

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br.1046

**ANALIZA AKUSTIČKIH PARAMETARA  
GLASA KAO ODZIVA NA INTENZIVNE  
ZVUČNE POBUDE IMPULSNOG OBLIKA**

Igor Mijić

Zagreb, lipanj 2014.

Zagreb, 11. ožujka 2014.

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 1046


Pristupnik: **Igor Mijić (0036442326)**  
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija  
Profil: Elektroničko i računalno inženjerstvo

Zadatak: **Analiza akustičkih parametara glasa kao odziva na intenzivne zvučne pobude impulsnog oblika**

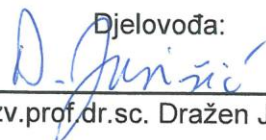
### Opis zadatka:

U okviru ovog diplomskog rada potrebno je napraviti analizu relevantnosti akustičkih parametara glasa u kontekstu intenzivnih zvučnih pobuda impulsnog oblika, uzevši u obzir slijedeće parametre pobude: intenzitet, vrijeme trajanja, vrijeme porasta, te spektralnu karakteristiku. Od akustičkih parametara glasa potrebno je obuhvatiti prozodijske mjere kao što su fundamentalna frekvencija, intenzitet, učestalost prolaska signala kroz nulu, mjere kvalitete glasa, te artikulacijske mjere kao što su formanti, kepralni koeficijenti u mel-skali i slično. Analizu promjene parametara glasa potrebno je izvršiti na dva načina: a) statističkim metodama, te b) metodama identifikacije sustava kao što su ARX, ARMAX i slične. Potrebno je izvršiti usporednu analizu odziva glasa, te odziva na orbicularis oculi mišiću, izmjenjenog pomoću neinvazivnog elektromiografskog senzora. Navedene analize potrebno je provoditi nad raspoloživim uzorcima koji su prikupljeni tijekom provedbe eksperimenta u kojem je sudjelovalo četrnaest subjekata. Analize je potrebno provesti u programskom alatu Matlab. Za detaljnije informacije obratiti se Branimiru Dropuljiću, dipl. ing.

Zadatak uručen pristupniku: 14. ožujka 2014.  
Rok za predaju rada: 30. lipnja 2014.

Mentor:  


Prof.dr.sc. Davor Petrinović

Djelovođa:  


Izv.prof.dr.sc. Dražen Jurišić

Predsjednik odbora za  
diplomski rad profila:

  
Prof.dr.sc. Mladen Vučić

**Zahvala:**

Zahvaljujem mentoru Prof.dr.sc. Davoru Petrinoviću, na pomoći i vodstvu kroz preddiplomski i diplomski studij.

Srdačno zahvaljujem Branimiru Dropuljiću, dipl.ing., asistentu na Zavodu za elektrostrojarstvo i automatizaciju Fakulteta elektrotehnike i računarstva, na ideji, strpljenju, pomoći, te svim satima zajedničke diskusije zbnjujućih rezultata.

Hvala svim kolegama i prijateljima bez kojih ovaj studij ne bi prošao ovako zabavno.

Hvala ti Vedrana, što si u svakom trenutku bila uz mene, sreća, motivacija i savjest, sve u jednom.

Najveće hvala mojim roditeljima, na konstantnoj podršci i savjetima tijekom studiranja i života.

## SADRŽAJ

1. Uvod .....	1
2. Ljudski glas i startle efekt.....	2
2.1. Nastajanje ljudskog glasa i govora .....	2
2.2. Startle odziv .....	3
3. Opis eksperimenta .....	5
4. Analiza fundamentalne frekvencije glasa $F_0$ .....	7
4.1. Ekstrakcija fundamentalne frekvencije glasa .....	7
4.2. Obrada eksperimentalnih podataka.....	9
4.3. Analiza habituacije .....	10
4.4. Analiza usrednjenih odziva fundamentalne frekvencije.....	12
4.5. Statistička analiza parametara $F_0$ odziva .....	14
4.6. Predobrada podataka za identifikaciju sustava .....	21
4.7. Odabir parametara modela.....	22
4.8. Usporedba rada različitih modela i rezultati .....	24
4.8.1. Analiza odziva sortiranih po parametrima pobude.....	24
4.8.2. Analiza odziva sortiranih po sudionicima i parametrima pobude .....	30
4.9. Diskusija rezultata identifikacije sustava $F_0$ odziva .....	35
5. Analiza EMG odziva orbis ocularis mišića .....	36
5.1. Obrada EMG signala .....	36
5.2. Analiza usrednjenih EMG odziva.....	36
5.3. Statistička analiza parametara EMG odziva .....	39
5.4. Predobrada podataka za identifikaciju sustava .....	42
5.5. Odabir parametara modela.....	43
5.6. Usporedba rada različitih modela .....	43
5.5. Diskusija rezultata identifikacije sustava EMG odziva.....	48

6. Spoj analize EMG signala i $F_0$ signala .....	49
6.1. Predobrada podataka .....	49
6.2. Korelacija EMG i $F_0$ signala .....	51
6.3. Odabir parametara modela .....	51
6.4. Usporedba rada različitih modela i rezultati .....	51
6.5. Diskusija rezultata .....	55
7. Zaključak .....	56
Literatura .....	57
Naslov, sažetak i ključne riječi .....	59
Title, summary and keywords .....	59
Popis slika .....	60
Popis tabela .....	63
Popis jednadžbi .....	64

## 1. UVOD

Ljudsko tijelo je u svom razvoju evoluiralo iznad mnogo obilježja koje vidimo kod životinja, no neki instinktivni ostaci su i danas vidljivi. Jedan od takvih je takozvani „startle“ refleks (eng. *startle response*) koji se definira kao defenzivan odziv na iznenadne i prijeteće pobude u našem okolišu. Refleks kao takav je moždana reakcija koja služi za zaštitu stražnjeg dijela glave i vrata (vidljivo po trzaju cijelog tijela, posebice gornjeg dijela tijela), te očiju (vidljivo po inherentnom treptaju). Analiza startle refleksa je naišla na mnoge primjene, no jedna od češćih je u liječenju ljudi sa posttraumatskim stresnim poremećajem, budući da kod takvih pacijenata često dolazi do pojačanih ili abnormalno reaktivnih reakcija na benigne pobude u njihovom okolišu, tj. reakcija na pobude koje kod drugih ne bi proizvele startle odziv.

Danas najčešća metoda za detekciju i analizu startle odziva je proučavanje elektromiografskog signala orbicularis oculi mišića koji se nalazi direktno ispod oka, te se na njegovom odzivu mogu jasno registrirati treptaji koji nastaju uslijed odziva na iznenadne pobude. Budući da znamo da to nije jedina mišićna reakcija, te da se u inicijalnim periodima prije habituacije odzivi mogu vidjeti na cijelom gornjem dijelu tijela, te su jaki u području vrata, u ovom radu će biti istraženi utjecaji startle pobuda na proizvodnju glasa, koji nastaju kroz direktan utjecaj tih pobuda na mišiće glasnica.

Uvodna poglavlja ovog rada daju osnovne informacije o nastajanju ljudskog glasa, startle odzivu i njihovoj povezanosti, dok se slijedeće poglavlje bavi analizom odziva fundamentalne frekvencije glasa kao značajke koju smo izabrali radi direktne poveznice iste sa titranjem mišića glasnica i utjecajima startle-a na iste.

Naredna poglavlja se bave modeliranjem procesa utjecaja startle efekta na fundamentalnu frekvenciju glasa korištenjem metoda identifikacije sustava, te ponavljanjem analize odziva, ali ovaj put nad elektromiografskim podacima, koji korespondiraju glasovnim podacima nad kojima je rađena ranija analiza. Završna poglavlja se bave modeliranjem EMG startle odziva kroz identifikaciju sustava, te povezivanjem analiza odziva fundamentalne frekvencije  $F_0$  i EMG odziva.

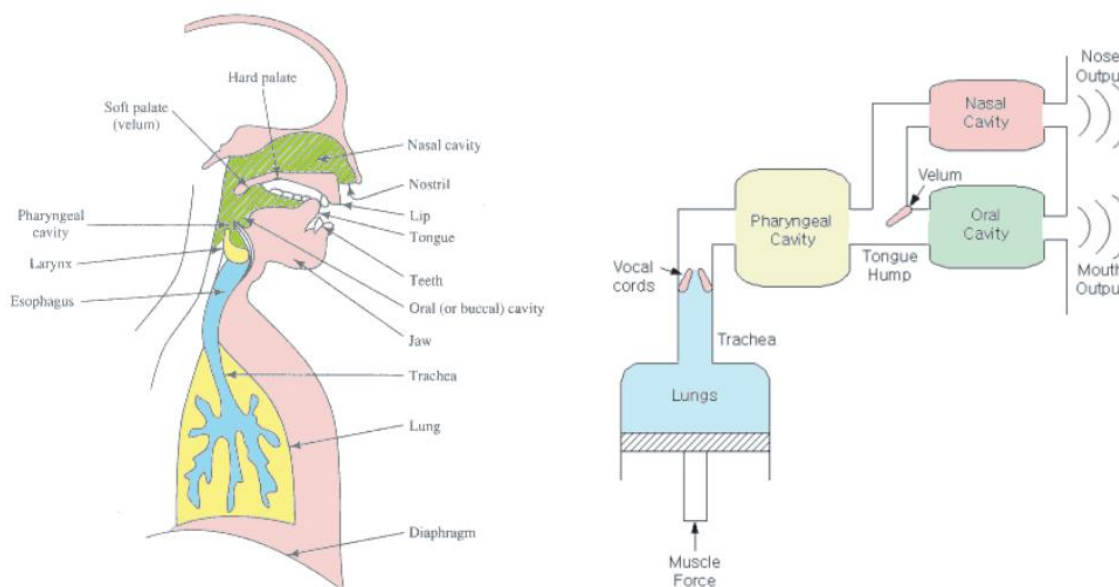
## 2. LJUDSKI GLAS I STARTLE EFEKT

Većina analize u ovom radu će se odnositi na procese nastajanja govora vezanih za glasnice i utjecaj startle odziva na iste, te će iz tog razloga u ovom poglavlju biti dane neke osnovne činjenice vezane za njih, da bi se omogućilo bolje razumijevanje ostatka rada.

### 2.1. NASTAJANJE LJUDSKOG GLASA I GOVORA

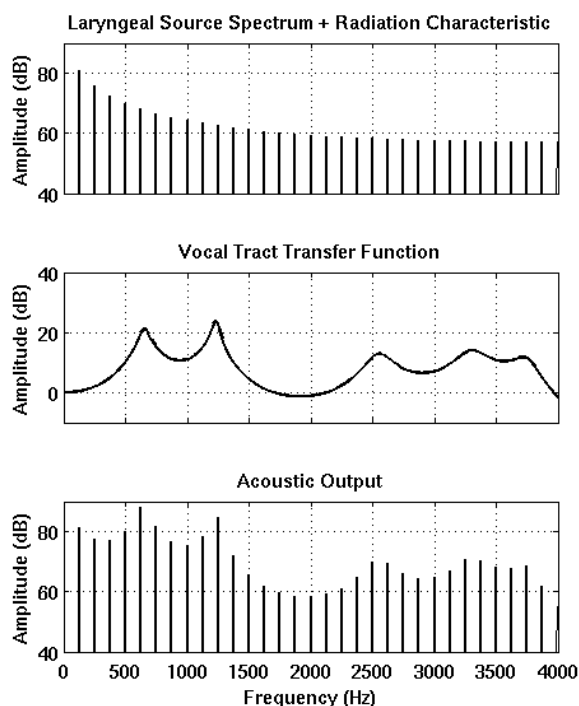
Za govor i druge zvučne oblike koji nastaju kod ljudi i mnogo drugih ne ljudskih vrsta se obično smatra da su ishod prolaska ili „filtriranja“ vala zvučne energije koji nastaje u grkljanu, kroz promjenjivu prijenosnu funkciju određenu oblikom supralaringalnog vokalnog trakta (Rubin & Vaitakotis-Bateson, 1998).

Osnovni organi u sustavu u kojem nastaje govor su redom pluća, dušnik, grkljan sa glasnicama, grlo, usna šupljina i nosna šupljina. Položaji pojedinih organa i pojednostavljeni model se mogu vidjeti na slici 2.1.



**Slika 2.1: Položaji pojedinih organa ljudskog sustava za govor, te pojednostavljena shema sustava**

Zvučni signal koji se kasnije filtrira u gornjem vokalnog trakta, nastaje na glasnicama kao proizvod ponavljajućeg procesa, u kojem mišići prvo spajaju glasnice, privremeno zaustavljajući prolazak zraka, povećavajući subglotalni tlak. Kada tlak postane veći od otpora glasnica, one se ponovno otvaraju i ciklus se ponavlja. Brzina ponavljanja ciklusa ovisi o mnogo faktora, ali većinom o elastičnosti glasnica, otporu pruženom od strane mišića glasnica i Bernoullijevom efektu. Održavajući stalan protok zraka iz pluća, glasnice se nastavljaju otvarati i zatvarati periodično, propuštajući pulseve zraka (Rubin &



Slika 2.2: Spektralne karakteristike signala na izlazu iz glasnica, prijenosna funkcija vokalnog trakta, te spektralna karakteristika izlaza iz vokalnog trakta

kao rezonantni sustav, računavajući u to i gubitke na izlazu sustava tj. usnama.

Na slici 2.2 tako se mogu vidjeti spektralna karakteristika na izlazu iz glasnica (fundamentalna frekvencija i njeni harmonici koji opadaju u intenzitetu kako se ide prema višim frekvencijama), prijenosna funkcija vokalnog trakta, te njihov produkt. Na slici se vide i frekvencije na kojima su maksimumi lokalne energije, koji se zovu formanti. Formanti su važni u ljudskom govoru budući da se iz njihovog položaja i širine pojasa može dobiti mnogo korisnih informacija o analiziranom govoru, poput prepoznavanja govora, ili verifikacije govornika. Važni su i u elektroničkoj sintezi govora (Snell, 1993).

## 2.2. STARTLE ODZIV

Normalni ljudski „startle“ odziv se sastoji od kratkog fleksijskog mišićnog odziva, najizraženijeg na gornjem dijelu tijela, izazvanog od strane neočekivane zvučne, te katkad vizualne ili vestibularne pobude. Reakcija je najistaknutija na licu, vratu i ramenima, a manje u donjem dijelu tijela. Minimalna reakcija koju očekujemo uz treptaj oka je fleksija prsnoključnosisatog vratnog mišića (lat. *musculus sternocleidomastoideus*), te je ta reakcija

Vaitakotis-Bateson, 1998). Frekvencija ovih pulsova se naziva fundamentalnom frekvencijom glasa  $F_0$ , te o njoj ovisi kako percipiramo visinu tona glasa. Već navedeni pulsovi se nazivaju glotalnim pulsovima po mjestu tvorbe, glasnica (lat. *glottis*). Fundamentalna frekvencija glasa  $F_0$  će dalje u radu biti obrađena detaljnije budući da se utjecaji nad njom analiziraju u većem dijelu ovog rada. Spektar signala se dakle pri ulasku u gornji dio vokalnog trakta sastoji od  $F_0$  i njegovih harmonika.

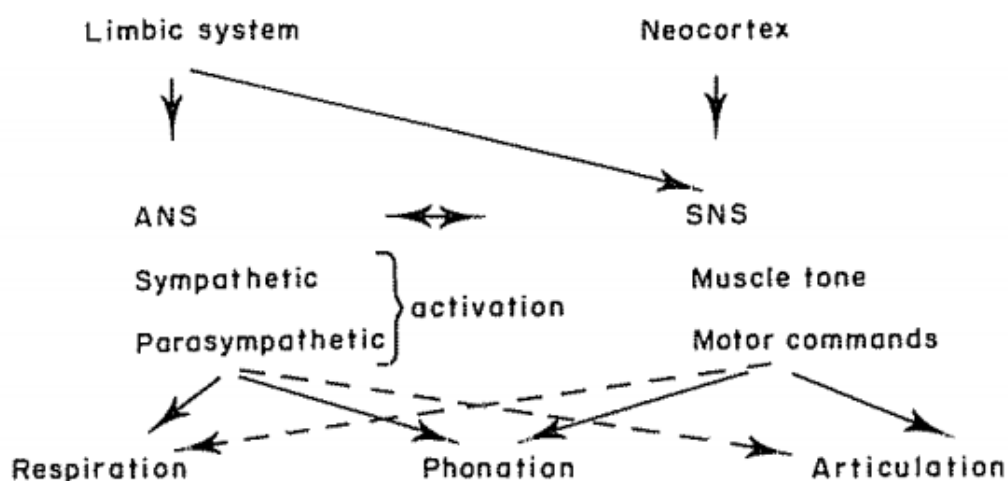
Oblik prijenosne funkcije vokalnog trakta ovisi o duljini, obliku i volumenu cijelog vokalnog trakta koji funkcionira



zadnja koja nestaje kod procesa habituacije na pobudu, uz refleks treptaja koji ne iščezava ni nakon procesa habituacije (Brown, 1998).

