogramovým jazykovým modelem pro zdravého a EL řečníka.

Model	Zdravý [%]	EL [%]
Baseline	87.47	84.92
$/f/ \rightarrow /v/$	87.42	84.51
$/k/ \rightarrow /g/$	86.36	85.50
$/s/+/š/ \rightarrow /z/+/ž/$	84.81	84.75
$/t/+/t'/ \rightarrow /d/+/d'/$	86.38	84.38
Náhrada všech	83.77	84.34

Tabulka 4.5: Vliv redukce fonetické sady na přesnost ASR systému s monofóním akustickým a trigramovým jazykovým modelem obsahujícím 360k slov pro zdravého a EL řečníka.

V tab. 4.6 a 4.7 jsou pak vypsány výsledky pro trifónový akustický model se zerogramovým resp. trigramovým jazykovým modelem. Stejně jako u předchozích dvou

experimentů, tak i zde je vidět, že redukce fonetické sady vede u zdravého řečníka vždy ke zhoršení přesnosti modelu. Také je tu možné vydedukovat, že trifónový akustický model dosahuje výrazně lepších výsledků než monofónní model. Zhoršení u EL řečníka v tab. 4.6 je s největší pravděpodobností způsobeno fonetickými stromy, protože není dostatek dat pro všechny možné varianty trifónů. Tím pádem model pro určité akustické trifóny vrací špatné sekvence znaků. Zerogramového jazykový model to pak nedokáže zachránit, protože všechny slova mají stejnou pravděpodobnost $P_r(w_n|w_1, \dots, w_{n-1}) = \frac{1}{2885}$. Tím pádem může dojít k rozpoznávání špatného slova a nižší celkové přesnosti. Tuto domněnku potvrzuje rapidní zlepšení v případě trigramového jazykového modelu (tab. 4.7) kde již jazykový model významně přispívá k přesnosti modelu.

U obou experimentů s trifónovým jazykovým modelem došlo ke zlepšení u dvou modelů (tab. 4.6 a 4.7), ale stejně jako v případě monofónového modelu vedla ve většině případů redukce fonetické sady ke zhoršení.

Model	Zdravý [%]	EL [%]
Baseline	92.66	82.60
/f/ → /v/	92.41	82.23
/k/ → /g/	92.57	83.30
/s/+/š/ → /z/+/ž/	92.28	83.28
/t/+/t̥/ → /d/+/d̥/	92.28	82.13
Náhrada všech	91.03	82.18

Tabulka 4.6: Vliv redukce fonetické sady na přesnost ASR systému s trifónovým akustickým a zerogramovým jazykovým modelem pro zdravého a EL řečníka.

Ze získaných výsledků je možné usoudit, že redukce fonetické sady může vést ke zlepšení přesnosti. Nicméně předpoklad, že všechny neznělé fonémy jsou shodné se svými znělými ekvivalenty se nepotvrdila. Zároveň není možné úplně říci, že je možné např. dvojici /s/ a š za každých okolností převést na znělou variantu a dosáhnout tím

Model	Zdravý [%]	EL [%]
Baseline	95.80	87.65
$/f/ \rightarrow /v/$	95.46	87.51
$/k/ \rightarrow /g/$	95.55	88.38
$/s/ + /š/ \rightarrow /z/ + /ž/$	95.07	88.31
$/t/ + /t̥/ \rightarrow /d/ + /d̥/$	95.39	87.60
Náhrada všech	94.53	86.97

Tabulka 4.7: Vliv redukce fonetické sady na přesnost ASR systému s trifónovým akustickým a trigramovým jazykovým modelem s 360k slov pro zdravého a EL řečníka.

lepších výsledků. Při hlubší analýze výsledků se ukázalo, že velmi záleží na kontextu daného fónemu, protože jeho podobu velmi ovlivňují fonémy v bezprostředním okolí. Řeč představuje spojitou formu signálu a při vyslovování různých slov obsahujícím stejný foném s odlišným okolím dochází i třeba k odchylkám v artikulaci, např. *hrad* vs. *hod*.