Iako se pretpostavlja da moždani refleksi imaju funkcionalnu važnost u kontroli fonacije, postoji jako malo studija koje se bave utjecajem auditornih refleksa na glasnica. Jedna od tih studija pokazuje pozitivne korelacije između EMG odziva krikotiroidnog mišića i promjena u fundamentalnoj frekvenciji (Sapir & McClean, 1983). Korelacije koje su pokazane utvrđuju da je usrednjeno vrijeme između nastupa pobude i nastajanja odziva (eng. *latency*)  $F_0$  cca. 50 ms, dok je za EMG odziv cca. 11ms. Istraživači u radu još navode da je potrebno daljnje istraživanje poveznica između auditorno-laringalnih refleksa u moždanim sustavima koji kontroliraju govor i odziva fundamentalne frekvencije.

Budući da je produkcija govora veoma kompleksan proces čije komponente kontroliraju mnogi različiti dijelovi mozga pretpostavka da postoje moždanih sustavi sa auditorno-laringalnim refleksima nije nevjerovatna. Neki od neuralnih izvora kontrole govora su prikazani na slici 2.3 na veoma pojednostavljen način.



Slika 2.3 : Moždani izvori kontrole govora (Scherer, 1989)

### 3. OPIS EKSPERIMENTA

Podaci nad kojima se vrši analiza su preuzeti iz eksperimenta izvršenog od strane Branimira Dropuljića dipl.ing. i suradnika na Zavodu za elektrostrojarstvo i automatizaciju u sklopu seminarškog rada iz kolegija Obrambeni sustavi i tehnologije.

Provedeni eksperiment koristi iznenadne intenzivne zvučne pobude (eng. *startle impulse*) sa varirajućim parametrima u svrhu snimanja i analize različitih značajki odziva.

U eksperimentu je sudjelovalo 14 ispitanika, kojima su kroz dva termina snimani glas, elektromiografski signal orbicularis oculi mišića, te još nekoliko bioloških signala koji neće biti korišteni u sklopu ovog diplomskog rada, poput stope respiracije, EKG-a, i razine perspiracije. Sudionici su kroz trajanje od nekoliko sekundi konstantno izgovarali glas 'a', pokušavajući održavati konstantnu glasnoću i intonaciju, dok su im u slučajnim trenucima kroz tih par sekundi na slušalice puštane intenzivne zvučne pobude impulsnog karaktera. Po svakom terminu i sudioniku, snimljeno je po 30 snimki, što nas dovodi do ukupno 840 odziva na impulsne zvučne pobude za daljnju analizu (Dropuljić, i dr., 2014).

Iz izdanih radova znamo da različite značajke pobude tj. *startle*-a dovode do različitih značajki odziva na orbicularis oculi mišiću (Brown, 1998), tj. do različitih značajki refleksnog treptaja (eng. *blink reflex*), dok njihov utjecaj na glasovni odziv nije mnogo istraživan. Značajno je bilo ispitati utjecaj različitih značajki pobude na glasovni odziv i njegove karakteristike. U seminarškom radu su obrađene korelacije varirajućih značajki odziva sa fundamentalnom frekvencijom glasa, formantima, energijom zvučnog signala te HNR-om (eng. *Harmonic-To-Noise Ratio*), dok će se u ovom radu, analiza bazirati na pornije analiziranje utjecaja na fundamentalnu frekvenciju glasa.

Karakteristike koje se variraju u pobudama su redom intenzitet pobude  $I$ , trajanje pobude  $T$ , vrijeme porasta pobude  $T_{rise}$  i valni oblik pobude, te su pobude grupirane u blokove kako bi se kasnije lakše izvlačilo podatke iz snimki. Tako su ovisno o tim varirajućim značajkama složena 4 bloka pobuda:

- Blok sa varirajućim intenzitetom pobude - intenziteti pobude u rasponu  $I \in [55,65,75,85,95,105] \text{ dB}$ , dok su ostale značajke pobude fiksirane na  $T = 50 \text{ ms}$ , te  $T_{rise} = 0 \text{ ms}$ , a pobuda je oblika bijelog šuma
- Blok sa varirajućim trajanjem pobude - trajanje pobude u rasponu  $T \in [10,30,50] \text{ ms}$ , dok su ostale značajke pobude fiksirane na  $I = 95 \text{ dB}$ , te  $T_{rise} = 0 \text{ ms}$ , a pobuda je oblika bijelog šuma

- Blok sa varirajućim vremenom porasta pobude – vrijeme porasta pobude u rasponu  $T_{rise} \in [10,30,50] ms$ , dok su ostale značajke pobude fiksirane na  $I = 95 dB$ , te  $T = 50 ms$ , a pobuda je oblika bijelog šuma
- Blok sa varirajućim valnim oblikom pobude – valni oblik pobude je oblika bijelog šuma, obojanog šuma širine pojasa jedne oktave u rasponu 440 – 880 Hz, te čistog sinusa frekvencije 440 Hz, dok su ostale značajke pobude fiksirane na  $I = 95 dB$ ,  $T = 50 ms$ , te  $T_{rise} = 0 ms$

Svaki dolazak sudionika se kako smo već rekli sastojao od 30 akustičkih pobuđivanja sudionika za vrijeme konstantne fonacije samoglasnika 'a'. Tih 30 pobuda se sastojalo od 18 pobuda iz bloka sa varirajućim intenzitetima (3 po svakoj klasi pobude), 6 pobuda iz bloka sa varirajućim trajanjem pobude (2 po svakoj klasi pobude), te po 3 pobude iz blokova sa varirajućim vremenom porasta i valnim oblikom pobude (1 po svakoj klasi pobude). Poredak unutar svakog bloka je postavljen slučajno, te su vremena pojavljivanja pobude izabrana slučajno radi smanjenja utjecaja auditorne habituacije. Habituacija je pojava kod koje često izlaganje određenoj pobudi dovodi do zamora neuralnih struktura koje procesiraju tu vrstu informacije, te dolazi do nižeg intenziteta odziva na daljnje pobude (Pilloti, Balota, Sommers, & Khurshid, 2000). Analizu postojanja habituacije opisujemo kasnije u potpoglavlju 4.3.

Intenzitet zvuka koji je prezentiran sudionicima preko slušalica je umjeren na Zavodu za elektroakustiku Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, dok su biosignali snimani koristeći Biopac 100C seriju uređaja.

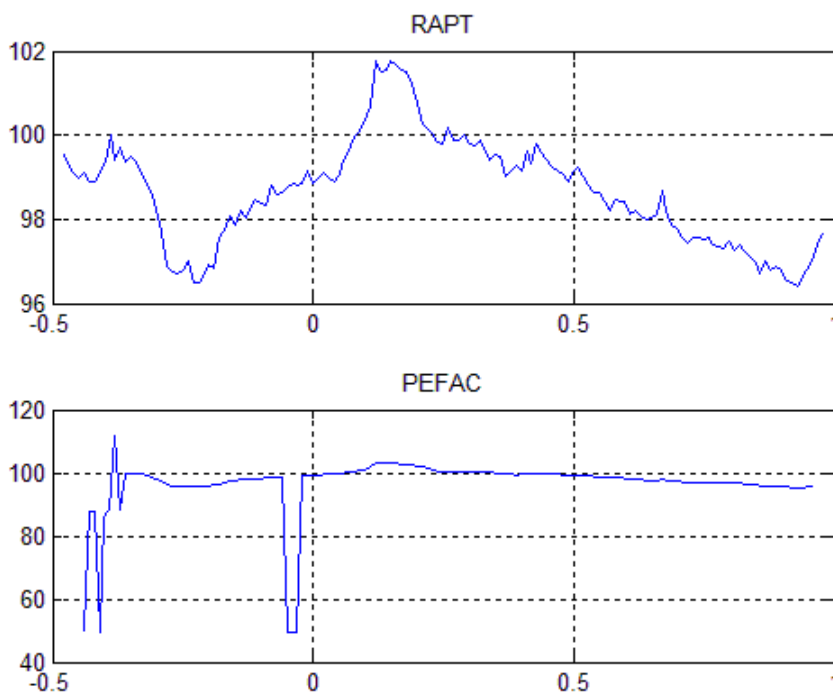
## 4. ANALIZA FUNDAMENTALNE FREKVENCije GLASA $F_0$

### 4.1. EKSTRAKCIJA FUNDAMENTALNE FREKVENCije GLASA

Kao glavnu značajku glasa na kojoj analiziramo utjecaje startle impulsa izabrali smo fundamentalnu frekvenciju te iz tog razloga nam je važno naći najbolju opciju za ekstrakciju iste iz segmenata govora kojeg analiziramo.

U procesu izbora razmatrani su algoritmi RAPT (eng. *Robust Algorithm for Pitch Tracking*) (Talkin, 1995) i PEFAC (Gonzales & Brookes, 2011), te je u ranim fazama analize čak korišten vlastiti rudimentarni algoritam za estimaciju korištenjem autokorelacijske metode ekstrakcije fundamentalne frekvencije (Middleton, 2003). I RAPT i PEFAC su dostupni pod VOICEBOX Toolbox-om za MATLAB programsku podršku (Brookes, 2005) koji je javno dostupan za korištenje pod uvjetima GNU Opće javne licence.

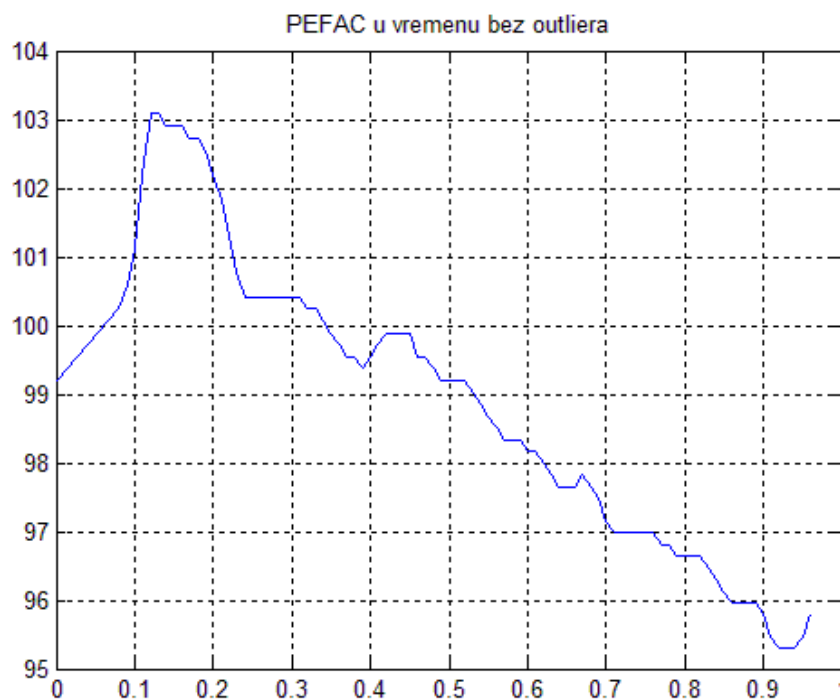
Vlastiti program je korišten isključivo u početnim fazama, budući da je jedina prednost koju je imao nad već etabliranim algoritmima brzina izvođenja radi svoje jednostavne izvedbe i nedostatka komplicirane pred i post obrade, dok mu je najveći nedostatak bila niska razina preciznosti izlaznih podataka.



Slika 4.1: Usporedba estimirane fundamentalne frekvencije algoritama RAPT i PEFAC

Vizualnom usporedbom dobivenih izlaznih podataka odlučili smo se na kraju za korištenje RAPT algoritma radi bolje otpornosti na specifične aberantne vrijednosti (eng. *outliers*) koje očekujemo pri estimaciji fundamentalne frekvencije glasa. Ono što očekujemo su frekvencijsko udvostručenje (eng. *doubling*) i prepolovljenje (eng. *halving*), što su slučajevi kada interni uvjeti unutar algoritma koji estimira fundamentalnu frekvenciju ukazuju na to da fundamentalna frekvencija  $F_0$  odgovara najbližim harmonicima fundamentalne frekvencije tj.  $0.5 * F_0$  i  $2 * F_0$  umjesto stvarnoj vrijednosti. Kod autokorelacijskih metoda to se događa kada vršna vrijednost autokorelacijske funkcije na vremenskim indeksima (eng. *lag*) koji odgovaraju harmonicima  $0.5 * F_0$  i  $2 * F_0$  prelazi vrijednost vršne vrijednosti indeksa koji odgovara  $F_0$  (Kasi, 2002).

Slika 4.1 pokazuje usporedbu izvedbe algoritama RAPT i PEFAC. Količina aberantnih vrijednosti u estimacijama PEFAC algoritma je na kraju dovela do izbora RAPT algoritma za estimaciju fundamentalne frekvencije  $F_0$ .



Slika 4.2: Izvedba PEFAC algoritma u području u kojem ne postoje aberantne vrijednosti udvostručenja i prepolovljenja  $F_0$

Na slici 4.2 može se vidjeti izvedba algoritma PEFAC na području u kojem ne postoje aberantne vrijednosti, te je izvedba u tom području možda i prikladnija za daljnju analizu, budući da PEFAC sadrži manje filtarskog ugađivanja konture (eng. *smoothing*), što u krajnjem slučaju znači da se manje utjecalo na podatke, ali bi potrebnim uklanjanjem svih

aberantnih podataka ostali sa puno manjim skupom podataka za analizu. Greška koju još najčešće očekujemo kod algoritama za estimaciju fundamentalne frekvencije, je pogrešna detekcija zvučnih i bezvučnih okvira, koju u našem slučaju ne bi trebali primijetiti radi konstante fonacije samoglasnika na području analize (Kasi, 2002).

## 4.2. OBRADA EKSPERIMENTALNIH PODATAKA

Eksperimentalni podaci za svaki dolazak su spremljeni u .wav (audio podaci) i .mat (biosignali) formate, te su uz to spremljeni podaci vezani za nastupanje i trajanje svake pojedine pobude u svakom dolasku, te vremenski podaci početka i kraja svake fonacije. Frekvencije uzorkovanja podataka su bile 44100 Hz za audio podatke, te 1250 Hz za sve biosignale.

Prva točka obrade je dakle bila isključiti iz daljnje analize sve podatke u kojima fonacija nije trajala barem jednu sekundu prije nastupa pobude, te u kojima fonacija nije trajala barem 1.5 sekundi nakon nastupa pobude. Takav okvir podataka nam omogućava da se fonacija uspostavi i stabilizira prije nastupa pojave čiji odziv planiramo analizirati, te nam omogućava dovoljno vremena da nakon smirivanja pojave promotrimo i vraćanje fonacije na normalne vrijednosti. Takvom ekskluzijom podataka, dolazimo do prvog pravog smanjenja skupa podataka za analizu. Za primjer, blok odziva na pobude sa varirajućim intenzitetom trebao bi sadržavati  $N = 14 * 2 * 18 = 504$  odziva (broj sudionika \* broj dolazaka \* broj odziva po bloku), no nakon prvog reda isključenja sadrži samo  $N = 412$  odziva, što je skoro 20% izgubljenih podataka. Na kraju se izdvoje podaci odziva 0.5 s prije nastupa pobude i 1 s nakon nastupa pobude, što se pokazalo kao dovoljno za promatranje fundamentalne frekvencije prije i nakon startle pojave.

Daljnja obrada govornih signala nije potrebna radi kvalitete opreme i visoke frekvencije uzorkovanja audio signala. Nakon ekstrakcije svih govornih odziva, pristupa se estimaciji fundamentalne frekvencije  $F_0$ , korištenjem RAPT algoritma implementiranog u funkciji `fxrapt.m` iz VOICEBOX Toolbox-a. Male promjene su izvedene na funkciji, koje omogućavaju promjenu veličine okvira posmaka podataka pri izračunu okvira koji idu u daljnju estimaciju. Izlazni podaci nam pokazuju fundamentalnu frekvenciju odsječka govora, u vremenu  $t \in \langle -0.5, 1 \rangle$  s, gdje je  $t = 0$  trenutak u kojem nastupa pobuda. Frekvencija uzorkovanja fundamentalne frekvencije je 100 Hz, te takvi podaci tada odlaze na normiranje i uklanjanje aberantnih vrijednost, što oboje obavlja funkcija `OutlierRemoval.m`. Budući da nas zanimaju samo promjene fundamentalne

frekvencije u odnosu na trenutak nastupa pobude, a ne apsolutna fundamentalna frekvencija kod koje se promjene vrte oko frekvencije fonacije, podatke normiramo na trenutak nastupa pobude, tako da vrijednost podataka u tom trenutku bude 0, te možemo promatrati promjenu relativno tome. Otklanjanje aberantnih podataka se obavlja tako da se za svaki niz uzoraka promjene fundamentalne frekvencije uzima razlika između susjednih uzoraka te se izbacuju oni nizovi u kojima postoji razlika između susjednih uzoraka čija je apsolutna vrijednost veća od 2. Budući da je pojava promjene fundamentalne frekvencije spora, takve razlike najčešće znače još veće razlike tj. promjene, koje u kontekstu fundamentalne frekvencije mogu biti udvostručenje i prepolovljenje fundamentalne frekvencije.

Za primjer, otklanjanje odziva sa aberantnim vrijednostima na bloku odziva sa varirajućim intenzitetom pobude „preživljava“  $N = 256$  odziva što je gubitak podataka od cca 38% naspram prošlog  $N = 412$ , te čak 49% naspram prvotnog skupa podataka  $N = 504$ .

Još se izvodi i skup podataka za rad sa System Identification Toolbox-om, kojemu je snižena frekvencija uzorkovanja na 20 Hz, s faznim pomakom u snižavanju frekvencije uzorkovanja, pazeći da se očuva uzorak sa vrijednosti 0 koji označava trenutak nastupa odziva.

Svi podaci se spremaju u .mat datoteke, sortirani ovisno o sudionicima (spojeni podaci oba dolaska), te ovisno o klasama parametara pobude (spojeni podaci svih sudionika za jedan parametar pobude).

### 4.3. ANALIZA HABITUACIJE

Radi validacije statističke analize moramo uzeti u obzir i utjecaje habituacije na odzive fundamentalne frekvencije. Za analizu habituacije su izabrani odzivi na pobude bijelog šuma s parametrima  $I = 95 \text{ dB}$ ,  $T = 50 \text{ ms}$ ,  $T_{rise} = 0 \text{ ms}$ , budući da se u svakom bloku od 30 pobuda po dolasku sudionika, pojavljuje najčešće, te su prisutni u čak 3 od 4 bloka različitih pobuda. Drugi razlog izbora te pobude je to što za pobudu tog tipa očekujemo relativno sigurno pojavljivanje startle odziva u  $F_0$  konturi. Pojedini dolasci sudionika se radi razlike u vremenu između dolazaka (cca. nekoliko dana) tretiraju kao odvojeni sudionici, te u literaturi (Pilloti, Balota, Sommers, & Khurshid, 2000) vidimo da su za razmatranje različitih aspekata habituacije koristili iste pobude, sa određenim vremenskim razmakom između eksperimenata.

Ekstrahirani su govorni odzivi na te pobude za svaki dolazak pojedinog sudionika, izračunati i normirani  $F_0$  odzivi, uklonjene su aberantne vrijednosti udvostručavanja i prepolovljenja  $F_0$ , te su izračunate vršne vrijednosti  $F_0$ . U savršenom slučaju svaki dolazak bi imao točno 6 odziva  $F_0$ , no dva reda uklanjanja podataka koje se odvija relativno slučajno nas ostavlja sa poljem podataka kojemu je potrebna daljnja analiza. Dalje identificiramo dolaske u kojima je sačuvan prvi odziv na našu pobudu, te barem još 3 odziva koji imaju jednake pozicije. Takvih skupova podataka ima 12, te nad njima računamo razlike u vršnoj vrijednosti  $F_0$  relativno naspram odziva prvog pojavljivanja. Kada bi dolazilo do habituacije očekivali bi da će te razlike, ovisno o dolasku biti sve veće kako napredujemo prema zadnjem pojavljivanju u jednom dolasku.

**Tabela 4.1: Prikaz razlika vršnih vrijednosti  $F_0$  odziva naspram prvog referentnog te srednje vrijednosti svih razlika**

Dolazak	F0(1)-F0(2)	F0(1)-F0(3)	F0(1)-F0(4)	Mean
1	0,833	-0,746	1,137	0,408
2	-4,538	-1,497	-5,303	-3,779
3	0,722	-0,216	0,051	0,185
4	1,075	2,287	0,835	1,399
5	0,470	1,875	2,105	1,483
6	0,042	-1,221	-0,189	-0,456
7	2,314	1,777	-2,357	0,578
8	-0,958	-0,207	-0,120	-0,428
9	-0,520	-1,479	-1,178	-1,059
10	-1,064	-0,591	-1,211	-0,955
11	-1,676	-1,397	-0,982	-1,352
12	-0,519	0,946	-0,887	-0,153
Mean				-0,344

Iz rezultata se može vidjeti da za neke dolaske postoji habituacija, a za neke dolaske ne postoji, te da su razine relativno niske. Drugi red analize se provodi samo na dolascima koji imaju prisutnih svih 6 odziva te je takvih 6.

**Tabela 4.2: Prikaz razlika vršnih vrijednosti  $F_0$  odziva naspram prvog referentnog te srednje vrijednosti svih razlika**

Dolazak	F0(1)+F0(2)	F0(1)+F0(3)	F0(1)+F0(4)	F0(1)+F0(5)	F0(1)+F0(6)	Mean(F0(1)-F0(i))
1	0,833	-0,746	1,137	0,452	2,378	0,811
2	-4,538	-1,497	-5,303	0,304	-0,154	-2,237
3	-0,958	-0,207	-0,120	0,842	0,433	-0,001
4	-0,520	-1,479	-1,178	-1,566	-0,515	-1,051
5	-1,064	-0,591	-1,211	-2,227	-1,113	-1,241
6	-1,676	-1,397	-0,982	0,963	-1,478	-0,914
Mean						-0,772



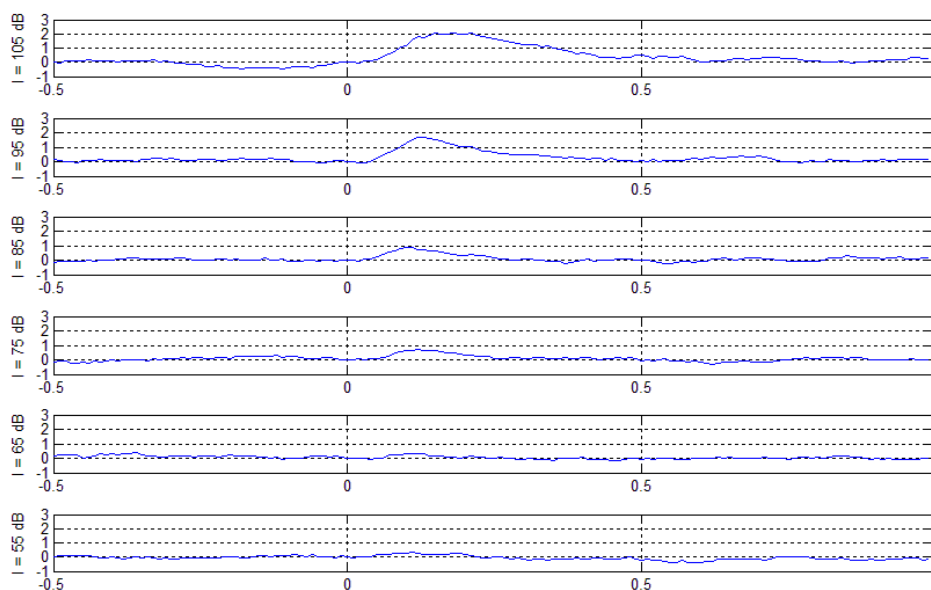
Kao i kod prve analize, neki od rezultata pokazuju pojavljivanje habituacije, s tim da čak i kod dolazaka kod kojih vidimo razlike u amplitudama, ne postoji dovoljno konzistentno ponašanje koje bi se moglo nazvati habituacijom, već podaci pokazuju samo slučajno fluktuiranje oko referentnih vrijednosti.

Svi podaci i slike generirani u ovom potpoglavlju mogu se dobiti upisivanjem u komandnu liniju MATLAB-a naredbe:

```
ResponseAnalysis('Snd', 'F0HabituationCheck')
```

#### 4.4. ANALIZA USREDNJENIH ODZIVA FUNDAMENTALNE FREKVENCIJE

Prikaz usrednjenih odziva ima svoje prednosti, posebno kod ekstrakcije pojava koje su sumjerljive sa pozadinskim šumom ili smetnjom. To pak nije slučaj sa fundamentalnom frekvencijom na visokim razinama intenziteta pobude, no na niskim razinama, to uvelike pomaže. Usrednjavanje se obavlja po svim klasama pojedinog parametra. Problem analize usrednjenih odziva je u tome što brzi, odzivi visokog intenziteta, previše utječu na prikaz latencije odziva, pomičući ga prema trenutku nastupa pobude.

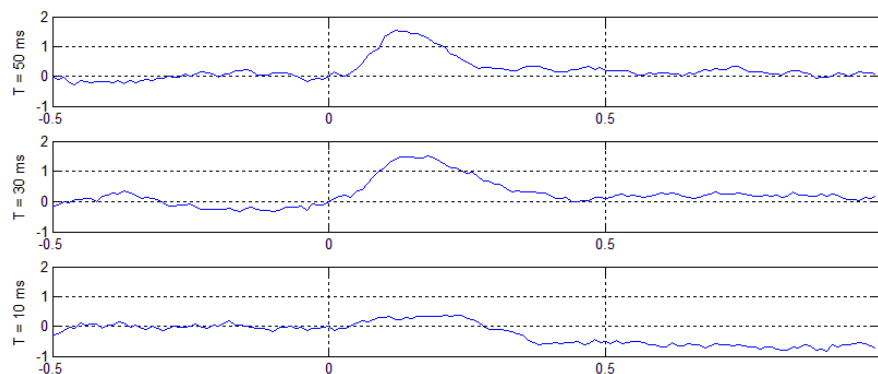


Slika 4.3 : Usrednjeni  $F_0$  odzivi za pobude s varirajućim intenzitetom, usrednjene po klasama intenziteta

Slike 4.3 - 4.6 pokazuju usrednjene  $F_0$  odzive za pobude sa varirajućim intenzitetom, varirajućim trajanjem, varirajućim vremenom porasta pobude te varirajućim valnim oblikom, usrednjene po klasama varirajućeg parametra.

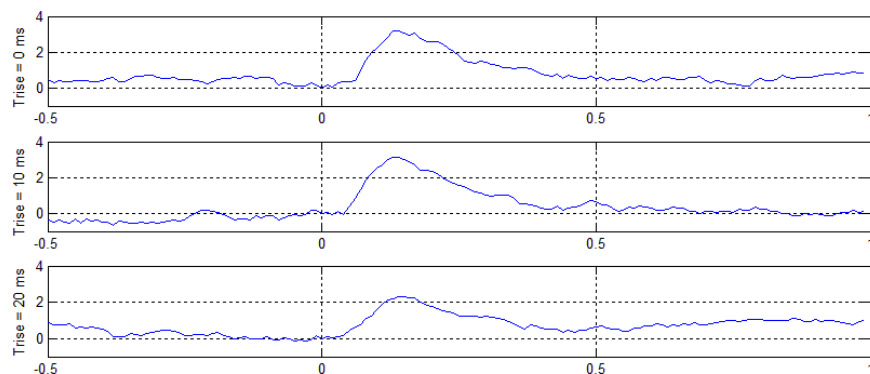
Iz slike 4.3 možemo vidjeti ovisnost vršne vrijednosti  $F_0$  o intenzitetu pobude. Zanimljivo je primijetiti da čak ni usrednjeni odziv nije uspio ekstrahirati nikakvu pojavu za dva

najniža intenziteta, iako su u literaturi dobiveni niski odzivi za  $I = 65$  dB (Sapir & McClean, 1983).



Slika 4.4: Usrednjeni  $F_0$  odzivi za pobude sa varirajućim trajanjem, usrednjene po klasama trajanja

Slika 4.4 potvrđuje dosadašnja saznanja o potrebnom trajanju pobude, pokazujući nam da za pobude kraće od 30 ms, vršna vrijednost odziva, te vjerojatnost njegovog pojavljivanja opadaju.

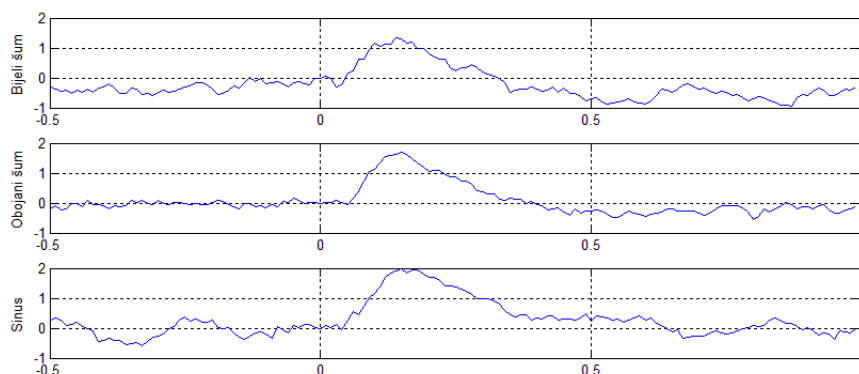


Slika 4.5: Usrednjeni  $F_0$  odzivi za pobude sa varirajućim vremenom porasta, usrednjeni po klasama vremena porasta

Pravila za izazivanje startle odziva na EMG signalu orbicularis oculi mišića nam nalažu da pobuda mora imati vrijeme porasta što bliže nuli, no slika 4.5 nam pokazuje da to ne vrijedi za  $F_0$ , iako sa povećanjem vremena porasta, opada vršna vrijednost signala.

Slika 4.6 pokazuje prvu inkonzistenciju naspram dosadašnjih istraživanja, budući da bi bijeli šum od svih valnih oblika trebao imati najveći odziv, a sinusni signal najmanji, čemu je možda razlog mali broj odziva koji ulaze u analizu kod bloka pobuda sa varirajućim valnim oblikom.

Ovi usrednjeni odzivi služe samo kao pokazatelj osnovnih pretpostavki koje će se dodatno analizirati u statističkoj analizi karakteristika pojedinih odziva.



Slika 4.6: Usrednjeni  $F_0$  odzivi za pobude sa varirajućim valnim oblikom, usrednjeni po vrstama valnog oblika

Sve slike generirane u ovom potpoglavlju mogu se dobiti upisivanjem u komandnu liniju MATLAB-a naredbe:

```
ResponseAnalysis('Snd', 'MeanResponsePlot')
```

#### 4.5. STATISTIČKA ANALIZA PARAMETARA $F_0$ ODZIVA

Nasuprot analizi usrednjenih odziva koja nam je dala okvire u kojima očekujemo pojedine parametre odziva, u ovoj analizi ćemo bolje proučiti točne vrijednosti pojedinih parametara odziva. Parametri koje ćemo izračunati za svaki  $F_0$  odziv su:

- Vršna vrijednost odziva (eng. *peak*)
- Vrijeme nastupa odziva (eng. *latency, onset time*)
- Vrijeme nastupa vršne vrijednosti odziva (eng. *peak time*)
- Vrijeme rasta odziva (eng. *rise time, onset to peak time*)
- Vrijeme smirivanja odziva (eng. *settling time*)
- Trajanje odziva (eng. *duration*)

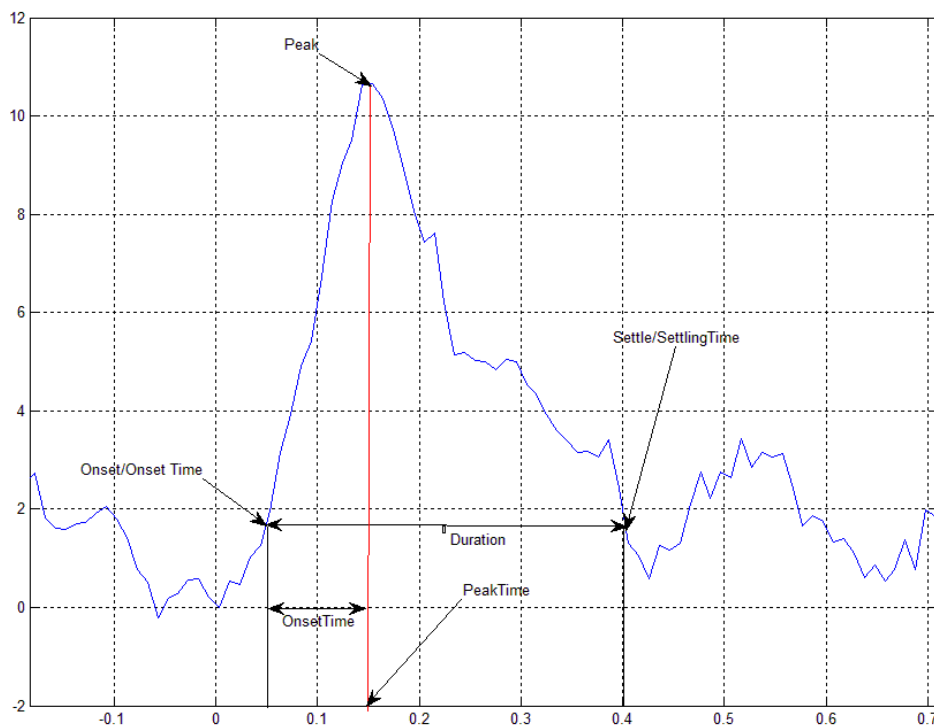
Svi parametri odziva se računaju automatski iako neke od literatura predlažu pojedinačno pregledavanje svakog od odziva i označavanje parametara, jer se tako može ujedno i ocijeniti kvaliteta odziva.