Naopak očekávaným výsledkem bylo zhoršená přesnosti pro zdravého řečníka ve všech případech redukce fonetické sady. Dále se potvrdilo, že komplexnější trifónový model dosahuje ve většině případů lepších výsledků. To je nepochybně způsobeno tím, že pro jeden foném máme přesnější pravděpodobnosti přechodu, protože se bere v potaz i jeho okolí, kdežto pro monofónový model nikoli.

- popis jak byla data získána
- informace o datech (frekvenční rozsah, atp.)
- prvotní experimenty k určení parametrů modelu
- popsat výsledky, výsledky převážně na HTK (HMM + GMM)
- konfúzní tabulka (20160607) a nové mapování

4.2 Provnání člověk vs. stroj

- popsat důvody proč potřebujeme další nahrávky (slova, která se liší znělostí)
- popsat algoritmus výběru slov/vět k nahrávání
- napsat něco o tom, že mezi nahráváním byl velký časový rozestup a taky se změnila technika nahráváním
- problém taky s tím, že první sada nahrávek je mnohem větší (10h) než ta nová (cca 30 min) a modely tak nefungovali na nových datech v testovací sade
- použití neuronovek (Kaldi)
- popis a výsledky experimentu „člověk vs. stroj“

4.3 Protahování na příznacích

- problém se znělostí (systém moc nefunguje pokud je promluva krátká)
- popsat důvody pro protažení
- popis a výsledky experimentů na uměle protažených datech na příznacích (není použitelné reálně)
- aktualizace experimentu „člověk vs. stroj“

4.4 Modely pracující s protaženými daty

- reálné (neceločíselné) protažení na audio (použitelné reálně)
- algoritmus protažení

1. natrénovat model na původních nahrávkách

2. získat co možná nejpřesnější zarovnání
 3. podle zarovnání protáhnout inkriminované fonémy
 4. natrénovat nový model
- vysvětlit proč je získání zarovnána kritické
 - přiblížit možnosti jak vytvořit model, který bere v potaz i délku
 1. změna topologie modelu
 2. aplikace rescoringu
 - výsledky model na „reálných“ protažených datech
 - aktualizace experimentu „člověk vs. stroj“

Kapitola 5

Trenažér

Idea o trenažéru, který by mluvčího naučil protahovat. Otázkou je jestli to nedat jen jako sekci do předchozí kapitoly, případně jako součást rozsáhlejšího závěru.

Kapitola 6

Závěr

Seznam použité literatury

- [1] Slavíček, Aleš. *Operace hrtanu*. Praha: Nakladatelství TRITON, s.r.o., 2000, s. 53. ISBN: 80-7254-130-7.
- [2] Škvrňáková, Jana. „Úloha ošetrovateľskej péče při zvládání psychických a sociálních obtíží u nemocných po tracheostomii po totální laryngektomii“. Disertační práce. Masarykova univerzita, Lékařská fakulta, 2010.
- [3] Gussenbauer, Carl a Billroth, Theodor. *Über die erste durch Th. Billroth am Menschen ausgeführte Kehlkopf Exstirpation und die Anwendung des künstlichen Kehlkopfes*. Sittenfeld, 1874.
- [4] Kramp, Burkhard a Dommerich, Steffen. „Tracheostomy cannulas and voice prosthesis.“ In: *GMS current topics in otorhinolaryngology, head and neck surgery* 8 (led. 2009), Doc05. ISSN: 1865-1011. DOI: [10.3205/cto000057](https://doi.org/10.3205/cto000057).
- [5] Šebová-Šedenková, Irina. „Možnosti rehabilitácie hlasu po laryngektómii (Historický prehľad a súčasné trendy)“. In: *Choroby hlavy a krku (Head and Neck Diseases)* 1 (2006), s. 44–50. ISSN: 1210-0447.
- [6] Seeman, M. „Speech and voice without larynx“. In: *Cas Lek Cas* 41 (1922), s. 369–72.
- [7] Brown, Dale H. et al. „Postlaryngectomy Voice Rehabilitation: State of the Art at the Millennium“. In: *World Journal of Surgery* 27.7 (čvc 2003), s. 824–831. ISSN: 0364-2313. DOI: [10.1007/s00268-003-7107-4](https://doi.org/10.1007/s00268-003-7107-4).