Vršnu vrijednost odziva definiramo kao najveću vrijednost  $F_0$  signala u vremenu od nastupa pobude do 0.5 s nakon nastupa pobude. Taj vremenski period iščitavamo iz slika 4.3 - 4.6 gdje vidimo da su do kraja tog perioda sve pojave u stanju smirivanja. Vrijeme nastupa odziva definiramo kao prvi trenutak u vremenu između nastupa pobude i vremenu

nastupa vršne vrijednosti odziva, koji pređe fiksni prag uz koju postoji određeni broj sljedećih uzoraka sa istim ponašanjem, tj. većih od tog praga. Prag se računa kao zbroj srednje vrijednosti i dvije standardne devijacije  $F_0$  signala u vremenu 100 ms prije nastupa pobude, do vremena nastupa pobude. Vrijeme smirivanja definiramo analogno, no ono tražimo u vremenu nakon vremena nastupa vršne vrijednosti, te određeni broj uzoraka mora pasti ispod fiksnog praga.

Vrijeme nastupa vršne vrijednosti se definira kao vrijeme u kojem očitamo vršnu vrijednost, vrijeme porasta je razlika vremena nastupa odziva i vremena nastupa vršne vrijednosti odziva, dok je trajanje odziva razlika vremena smirivanja odziva i vremena nastupa odziva.

Primjer svih parametara odziva se može vidjeti na slici 4.7.

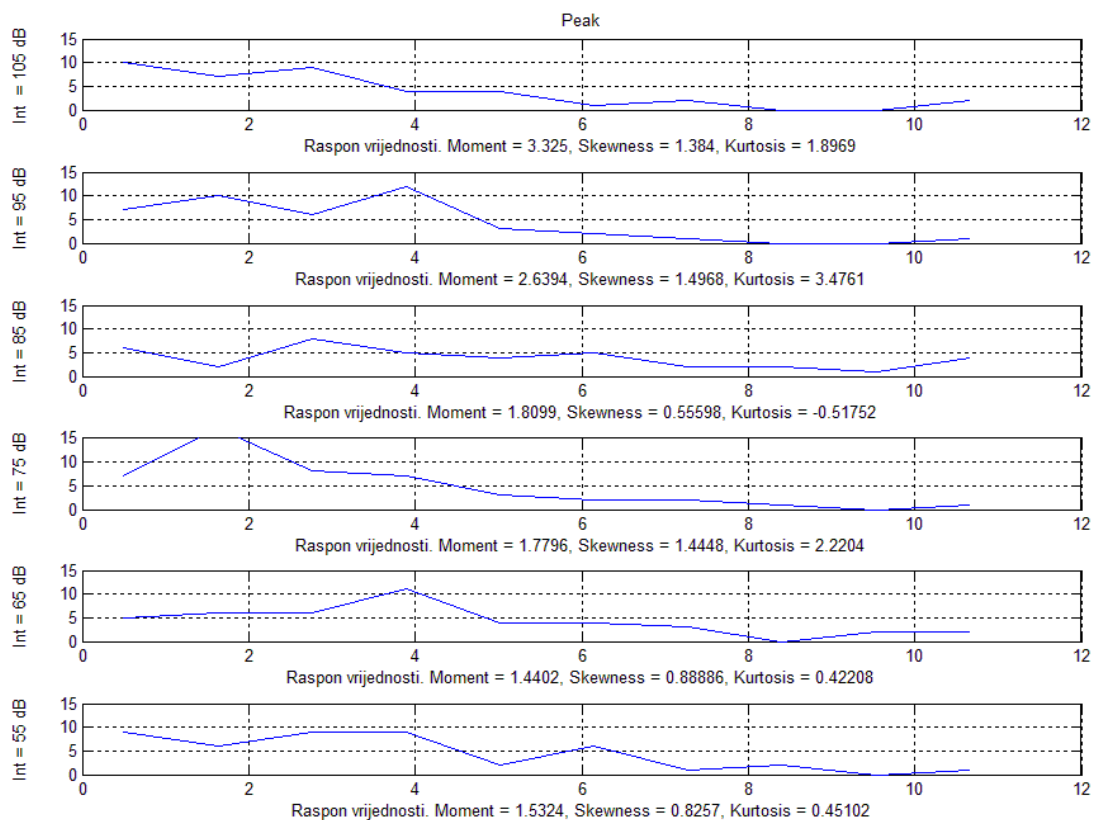


Slika 4.7: Primjeri parametara odziva  $F_0$

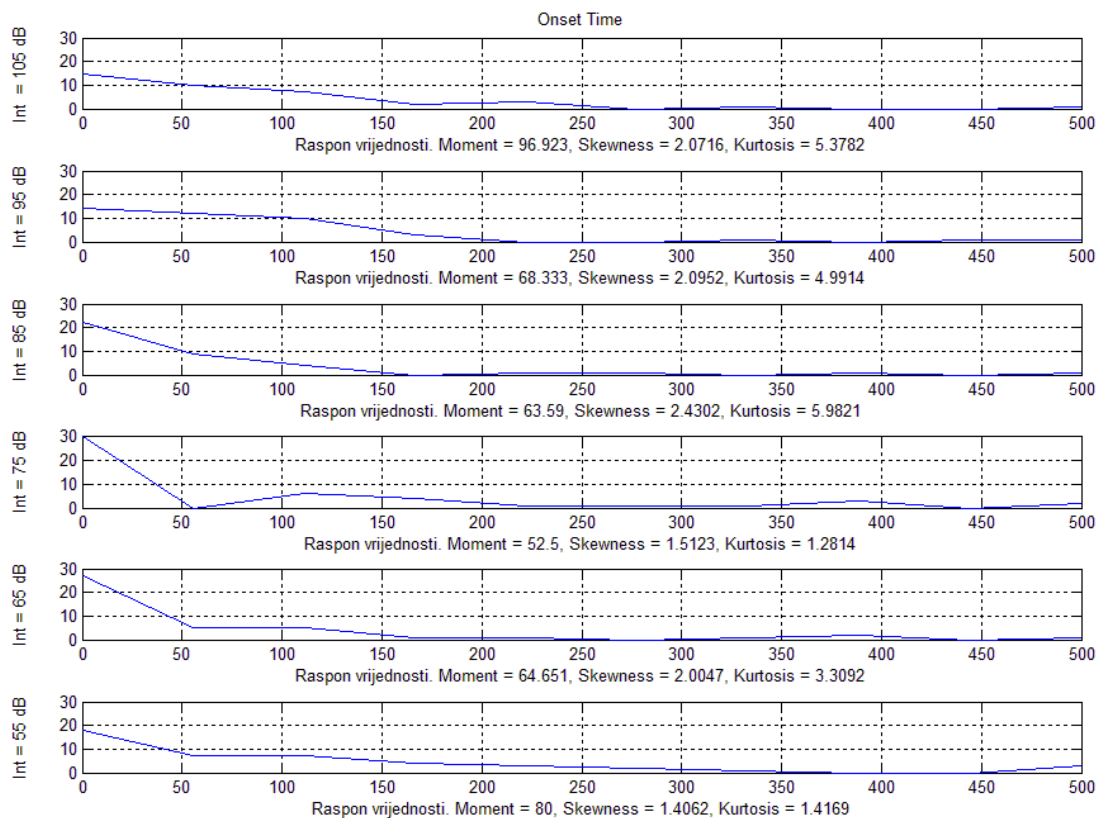
Sve tabele i slike generirane u ovom potpoglavlju mogu se dobiti upisivanjem u komandnu liniju MATLAB-a naredbe:

```
ResponseAnalysis('Snd', 'ResponseCharacteristics')
```

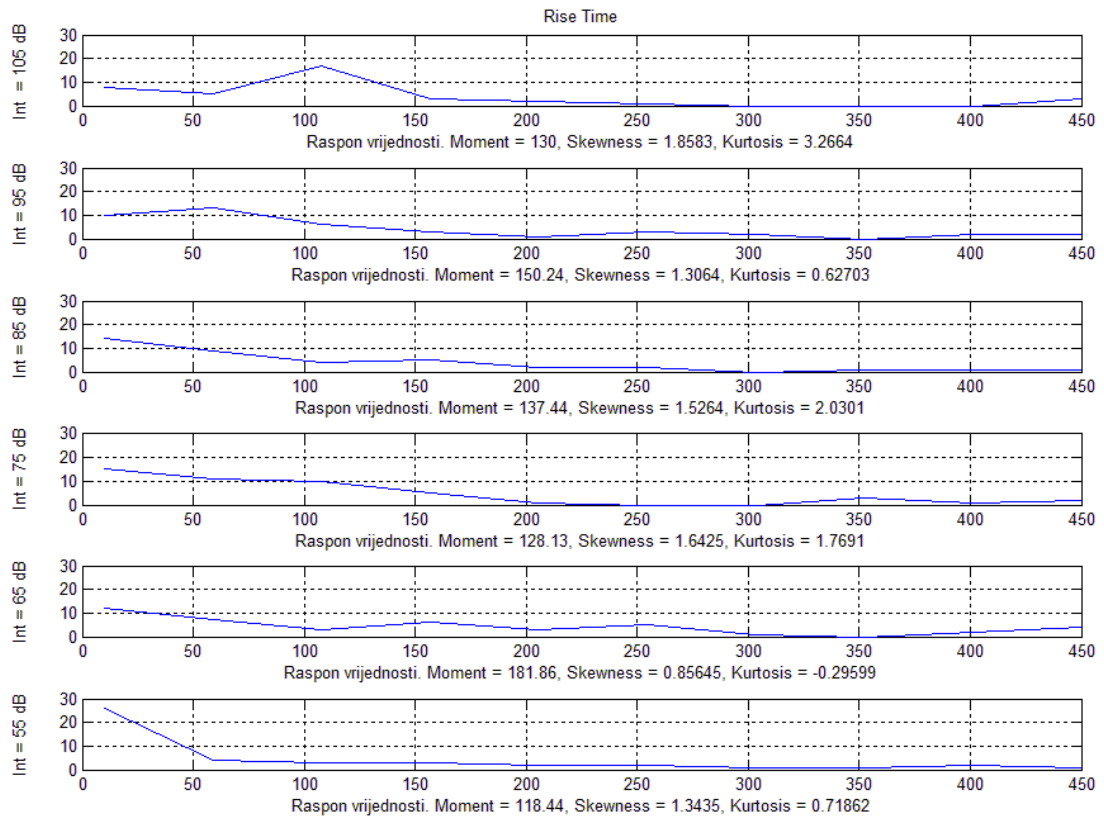
Slike 4.8 – 4.11 prikazuju histograme vršnih vrijednosti  $F_0$  odziva, vremena nastupa  $F_0$  odziva, vremena porasta  $F_0$  odziva, te trajanja  $F_0$  odziva.



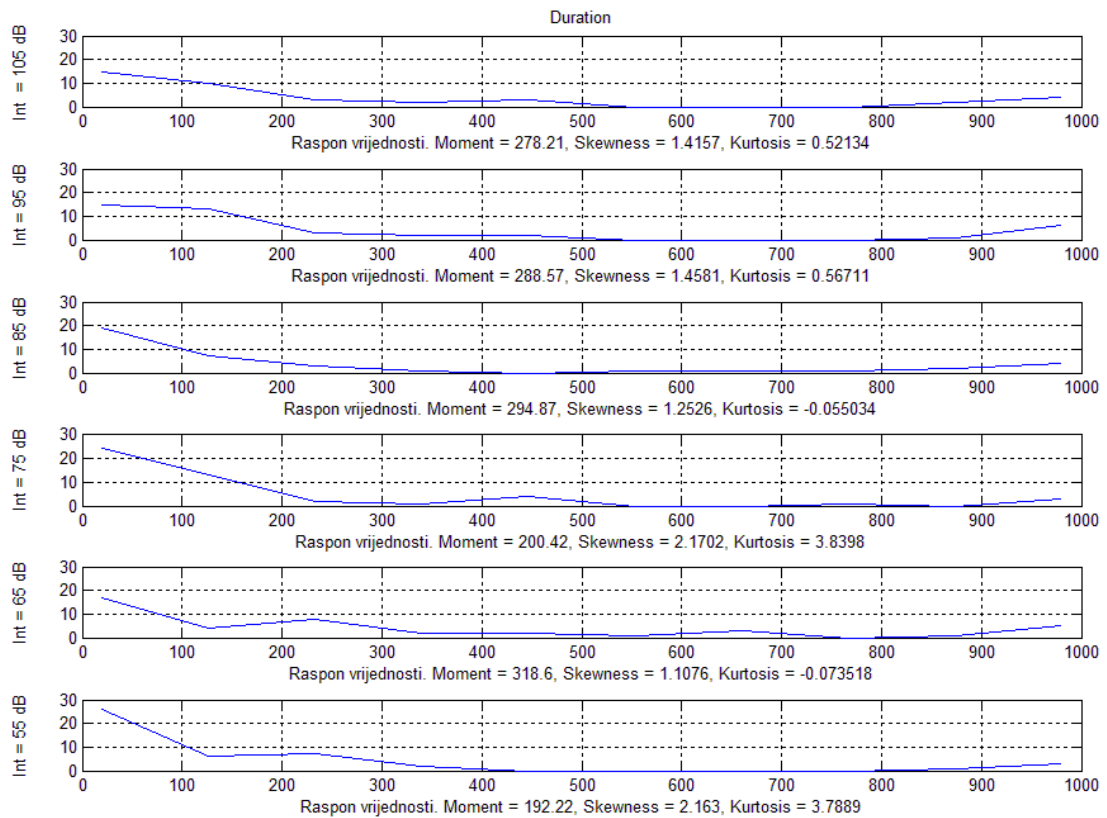
Slika 4.8: Histogram vršnih vrijednosti  $F_0$  odziva, za pobude sa varirajućim intenzitetom



Slika 4.9: Histogram vremena nastupa  $F_0$  odziva, za pobude sa varirajućim intenzitetom



Slika 4.10: Histogram vremena porasta  $F_0$  odziva, za pobude sa varirajućim intenzitetom



Slika 4.11: Histogram trajanja  $F_0$  odziva, za pobude sa varirajućim intenzitetom

Promatrajući momente na slici 4.8 potvrđujemo vezu između intenziteta pobude i vršne vrijednosti odziva  $F_0$  koju smo primijetili na slici 4.3. Srednja vrijednost vršnih vrijednosti opada linearno ovisno o intenzitetu do posljednje dvije razine intenziteta, na kojima opadanje nije linearno, no na tim razinama intenziteta postoji vjerojatnost da ne dođe do pojave, nego da se registrira vršna vrijednost promjena nevezanih za pojavu, tj. nepobuđenog osciliranja  $F_0$ . Za vrijeme nastupa odziva vidimo da opada sa smanjenjem intenziteta, no nelinearno, što se vidi na slici 4.9, te su opet vidljive promjene u ponašanju na nižim razinama intenziteta. Slika 4.10 pokazuje histograme vremena nastupa odziva, koji ne pokazuju nikakvo pravilno ponašanje u odnosu na razine intenziteta. Na slici 4.11 vidimo da trajanje  $F_0$  odziva za viša tri intenziteta raste sa padom intenziteta, dok za niža tri intenziteta, rezultati pokazuju velike razlike, čemu je vjerojatno razlog otežano prepoznavanje pojave na tim razinama intenziteta, te manja vjerojatnost pojavljivanja pojave na tim intenzitetima.

Dobar pokazatelj ovisnosti odziva fundamentalne frekvencije naspram intenziteta pobude je raspon vršnih vrijednosti odziva, tj. varijacija između maksimalne i minimalne vrijednosti vršne vrijednosti u opservacijama odziva na različite intenzitete pobude. One se mogu vidjeti u tabeli 4.3. Vidimo da veći intenziteti pobude dovode do većih vršnih vrijednosti  $F_0$  odziva, te da niža tri intenziteta pobude imaju veću vjerojatnost ne pojavljivanja odziva.

**Tabela 4.3: Raspon vršnih vrijednosti  $F_0$  odziva za pobude varirajućeg intenziteta**

Raspon vršnih vrijednosti $F_0$ odziva za pobude varirajućeg intenziteta						
<b>Int [dB]</b>	105	95	85	75	65	55
<b>Min [Hz]</b>	0,50	0,34	0,22	0,00	0,00	0,00
<b>Max [Hz]</b>	10,66	8,88	4,01	6,72	3,92	4,94

Zaključak statističke analize parametara odziva u odnosu na intenzitet pobude je da odzivi sa razinama intenziteta u rasponu 55-75 dB nemaju praktičnu primjenu pri pravilnom evociranju  $F_0$  startle odziva, radi nižih razina vršne vrijednosti odziva, te povećane vjerojatnosti nepojavljivanja odziva.

Radi velikog broja slika generiranih za proučavanje rezultata statističke analize, primjeri histograma za ostala 3 parametra pobude neće biti prikazana u ovom radu, već će se njihovi rezultati prikazati u kompaktnijoj formi tabela, koje sadržavaju informacije vezane za statističke vrijednosti njihovih razdioba.

Pojedini parametri u tablicama koje analiziramo su:

- Srednja vrijednost (eng. *mean*) - centralna vrijednost razdiobe
- Koeficijent asimetrije razdiobe (eng. *skewness*) – vrijednost koja nam govori koliko je razdioba asimetrična, te smjer asimetričnosti. Nulta vrijednost označava savršeno simetričnu razdiobu, pozitivna je asimetrična u desno, dok je negativna asimetrična u lijevo
- Koeficijent spljoštenosti razdiobe (eng. *kurtosis*) – nam opisuje oblik razdiobe u odnosu na normalnu, vrijednost manja od 0 korespondira razdiobi koja je spljoštenija od normalne, i obrnuto.

Koeficijent spljoštenosti i koeficijent asimetrije razdiobe nam ustvari govore o tome koliko je vrijednosti u razdiobi raspodijeljeno u repovima razdiobe. Ustvari, veći kurtosis nam govori da je veći dio varijance objašnjen rjeđim ekstremnim devijacijama, nego čestim vrijednostima sa nižom devijacijom od srednje vrijednosti. To možemo primijetiti u oštrijoj vršnoj vrijednosti, te debljim repovima razdiobe (Balanda & MacGillivray, 1988). U praksi ako imamo skup podataka koji ima određenu razdiobu na jednom području, te onda kroz određeno područje vrijednosti nema razdiobu, nakon čega slijedi područje vrijednosti udaljeno od osnovnog dijela razdiobe, onda možemo pretpostaviti da su podaci u tom udaljenom području aberantni.

**Tabela 4.4: Izlazni podaci statističke analize karakteristika odziva  $F_0$  za pobude s promjenjivim trajanjem**

Promjenjivo vrijeme trajanja pobude T												
T	Peak			Onset Time			Rise Time			Duration		
	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt
<b>50ms</b>	2,35	1,26	2,25	94,84	2,12	4,02	104,52	2,44	7,32	282,90	1,29	-0,02
<b>30ms</b>	2,45	1,97	5,05	54,83	0,26	-1,16	144,48	1,28	0,83	290,69	1,39	0,40
<b>10ms</b>	1,49	0,94	1,45	51,94	0,91	-0,48	100,00	1,36	1,63	115,48	1,23	1,04

Iz podataka u tabelama 4.4 i 4.5 možemo primijetiti da pobude sa vremenom trajanja od 10 ms nisu prikladne za evociranje startle odziva na  $F_0$ , radi svoje niske vršne vrijednosti i trajanja pobude.

**Tabela 4.5: Raspon vršnih vrijednosti  $F_0$  odziva za pobude sa varirajućim trajanjem**

Raspon vršnih vrijednosti $F_0$ odziva za pobude sa varirajućim trajanjem				
<b>T [ms]</b>		50	30	10
<b>Min [Hz]</b>		0,38	0,56	0,00
<b>Max [Hz]</b>		6,65	8,42	4,07



Zanimljivo je da su pobude trajanja 30 ms pokazale sumjerljivu razinu vršne vrijednosti, sa bržim vremenom nastupa pojave, a sličnim trajanjem pojave, te veće varijacije u vršnim vrijednostima od pobuda trajanja 50 ms. Kako je 30ms trajanje pobude koja se najčešće koristi kod evociranja EMG startle treptaja, u daljnjim istraživanjima moglo bi se istražiti utjecaj pobuda u rasponu trajanja od 30 do 50 ms, da bi se našlo trajanje optimalno za evociranje obiju pojava.

**Tabela 4.6: Izlazni podaci statističke analize karakteristika odziva  $F_0$  za pobude sa promjenjivim vremenom porasta**

	Promjenjivo vrijeme porasta pobude Trise											
	Peak			Onset Time			Rise Time			Duration		
Trise	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt
<b>0ms</b>	3,89	-0,55	-0,33	71,67	-0,40	-0,60	107,50	2,41	4,88	236,67	1,72	1,08
<b>10ms</b>	4,09	0,34	-0,26	60,00	-0,28	0,00	102,73	0,45	-0,24	229,09	2,13	3,38
<b>20ms</b>	3,11	0,03	-0,62	60,67	0,97	0,58	164,67	1,30	0,08	418,00	0,54	-1,51

**Tabela 4.7: Raspon vršnih vrijednosti  $F_0$  odziva za pobude sa varirajućim vremenom porasta**

Raspon vršnih vrijednosti $F_0$ odziva za pobude sa varirajućim vremenom porasta			
Trise [ms]	0	10	20
<b>Min</b>	0,67	0,95	0,42
<b>Max</b>	6,12	8,40	5,91

Kod bloka odziva na pobude različitog vremena porasta, čiji su rezultati statističke analize prikazani u tabelama 4.6 i 4.7 vidimo slične rezultate za pobude sa vremenom porasta 0 i 10 ms, te promjene u svim karakteristikama odziva za pobude sa vremenom porasta 20 ms, što korespondira sa podacima koje znamo o EMG odzivima. Pobude sa vremenom porasta od 10 ms su dale veći raspon vršne vrijednosti  $F_0$  odziva.

Tabela 4.8 prikazuje rezultate analize parametara odziva ovisno o različitim valnim oblicima pobude, koji odudaraju od literature po kojoj je bijeli šum najprikladniji za evociranje odziva (Bluemnthal, Cuthbert, Filion, Hackley, Lipp, & Van Boxtel, 2005). Mogući razlog takvih podataka je niski broj odziva korištenih u analizi.

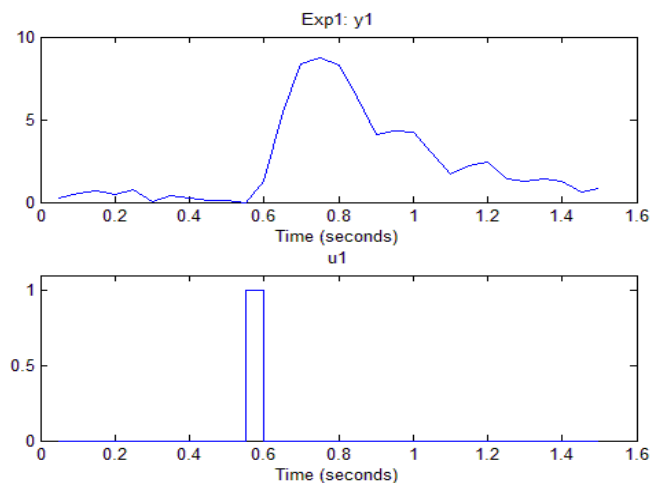
**Tabela 4.8: Izlazni podaci statističke analize karakteristika odziva  $F_0$  za pobude sa promjenjivim valnim oblikom**

	Promjenjiv valni oblik pobude											
	Peak			Onset Time			Rise Time			Duration		
Stim	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt
<b>White</b>	2,09	0,34	-0,60	65,00	0,70	0,60	89,29	1,55	1,14	223,57	1,76	1,46
<b>Colored</b>	2,92	0,53	0,38	61,43	1,70	2,73	128,57	0,56	-0,69	256,43	1,95	3,59
<b>Sinus</b>	2,98	0,14	-1,10	108,57	0,86	1,07	73,57	2,15	4,40	139,29	3,13	8,24

#### 4.6. PREDOBRADA PODATAKA ZA IDENTIFIKACIJU SUSTAVA

Nikakvi posebni postupci predobrade podataka za korištenje u identifikaciji sustava nisu potrebni osim smanjenja frekvencije uzorkovanja ulaznih signala, radi računalne kompleksnosti pojedinih funkcija u identifikaciji sustava, koje bi na visokim frekvencijama uzorkovanja dovele do jako visokih vremena izvođenja programa. Frekvencija uzorkovanja tako se sa 100 Hz spušta na 10 Hz, što je dostatno da se prikažu pojave  $F_0$  odziva, te njihovi specifični parametri. Kod snižavanja frekvencije uzorkovanja treba paziti na očuvanje vrijednosti uzorka oko kojeg smo normirali vrijednost  $F_0$  odziva, te koji sadržava informaciju o vremenu nastupa pobude, što se može osigurati koristeći fazno odstupanje signala kojemu se snižava frekvencija uzorkovanja.

Druga točka predobrade podataka je sintetiziranje pobude koju koristimo za identifikaciju sustava. Taj korak je potreban budući da nismo dokazali linearnu vezu između parametara pobude i vršne vrijednosti odziva, te vremena nastupa i trajanja odziva. Iz tog razloga za pobudu pri identifikaciji sustava koristimo jedinične impulse postavljene u trenutku nastanka pobude. Primjer jednog para  $F_0$  odziva i sintetičke pobude možemo vidjeti na slici 4.12.



Slika 4.12: Primjer para  $F_0$  odziva i sintetičke pobude

#### 4.7. ODABIR PARAMETARA MODELA

Odabir parametara modela se primarno odnosi na izbor vrste modela, te redova polinoma sadržanih u tim modelima. Vrste modela koje mi koristimo su:

- ARX (eng. *Autoregressive model with Exogenous input*) sa strukturom

**Jednadžba 4.1: Struktura ARX modela (Ljung, 2014)**

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)}u(t - nk) + \frac{1}{A(q)}e(t) \text{ gdje su}$$

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na}$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1}$$

- OE (eng. *Output Error model*) sa strukturom

**Jednadžba 4.2: Struktura OE modela (Ljung, 2014)**

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - nk) + e(t) \text{ gdje su}$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1}$$

$$F(q) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{nf}q^{-nf}$$

- ARMAX (eng. *Autoregressive-moving-average model with Exogenous input*) sa strukturom

**Jednadžba 4.3: Struktura ARMAX modela (Ljung, 2014)**

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)}u(t - nk) + \frac{C(q)}{A(q)}e(t) \text{ gdje su}$$

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na}$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1}$$

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc}$$

- BJ (eng. *Box-Jenkins model*) sa strukturom

**Jednadžba 4.4: Struktura BJ modela (Ljung, 2014)**

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - nk) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \text{ gdje su}$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1}$$

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc}$$

$$D(q) = 1 + d_1q^{-1} + \dots + d_{nd}q^{-nd}$$

$$F(q) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{nf}q^{-nf}$$

Operator pomaka označava  $q^{-1}y(t) = y(t - 1)$ .

U ovom radu biti će evaluirana izvedba svih gore navedenih vrsta modela, te će biti diskutirani njihovi rezultati.

Izbor redova pojedinih polinoma u modelima je često vezan uz parametre fizikalne pojave koju pokušavamo modelirati, te se uz alate dostupne za estimacije redova polinoma često svodi na proces pokušaja i pogreške u rasponu kojeg smo estimirali. Optimalna situacija nastupa kada nam redovi brojnika grana u kojima se modelira utjecaj pojave mogu biti sličnog ili jednakog broja, kao što je broj uzoraka pojave do pojavljivanja nekog važnog parametra pojave (npr. vršne vrijednosti), no to katkad nije slučaj radi premalog broja ulaznih podataka za estimaciju i optimizaciju polinoma visokog reda. Redovi nazivnika se najčešće uzimaju što niži, ali uz uvjet što manjih gubitaka u kvaliteti izvedbe modela. Općenito pravilo i za redove nazivnika i brojnika polinoma modela je da se radi računalne kompleksnosti i vremena izvođenja modeliranja uzimaju što niži redovi koji osiguravaju što bolju izvedbu modela (MathWorks, Inc., 2014).

Još jedan red kojeg moramo estimirati je  $nk$ , koji nam govori o ulazno/izlaznom kašnjenju modela čije se okvirne vrijednosti mogu iščitati iz odziva sustava. Kašnjenje modela se može još estimirati iz jednostavnijih estimacija modela, poput estimacije impulsnog odziva, na kojem onda možemo vidjeti okvirno područje kašnjenja fizikalne pojave. (MathWorks, Inc., 2014)

U ovom radu smo izvodili dvije vrste modeliranja  $F_0$  odziva ovisno o načinu na koji smo koristili opservacije  $F_0$  odziva:

- Modeliranje podataka sortiranih po sudioniku i parametru pobude (samo intenzitet pobude)
- Modeliranje podataka sortiranih po parametru pobude (svi parametri)

Svako modeliranje je izvedeno u 2 koraka. U prvom koraku, za izabranu vrstu modela, dan je raspon redova pojedinih polinoma; za svaku kombinaciju redova modela nađeni su modeli koji su dali najbolje rezultate poklapanja (eng. *fit*), te su spremene njihove kombinacije redova. U drugom koraku modeliranja koristilo se najčešće birani red za svaki od parametara modela, te je opet izračunat svaki pojedini fit.

Fit se u oba koraka računao tako da bi se opservacije podijelile principom krosvalidacije na  $K$  grupa, od čega je  $K-1$  grupa korišteno kao skup estimacijskih opservacija, a 1 kao skup

validacijskih opservacija. Estimacijski skupovi su tada korišteni za izračun modela, dok su validacijski skupovi korišteni za računanje izvedbe modela na novim podacima.

Izvedba modela ili fit se izražava pomoću dvije komponente:

- NRMSE (eng. *Normalized Mean Squared Error*)
- SNR (eng. *Signal-to-Noise Ratio*)

Postupak krosvalidacije se tako ponavlja K puta, dok svaki od generiranih skupova jedan put ne bude služio kao skup validacijskih opservacija, te se rezultati pojedinih testiranja usrednjuju.

U prvoj analizi takav postupak je korišten za svaku klasu parametra pobude po kojoj su opservacije sortirane, ili dodatno još, po svakom sudioniku, u postupku modeliranja gdje su opservacije sortirane po klasama parametra pobude i sudionicima. Kako je svaka klasa parametara ili svaki sudionik najčešće koristio različite redove iz početnog skupa svih kombinacija redova s kojim smo ušli u analizu, nađeni su najčešće korišteni redovi za pojedine parametre modela, pod pretpostavkom da često pojavljivanje tog reda za pojedini parametar modela znači inherentnu vezu pojave koju analiziramo sa modelom, te je drugi korak modeliranja izveden sa tom kombinacijom redova.

#### 4.8. USPOREDBA RADA RAZLIČITIH MODELA I REZULTATI

##### 4.8.1. ANALIZA ODZIVA SORTIRANIH PO PARAMETRIMA POBUDE

Kao što smo već naveli, u ovoj analizi su opservacije svih sudionika ubačene u iste grupe, ovisno o tome kakve su bile pobude.

Tabela 4.9 nam pokazuje sve kombinacije rezultata izvedbe modeliranja odziva sortiranih po parametrima pobude. Stupci nam redom u parovima pokazuju rezultate po pojedinim modelima (npr Arx1st i Arx2nd), gdje prvi stupac prikazuje usrednjene rezultate analize u kojoj su se tražili optimalni redovi, dok drugi stupac pokazuje rezultate modeliranja sa optimalnim redovima nađenim u prošloj analizi. Redovi koji su odabrani kao optimalni su redovi modela, koji u grupi modela sa pozitivnim SNR-om imaju maksimalan fit.

Vidimo da jednostavniji tipovi modela redom imaju puno lošije rezultate naspram kompliciranijih, te da Box-Jenkins modeli većinom imaju puno bolje rezultate izvedbe od ostalih modela.