- [8] Hradecká, Zuzana. „Fyziologie lidského hlasového ústrojí“. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Lékařská fakulta, 2007, s. 1–105.
- [9] Kikuchi, Yoshinobu a Kasuya, Hideki. „Development and evaluation of pitch adjustable electrolarynx“. In: *Speech Prosody 2004, International ...* (2004), s. 761–764.
- [10] Uemi, Norihiro et al. „Design of a new electrolarynx having a pitch control function“. In: *Proceedings of 1994 3rd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*. IEEE, 1994, s. 198–203. ISBN: 0-7803-2002-6. DOI: [10.1109/ROMAN.1994.365931](https://doi.org/10.1109/ROMAN.1994.365931).
- [11] Goldstein, Ehab a et al. „Design and implementation of a hands-free electrolarynx device controlled by neck strap muscle electromyographic activity.“ In: *IEEE transactions on bio-medical engineering* 51.2 (ún. 2004), s. 325–32. ISSN: 0018-9294. DOI: [10.1109/TBME.2003.820373](https://doi.org/10.1109/TBME.2003.820373).
- [12] Liu, Hanjun a Ng, Manwa L. „Electrolarynx in voice rehabilitation.“ In: *Auris, nasus, larynx* 34.3 (zář. 2007), s. 327–32. ISSN: 0385-8146. DOI: [10.1016/j.anl.2006.11.010](https://doi.org/10.1016/j.anl.2006.11.010).
- [13] Leunisse, C et al. „Biofilm formation and design features of indwelling silicone rubber tracheoesophageal voice prostheses—an electron microscopical study.“ In: *Journal of biomedical materials research* 58.5 (led. 2001), s. 556–63. ISSN: 0021-9304. DOI: [10.1002/jbm.1054](https://doi.org/10.1002/jbm.1054).
- [14] Slavíček, Aleš. „Možnosti rehabilitace pacientů po onkologických výkonech v oblasti hlavy a krku : Hlavní téma: Onkologie v otorinolaryngologii“. In: *Postgraduální medicína : odborný časopis pro lékaře* 4.9 (2002), s. 1029–1035. ISSN: 1212-4184.
- [15] Saito, Hitoshi et al. „Tracheoesophageal shunt method with omohyoid muscle loop for voice restoration.“ In: *Archives of otolaryngology–head & neck surgery*

129.3 (břez. 2003), s. 321–3. ISSN: 0886-4470. DOI: [10.1001/archotol.129.3.321](https://doi.org/10.1001/archotol.129.3.321).

- [16] Narula, Tony et al. *Laryngeal transplantation: working party final report*. London: The Royal College of Surgeons of England, 2011, s. 15.
- [17] Strome, M et al. „Laryngeal transplantation and 40-month follow-up.“ In: *The New England journal of medicine* 344.22 (květ. 2001), s. 1676–9. ISSN: 0028-4793. DOI: [10.1056/NEJM200105313442204](https://doi.org/10.1056/NEJM200105313442204).
- [18] Radová, Vlasta a Psutka, Josef. „UWB_S01 corpus - a czech read-speech corpus“. In: led. 2000, s. 732–735.
- [19] Psutka, Josef et al. *Mluvíme s počítačem česky*. Prague: Academia, 2006, s. 752. ISBN: 80-200-1309-1.
- [20] V., Psutka Josef, Šmídl, L. a Pražák, A. „Searching for a robust MFCC-based parameterization for ASR application“. In: Lisabon: INSTICC PRESS, 2007, s. 196–199. ISBN: 978-989-8111-13-5.
- [21] Stolcke, Andreas. „SRILM-an extensible language modeling toolkit“. In: *Seventh international conference on spoken language processing*. 2002.
- [22] Pražák, Aleš et al. „Efficient combination of N-gram language models and recognition grammars in real-time LVCSR decoder“. In: *2008 9th International Conference on Signal Processing*. IEEE. 2008, s. 587–591.