Tabela 4.9: Rezultati modeliranja  $F_0$  odziva, po različitim grupama pobuda i modelima

Rezultati modeliranja odziva na pobude varirajućeg intenziteta INT									
INT		Arx1st	Arx2nd	OE1st	OE2nd	Armax1st	Armax2nd	BJ1st	BJ2nd
105 dB	Fit[%]	0,67	7,39	10,08	13,92	2,67	6,98	19,19	20,66
	SNR[dB]	5,63	6,89	4,49	4,86	2,69	7,23	4,16	9,71
95 dB	Fit[%]	-0,72	2,37	17,44	22,73	-0,88	3,11	8,86	13,43
	SNR[dB]	-0,91	2,61	3,24	5,03	-4,26	2,04	-0,06	5,71
85 dB	Fit[%]	-1,97	4,74	6,33	9,16	-2,20	15,00	11,79	22,35
	SNR[dB]	-3,57	-3,21	-8,49	-5,40	-8,81	-12,79	-2,17	3,22
75 dB	Fit[%]	-0,54	2,27	6,06	10,46	-0,46	7,04	10,96	12,05
	SNR[dB]	-6,59	-4,39	-8,11	-4,10	-10,73	-3,71	-5,14	0,89
65 dB	Fit[%]	5,11	8,50	4,55	6,56	4,11	17,36	14,05	17,14
	SNR[dB]	-9,99	-9,41	-15,63	-13,41	-15,00	-6,98	-12,73	-5,72
55 dB	Fit[%]	-1,41	4,29	8,31	9,76	3,59	8,21	16,36	23,94
	SNR[dB]	-9,04	-7,99	-9,98	-10,35	-12,54	-5,72	-7,74	-0,02
Rezultati modeliranja odziva na pobude varirajućeg trajanja T									
T		Arx1st	Arx2nd	OE1st	OE2nd	Armax1st	Armax2nd	BJ1st	BJ2nd
50 ms	Fit[%]	1,45	3,69	10,66	7,21	1,73	2,19	11,96	14,46
	SNR[dB]	-0,28	2,85	-1,23	-1,42	-2,76	3,09	4,10	5,01
30 ms	Fit[%]	-0,33	4,08	11,84	26,18	1,89	4,01	16,92	24,42
	SNR[dB]	0,30	3,76	0,86	6,10	-2,09	2,96	1,54	6,49
10 ms	Fit[%]	7,75	10,03	14,77	12,83	6,23	3,26	17,48	22,50
	SNR[dB]	-4,68	-2,77	-0,90	1,00	-11,05	-8,42	-68,83	-46,67
Rezultati modeliranja odziva na pobude varirajućeg vremena porasta									
Trise		Arx1st	Arx2nd	OE1s t	OE2nd	Armax1st	Armax2nd	BJ1st	BJ2nd
0 ms	Fit[%]	1,24	9,57	2,87	6,28	0,87	2,50	15,73	13,01
	SNR[dB]	3,28	0,96	5,32	5,54	4,30	7,10	-276,50	10,57
10 ms	Fit[%]	3,06	14,18	10,56	23,13	5,09	1,76	21,22	13,38
	SNR[dB]	6,05	8,06	6,93	7,48	5,45	-2,02	-10,76	6,02
20 ms	Fit[%]	11,57	13,45	16,73	24,64	8,07	3,48	17,09	18,64
	SNR[dB]	3,93	5,04	1,51	1,34	2,33	-0,95	-71,25	9,71
Rezultati modeliranja odziva na pobude varirajućeg valnog oblika									
Stim		Arx1st	Arx2nd	OE1s t	OE2n d	Armax1st	Armax2nd	BJ1st	BJ2nd
White	Fit[%]	0,57	9,79	1,81	-1,70	-4,17	2,16	10,90	23,22
	SNR[dB]	2,46	3,11	2,28	0,62	-3,33	-9,74	-234,04	-39,01
Color	Fit[%]	4,37	14,43	-1,83	4,58	3,54	0,91	18,18	15,17
	SNR[dB]	1,48	0,44	2,43	1,43	-1,00	-4,57	-202,48	-233,83
Sinus	Fit[%]	7,20	9,04	12,19	6,84	7,65	3,66	14,25	22,55
	SNR[dB]	4,80	6,82	3,39	3,93	3,09	2,11	-48,41	9,10

Takvo ponašanje rezultata očekujemo radi razlike u prijenosnoj funkciji Box-Jenkins modela naspram ostalih. Ono što ih razlikuje je „najfleksibilnija“ grana šuma, tj. u

potpunosti prilagodljiva prijenosna funkcija grane šuma, sa vlastitim polinomima u nazivniku i brojniku prijenosne funkcije. S druge strane, ARX i ARMAX modeli imaju zajednički polinom nazivnika koji se mora optimizirati i za granu signala i za granu šuma, dok OE modele karakterizira nedostatak utjecaja na šum u ikakvom obliku.

Razlog iz kojeg to ovako utječe na naše rezultate je u tome da ono što mi smatramo šumom u fizikalnoj pojavi koju modeliramo ustvari nije pravi šum nego superpozicija odziva nekolicine prirodnih pojava koje se događaju tijekom fonacije, npr. adaptacija i korekcija fundamentalne frekvencije govora nakon procesiranja informacije u mozgu, što je pojava koja nastupa sporije nego naša refleksna pojava koju analiziramo/modeliramo.

Ono što treba primijetiti je i razlika u rezultatima ovisno o različitim dijelovima tablice, tj. ovisno o grupama opservacija. Uzimajući u obzir i SNR i postotak fit-a, grupa opservacija sa pobudama sa varirajućim intenzitetima ima najbolje rezultate naspram ostalih grupa, čemu su najvjerojatnije razlozi, optimalni parametri pobude, koji daju najbolje raspoznatljive odzive, te veći broj opservacija u tim grupama.

Iz istog razloga, tj. optimalnih parametara pobude, možemo vidjeti i pad u rezultatima modeliranja ovisan o intenzitetu pobude, (najbolje vidljiv po SNR-u druge Box-Jenkins analize grupe opservacija sa varirajućim intenzitetom). Iako rezultati fit-a ostaju koliko toliko prihvatljivi, SNR pada na nižim intenzitetima pobude. To nam ustvari govori da tada modeliramo većinom šum, tj. pojave koje ne želimo analizirati.

Iz rezultat je vidljivo da Box-Jenkins modeli jedini daju prihvatljive rezultate. ARX modeli su sasvim neprikladni za dalji rad, te da bi se daljnjim metodama rafiniranja i ponovljene optimizacije možda moglo koristiti i OE i ARMAX modele, kao alternativu veoma kompleksnim, te računalno zahtjevnim Box-Jenkins modelima.

Radi najboljih rezultata u analizi za primjer ćemo prikazati karakteristike jednog od dobivenih Box-Jenkins modela, kod modeliranja grupe opservacija sa varirajućim intenzitetom pobude, za intenzitet pobude od 105 dB.

Primjerni model je dan jednadžbom

**Jednadžba 4.5: Jednadžba prijenosne funkcije primjernog BJ modela za  $F_0$  odziv**

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t) + \frac{C(z)}{D(z)}e(t)$$

*uz vrijednosti pripadnih polinoma*

$$B(z) = -0.1799z^{-1} + 1.163z^{-2} - 0.6328z^{-3}$$

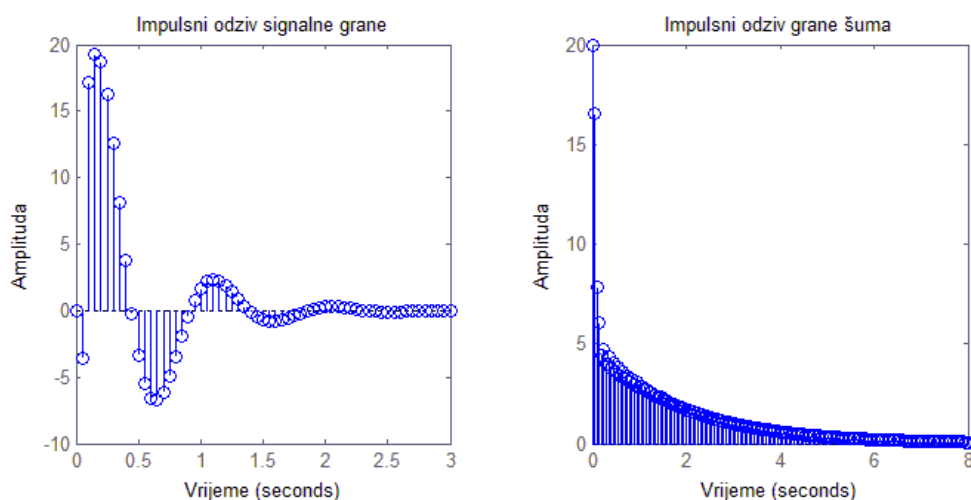
$$C(z) = 1 + 0.4368z^{-1} - 0.7893z^{-2} - 0.2761z^{-3}$$

$$D(z) = 1 - 0.3897z^{-1} - 0.8606z^{-2} + 0.2841z^{-3}$$

$$F(z) = 1 - 1.689z^{-1} + 0.7995z^{-2}$$

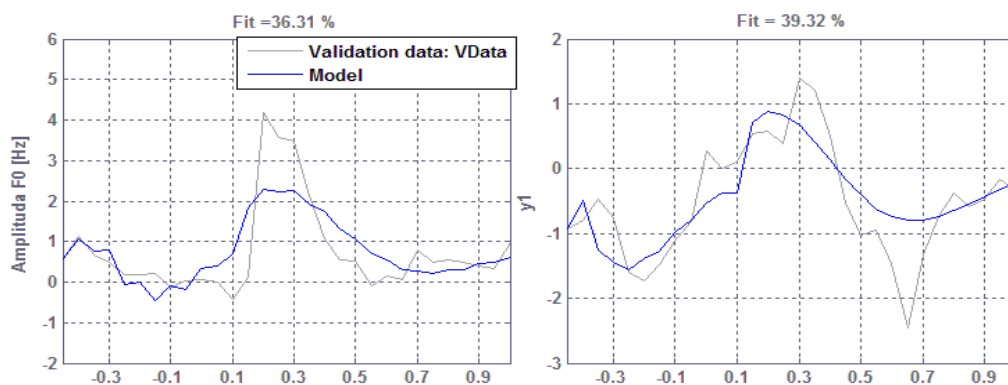
Estimacijski skup podataka se sastojao od 35  $F_0$  odziva i pripadajućih sintetiziranih pobuda jediničnim impulsom u vremenu nastupa pobude.

Prikazani model ima usrednjeni fit za estimacijski skup podataka od 38.29 % sa rasponom od -26,7 % do 67.82 %, finalnu predikcijsku pogrešku FPE = 0.5855, te usrednjeni MSE = 0.6076. SNR modela iznosi 5.98 dB, te su impulsni odzivi signalne grane i grane šuma prikazani na slici 4.13.



Slika 4.13: Impulsni odzivi signalne grane i grane šuma primjernog BJ modela za  $F_0$  odzive

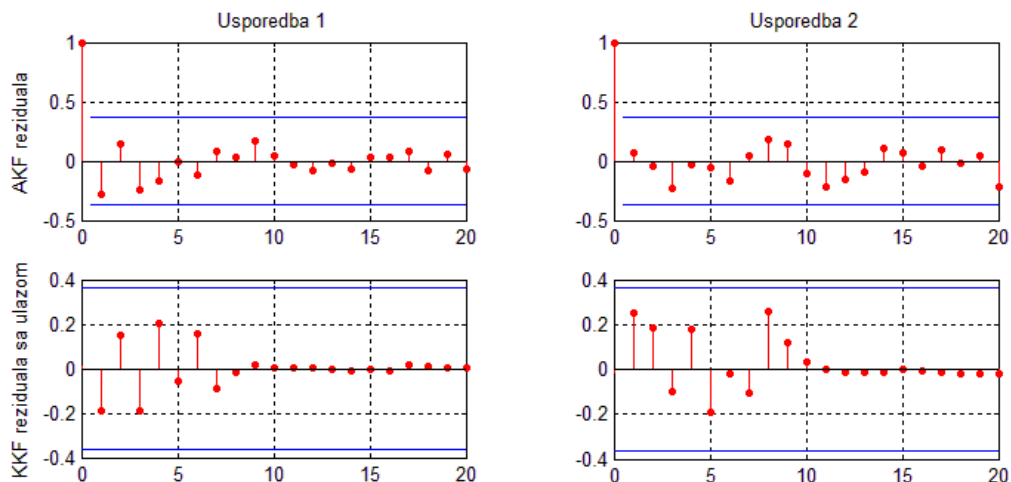
Validacijski skup podataka se sastoji od 4  $F_0$  odziva, koji nisu sadržani u estimacijskom skupu podataka. Usrednjeni fit za validacijski skup podataka je 19.005 %, sa rasponom od 11.91 % od 39.32 %.



Slika 4.14: Primjeri usporedbe prediktiranog izlaza modela i mjerenog izlaza validacijskog skupa podataka



Slika 4.14 prikazuje dva primjera usporedbe prediktiranog izlaza modela i mjenog izlaza validacijskog skupa podataka. Na lijevoj slici se vidi da je model prikupio dovoljno podataka da opiše približan trenutak nastajanja pobude, no da bi trebalo povećati broj dostupnih opservacija pri treniranju modela kako bi model bolje opisao dinamiku sustava. Desna slika nam pokazuje  $F_0$  odziv kod kojeg je intenzitet pojave relativno nizak te su prisutne pojave nevezane za  $F_0$  odziv veličine sumjerljive samome odzivu. Unatoč tome sustav relativno dobro opisuje pojavu.



Slika 4.15: Pripadajući prikaz analize reziduala predikcije za dva slučaja prikazana na slici 4.14

Prateći Box-Jenkins metodologiju (MathWorks Inc., 2014), korak nakon preliminarnog modeliranja sustava je validacija modela. Prikaz usporedbe vremenskih odziva kakav možemo vidjeti na slici 4.14 je najrudimentarniji oblik validacije sustava, dok su više matematičke metode bazirane na promatranju ponašanja greške predikcije.

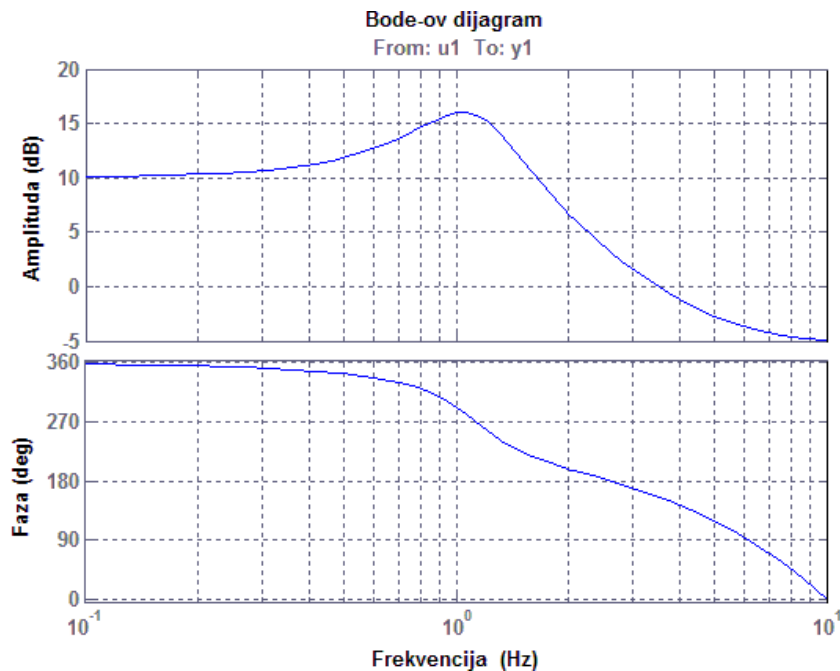
Osnovnu veličinu koju promatramo tj. grešku predikcije nazivamo rezidualom. Rezidual je razlika između prediktiranog izlaza modela i pripadnog mjenog izlaza validacijskog skupa podataka. Laički, reziduali bi bili dio podataka koji nisu objašnjeni modelom.

Kada izračunamo rezidualne, kako bi bili sigurni da model radi što kvalitetnije izvodimo 2 testa (MathWorks Inc., 2014):

1. Test slučajnosti podataka (eng. *whiteness test*): računamo auto-korelacijsku funkciju modela, te iz njenoga oblika vidimo kvalitetu izvedbe. Auto-korelacijska funkcija kvalitetnog modela je oblika bijelog šuma, tj. sve vrijednosti osim prve su joj unutar intervala povjerenja. Slučajna priroda reziduala nam tu ustvari znači da reziduali nisu autokorelirani, tj. da ne nose nikakvu informaciju o samoj pojavi

2. Test nezavisnosti (eng. *independence test*): računamo kros-korelacijsku funkciju reziduala sa ulazom sustava. Reziduali dobrog sustava nisu korelirani sa prošlim ulaznim podacima. Kada postoji korelacija, tj. vrijednost kros-korelacijske funkcije izvan intervala pouzdanosti, na nekoj vremenskoj vrijednosti  $k$ , to nam govori da dio izlazne vrijednosti  $y(t)$  koja potiče od vrijednosti ulaza  $u(t-k)$  nije dobro objašnjen modelom

Slika 4.15 nam pokazuje da su obe predikcije sa slike 4.14 prošle oba testa.

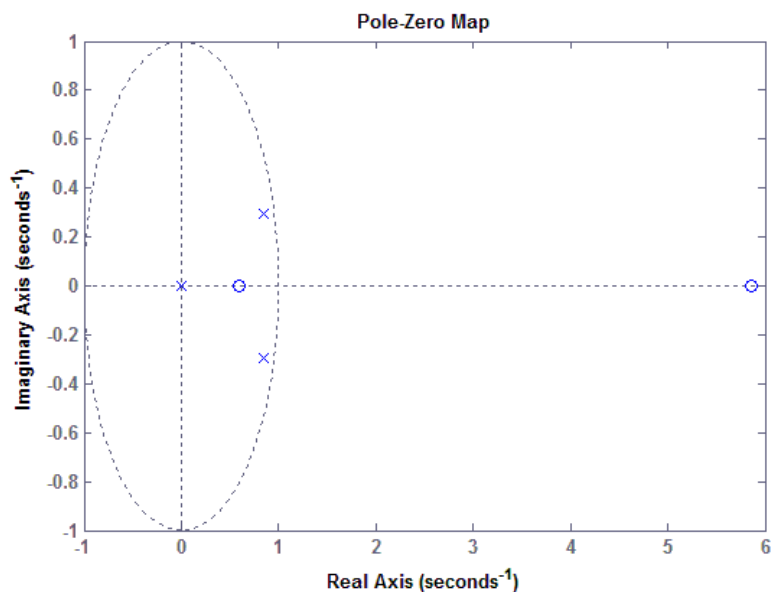


Slika 4.16: Prikaz frekvencijske karakteristike primjernog BJ modela  $F_0$  odziva

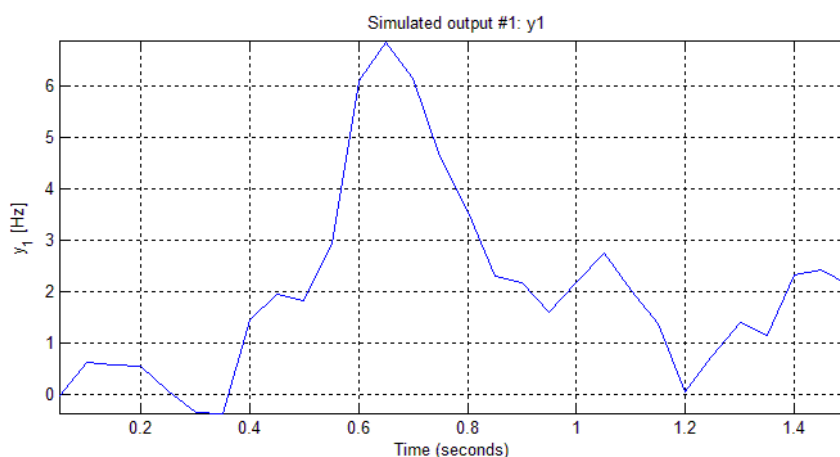
Slika 4.16 nam prikazuje Bode-ov dijagram, tj amplitudno-frekvencijsku i fazno-frekvencijsku karakteristiku modela, dok nam slika 4.17 prikazuje polove i nule modela. Ono što vidimo iz obje slike je da je sustav stabilan, da je glavni doprinos kompleksno konjugiranih polova u blizini frekvencije  $f = 1\text{ Hz}$ . Sustav nije minimalne faze, što u daljnjem radu treba uzeti u obzir, te pokušati provesti neku od metoda pretvaranja modela u sustav sa minimalnom fazom, te onda provesti reevaluaciju modela.

Grupno vrijeme kašnjenja modela je 5.1354.

Zadnja točka provjere rada modela, nam je simulacija odziva modela na pravokutnu pobudu trajanja 50 ms kakve nalazimo u eksperimentu. Pri takvom simuliranju, grana šuma je pobuđena bijelim šumom čiji su parametri izračunati pri modeliranju. Prikaz takvoga odziva možemo vidjeti na slici 4.18. Možemo vidjeti da sustav kvalitetno prikazuje pojavu koju smo modelirali.



Slika 4.17: Prikaz nula i polova primjernog modela  $F_0$  odziva u z ravnini



Slika 4.18: Prikaz odziva modeliranog sustava na pravokutnu pobudu trajanja 50 ms

#### 4.8.2. ANALIZA ODZIVA SORTIRANIH PO SUDIONICIMA I PARAMETRIMA POBUDE

Kao što je već navedeno, u ovoj analizi je provedeno modeliranje svih vrsta modela, pojedinačno po svim sudionicima, koristeći grupu opservacija sa varirajućim intenzitetom pobude. Korištena je samo ta grupa opservacija, jer je jedina imala dovoljno opservacija po sudioniku kako bi modeliranje bilo moguće. Čak su i kod nje, za neke intenzitete, neki sudionici morali biti izbačeni iz modeliranja radi preniskoga broja opservacija.

Tabela 4.10 nam tako pokazuje rezultate modeliranja za sve vrste modela, i sve intenzitete pobude, usrednjene po sudionicima, budući da bi izrada pojedinačne tabele za svakog sudionika tražila previše prostora i onemogućila pravu analizu podataka.

Korišten je format iz prošlih tabela u kojemu je za svaku vrstu modela provedeno dvije analize, prva koja je tražila najčešće korištene redove polinoma model, te druga koja je izvedena sa izračunatim redovima polinoma.

Prva stvar koju možemo primijetiti u tabeli 4.10 je da jednostavniji modeli sada pokazuju bolje performanse nego kompliciraniji Box-Jenkins model, koji nam je dosad davao najbolje rezultate. To možemo objasniti manjim brojem opservacija koje koristimo za treniranje modela, što omogućava da modeli koji imaju najmanji broj parametara koji se moraju optimizirati, lakše optimiziraju te parametre.

**Tabela 4.10: Rezultati modeliranja  $F_0$  odziva usrednjenih po sudionicima, za pobude varirajućeg intenziteta**

Rezultati modeliranja $F_0$ odziva usrednjenih po sudionicima, za pobude varirajućeg intenziteta									
INT		Arx1st	Arx2nd	OE1st	OE2nd	Armax1st	Armax2nd	BJ1st	BJ2nd
<b>105 dB</b>	Fit[%]	22,62	-8,71	39,06	18,15	40,26	-6,77	42,38	7,81
	SNR[dB]	3,51	7,00	5,20	5,01	5,38	-7,95	-70,92	-45,17
<b>95 dB</b>	Fit[%]	14,07	-2,07	22,65	-3,57	22,68	-5,78	36,44	-0,87
	SNR[dB]	2,42	2,33	2,42	-0,57	0,96	-4,26	-61,17	-19,97
<b>85 dB</b>	Fit[%]	14,15	-10,23	28,42	-10,76	26,27	-2,74	31,76	7,00
	SNR[dB]	-1,10	0,46	2,20	-1,27	2,65	-2,99	-54,74	-92,80
<b>75 dB</b>	Fit[%]	5,53	-15,99	22,42	-0,68	22,58	-3,02	27,62	4,61
	SNR[dB]	-1,45	-0,46	0,78	-1,20	-1,92	-7,03	-76,61	-75,57
<b>65 dB</b>	Fit[%]	14,34	-10,23	20,09	-7,76	30,22	6,87	31,19	10,38
	SNR[dB]	-4,00	-4,12	-0,83	-2,10	-6,79	-9,72	-94,23	-51,90
<b>55 dB</b>	Fit[%]	14,82	-9,55	28,60	5,47	28,21	7,88	33,08	9,51
	SNR[dB]	-2,27	-1,87	-1,48	-0,57	-1,36	-9,05	-29,74	-46,76

Druga stvar koja se može primijetiti je velika razlika između performansi u prvoj i drugoj analizi. Razlog toga je što su rezultati prve analize ustvari usrednjeni rezultati, mnogo različitih modela, svaki sa svojim različitim redovima polinoma, koji su posebno optimizirani za svakog sudionika. Kada u slijedećoj analizi pokušamo iz skupa modela najboljih za pojedine sudionike razlučiti koji bi model mogao biti zajednički, uvelike gubimo na performansama modeliranja.

Zadnja stvar koju moramo primijetiti je da su od svih modela, samo najjednostavniji OE modeli dali rezultate prihvatljive za daljnji rad, ili eventualno korištenje, budući da su rezultati ostalih vrsta modela imali velike padove u performansama ili fit-a ili SNR-a u drugim fazama analize.

Iz tog razloga ovdje ćemo prezentirati jedan primjer OE modela. Prikazati ćemo OE model trećeg sudionika za grupu opservacija gdje je pobuda bila intenziteta 105 dB.

Model je dan jednažbom

Jednažba 4.6: Jednažba prijenosne frekvencije primjernog OE modela  $F_0$  odziva

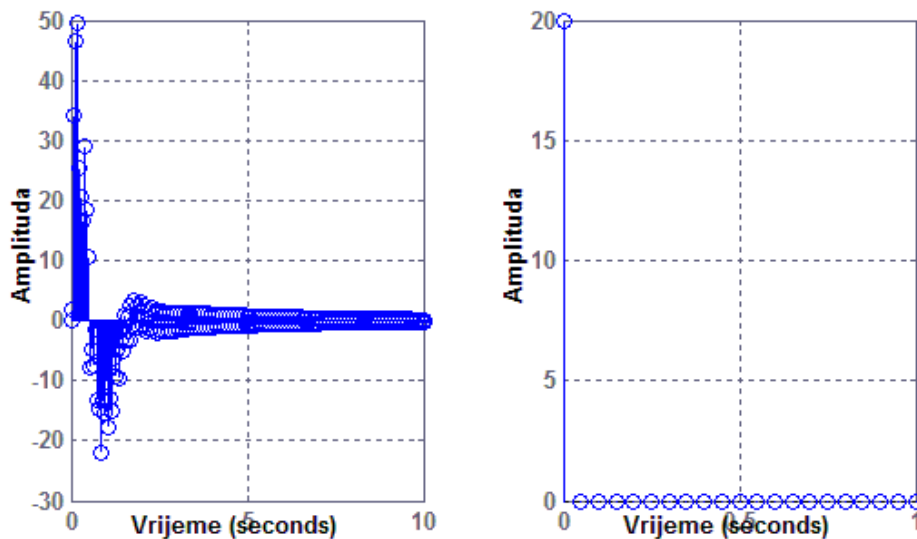
$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t) + e(t)$$

uz vrijednost pripadnih polinoma

$$B(z) = 0.08856z^{-1} + 1.505z^{-2} - 1.563z^{-3}$$

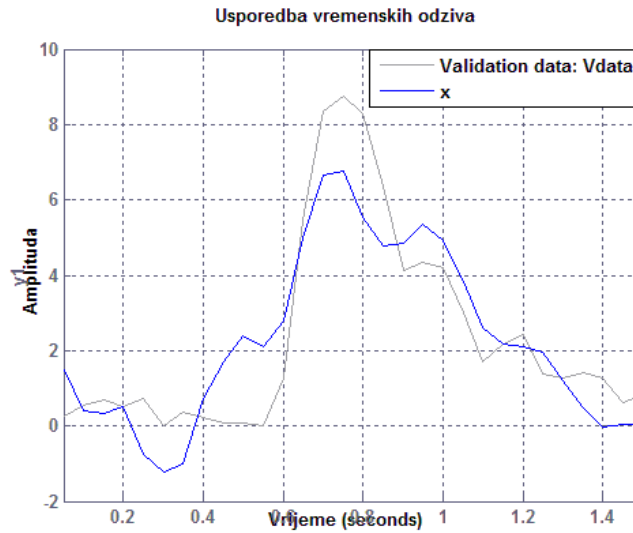
$$F(z) = 1 - 2.358z^{-1} + 1.734z^{-2} + 0.4197z^{-3} - 2.027z^{-4} + 1.817z^{-5} - 0.5754z^{-6}$$

Estimacijski skup podataka se sastojao od 3  $F_0$  odziva i pripadajućih pobuda sintetiziranih jediničnim impulsom u vremenu nastupa prave pobude. Prikazani model ima usrednjeni fit za estimacijski skup podataka od 43.93 % sa rasponom od 33.04 % do 50.76 %, finalnu predikcijsku pogrešku  $FPE = 0.4436$ , te usrednjeni  $MSE = 0.4062$ .  $SNR$  modela iznosi 4.994 dB, te su impulsni odzivi signalne grane i grane šuma prikazani na slici 4.19.



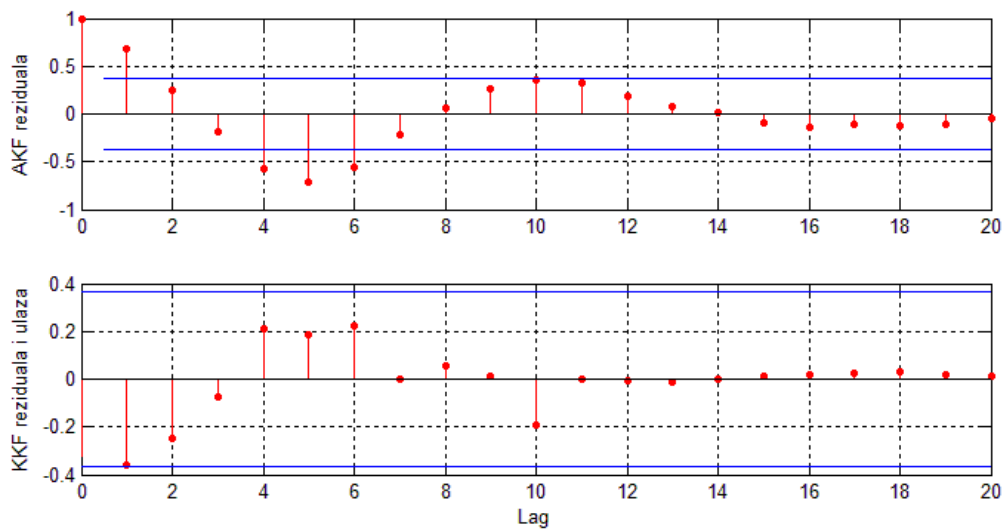
Slika 4.19: Impulsni odzivi signalne grane i grane šuma primjernog OE modela  $F_0$  odziva

Validacijski skup podataka se sastoji od 1  $F_0$  odziva, koji nije sadržan u estimacijskom skupu podataka. Fit za validacijski skup podataka je 52.23 %, te se na slici 4.20 može vidjeti usporedba prediktiranog izlaza modela i mjenog izlaza validacijskog skupa podataka.



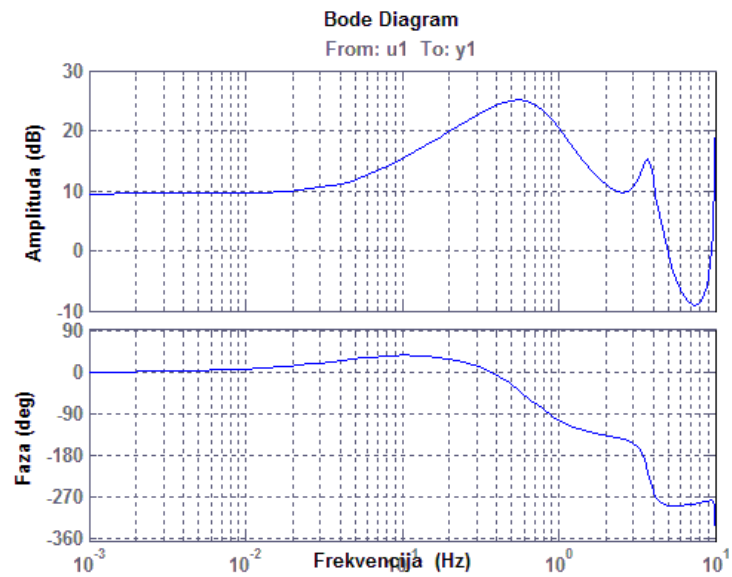
Slika 4.20: Usporedba prediktiranog izlaza modela i mjerenih validacijskih podataka

Slika 4.21 prikazuje analizu reziduala za usporedbu prikazanu na slici 4.20.



Slika 4.21: Prikaz analize reziduala predikcije za slučaj prikazan na slici 4.20

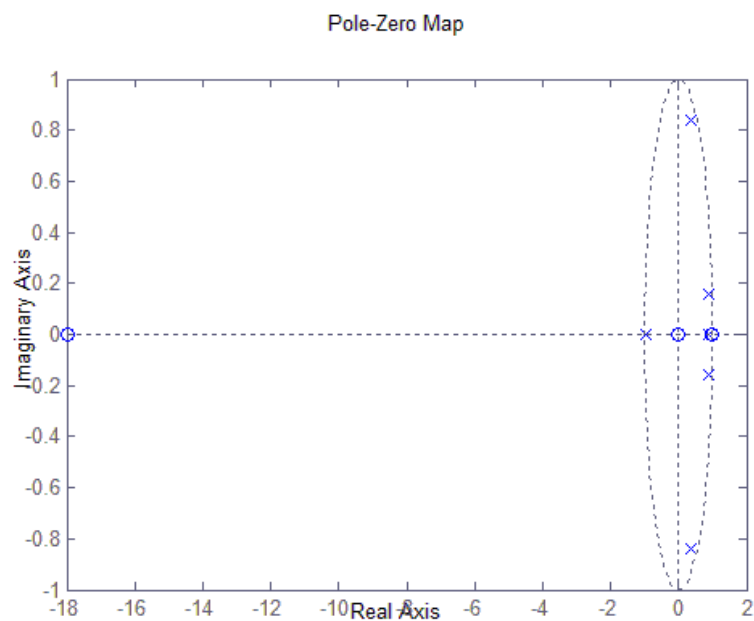
Na slici 4.21 vidimo da auto-korelacijska funkcija reziduala ne prolazi test slučajnosti, no po literaturi, to je radi specifičnosti OE modela i generalno nam je važnije da model prolazi test nezavisnosti (MathWorks Inc., 2014).



Slika 4.22: Frekvencijska karakteristika primjernog OE modela  $F_0$  odziva

Slike 4.22 i 4.23 nam dalje prikazuju Bode-ov dijagram, te nule i polove modela. Iz njih vidimo da je sustav stabilan, te da su dva glavna doprinosa frekvencijskoj karakteristici od kompleksno konjugiranih polova, te pola na jediničnoj kružnici blizu Nyquistovoj frekvenciji. Sustav nema minimalnu fazu za što vrijede iste primjedbe kao i za model u prošlom potpoglavlju.

Grupno vrijeme kašnjenja modela je 7.685.



Slika 4.23: Prikaz nula i polova primjernog OE modela  $F_0$  odziva

#### 4.9. DISKUSIJA REZULTATA IDENTIFIKACIJE SUSTAVA $F_0$ ODZIVA

Iz analize sortirane po parametrima pobude vidjeli smo najveću prikladnost Box-Jenkins modela za modeliranje tako kompleksne pojave u slučaju da imamo veliki broj opservacija. Uz to smo saznali da se većim brojem opservacija, koje sadržavaju specifičnosti  $F_0$  odziva različitih govornika može modelirati sustav koji opisuje sve specifičnosti.

S druge strane, analizom sortiranom po sudionicima smo primijetili da kompleksniji modeli imaju puno lošije performanse od jednostavnijih u slučaju kada imamo manji broj opservacija za treniranje modela, te kada ne moramo pri modeliranju uzimati u obzir specifičnosti odziva pojedinih govornika, jer modeliramo odzive isključivo pojedinačnih govornika.

Ovi rezultati postavljaju dobro podlogu za daljnje istraživanje pojave  $F_0$  odziva na zvučne pobude visokog intenziteta i impulsnog tipa, te za istraživanje pojava koje smo mi u ovim analizama klasificirali kao šum, no koje su ustvari veoma važne pojave pri fonaciji.



## 5. ANALIZA EMG ODZIVA ORBIS OCULARIS MIŠIĆA

### 5.1. OBRADA EMG SIGNALA

EMG signal za razliku od  $F_0$  ili glasovnog signala, radi svojih svojstava zahtjeva veliku količinu obrade prije nego što se može koristiti za analizu.

Prvo se pojasnim branama moraju ukloniti utjecaji smetnje gradske mreže u području oko 50 Hz, te utjecaji viših harmonika, koji su u našem slučaju bili na frekvencijama 100, 200 i 400 Hz što smo iščitali gledajući spektralnu karakteristiku signala.

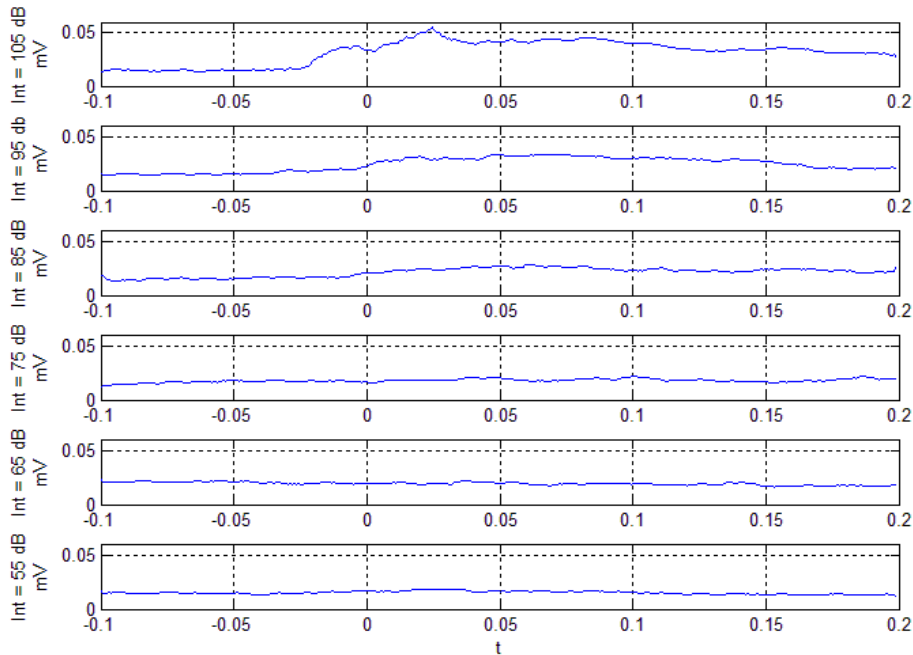
Signal se tada dodatno filtrira pojasno-propusnim FIR filtrom stotog reda u području između 28 i 500 Hz gdje je najviše informacija koje nas zanimaju. Signal se tada valno ispravlja, budući da u svakom trenutku nakon nastupa pobude postoji jednaka šansa da elektrode zabilježe pozitivnu ili negativnu promjenu, a predznak vala nije toliko važan kod diferencijalnog senziranja (Bluemthal, Cuthbert, Filion, Hackley, Lipp, & Van Boxtel, 2005). Uz to, kada bi se signal koji nije valno ispravljen koristio u analizi usrednjenih EMG odziva, pozitivni i negativni periodi startle treptaja bi se iznivelirali i dobili bi ravne odzive.

Zadnji korak obrade EMG odziva je ugađivanje valno ispravljene konture, te smo se mi u ovom radu odlučili za ugađivanje sa Moving-Average filtrom, s prozorom od 20 uzoraka. Treba se navesti da ugađivanje konture utječe na apsolutne vrijednosti parametara odziva, ali da su relativne vrijednosti sačuvane, te da po literaturi postoji visoka korelacija između ugađenih i ne ugađenih podataka (Bluemthal, Cuthbert, Filion, Hackley, Lipp, & Van Boxtel, 2005). Za taj korak smo se odlučili radi lakšeg raspoznavanja EMG pojava u odsječcima kod kojih je razina šuma i smetnje čak nakon filtriranja bila sumjerljiva pojavi startle treptaja.

### 5.2. ANALIZA USREDNJENIH EMG ODZIVA

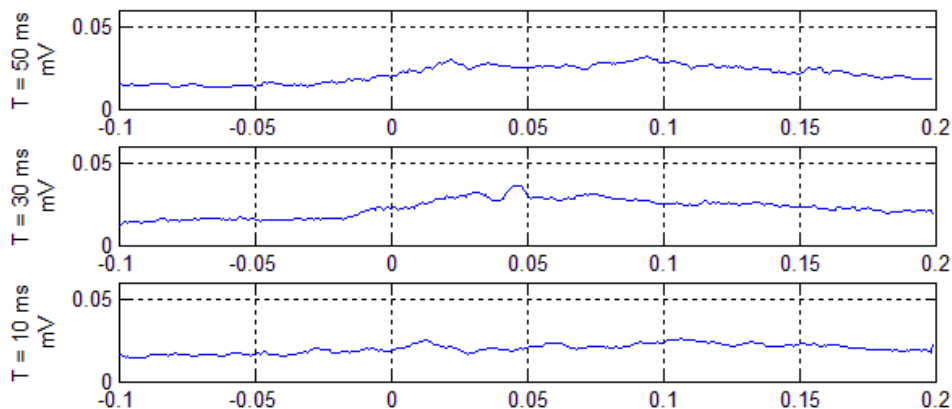
Analizom usrednjenih EMG odziva kao i u potpoglavlju 4.4 pokušavamo saznati što više o parametrima odziva prije nego pristupimo statističkoj analizi. Slike 5.1 – 5.4 nam tako prikazuju usrednjene EMG odzive za pobude različitih varirajućih parametara, redom intenziteta, trajanja, vremena porasta, te valnog oblika pobude. Slika 5.1 nam pokazuje očekivanu vezu intenziteta pobude i vršne vrijednosti odziva, te potpunu neprikladnost razina ispod 85 dB za evociranje startle treptaja. Pokazuje nam da je sa intenzitetom

pobude, povećano i trajanje odziva, budući da vidimo da se odziv još uvijek nije smirio skoro 0.2 sekunde nakon nastupa pobude na visokim razinama intenziteta.



Slika 5.1: Usrednjeni EMG odzivi, za pobude sa varirajućim intenzitetom, usrednjene po klasama intenziteta

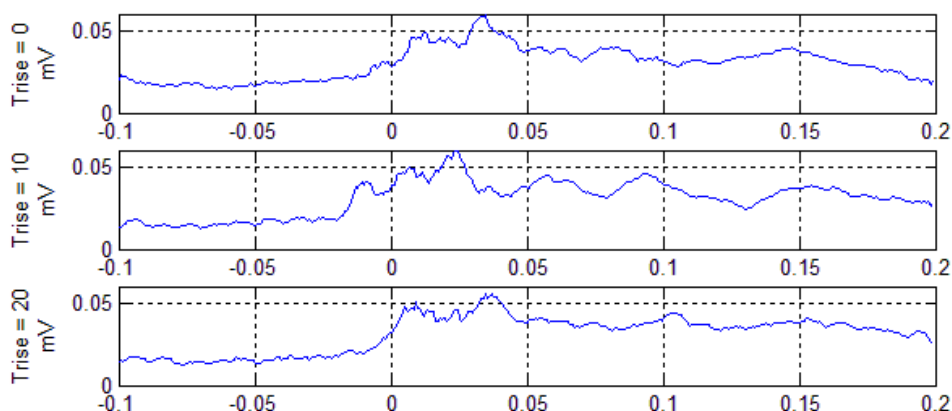
Trajanja pobude od 30 i 50 ms dala su podjednake rezultate, bez velikih razlika u svim parametrima odziva, kako u intenzitetu, tako i u trajanju, te vremenu porasta. Kako se kod evociranja startle treptaja najčešće koriste trajanja od 30 ms, trebalo bi bolje istražiti koje trajanje u rasponu između ta dva najbolje pristaje evociranju i treptaja i promjene  $F_0$ .



Slika 5.2: Usrednjeni EMG odzivi za pobude sa varirajućim trajanjem, usrednjeni po klasama trajanja

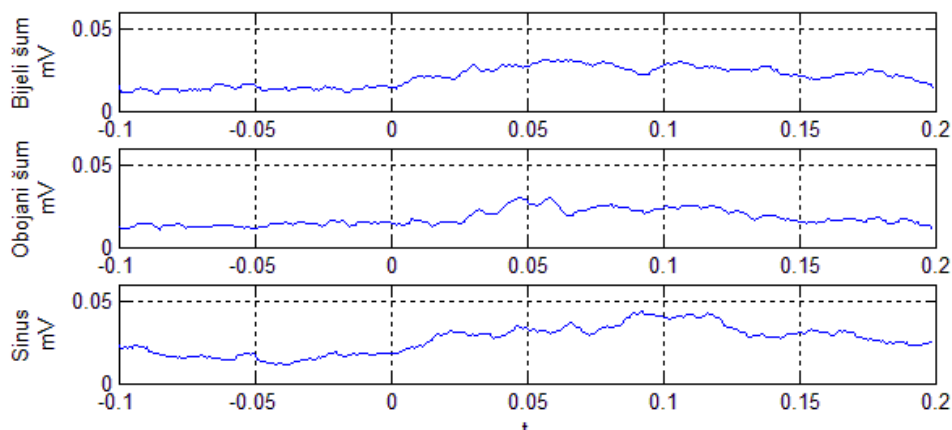
Rezultati vidljivi na slici 2.3 ne odgovaraju u potpunosti poznatim vrijednostima u literaturi koje navode da bi vrijeme porasta pobude trebalo biti što bliže nuli. No s druge strane, to su rezultati mjereni na razinama intenziteta pobude od 95 dB. U našim

eksperimentalnim podacima, pobude sa varirajućim vremenima porasta su imale intenzitet od 105 dB, što je mogući razlog nedosljednosti.



Slika 5.3: Usrednjeni EMG odzivi za pobude sa varirajućim vremenom porasta, usrednjeni po klasama vremena porasta

Slika 5.4 prikazuje usrednjene EMG odzive za pobude sa različitim valnim oblicima, te pokazuje rezultate koji su nedosljedni ovisno o podacima iz literature po kojima postoji velika razlika u prikladnosti bijelog šuma kao pobude za evociranje startle treptaja, naspram obojanog šuma i čistog sinusnog signala. Moguće je da su rezultati takvi radi niskog broja opservacija u tom bloku odziva. Za primjer se može uzeti blok odziva na pobude sa varirajućim intenzitetom, u kojem je snimljeno šest puta više opservacija.



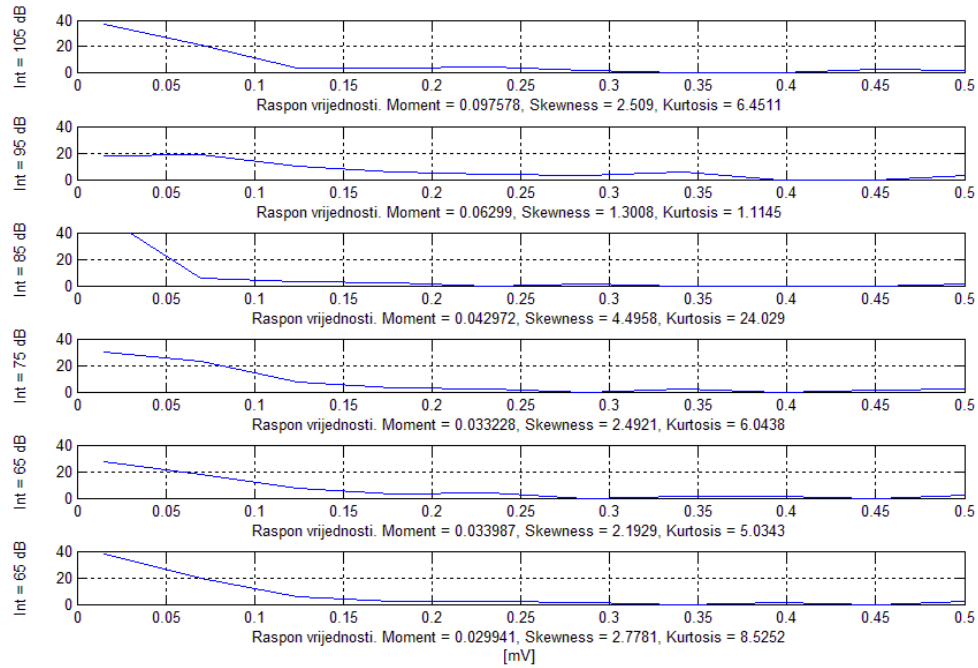
Slika 5.4: Usrednjeni EMG odzivi za pobude sa varirajućim valnim oblikom, usrednjeni po klasama pobude

Zanimljivo je primijetiti na nekim od grafova postoje pojave prije nastupa pobude, što nam govori da postoji velik broj opservacija u kojima je nastao spontani treptaj u trenucima neposredno prije nastupa pobude. Takve pojave uvelike utječu na razine startle treptaja, te time i na podatke analize, te se treba razmotriti mogućnost njihovog izbacivanja iz analize.

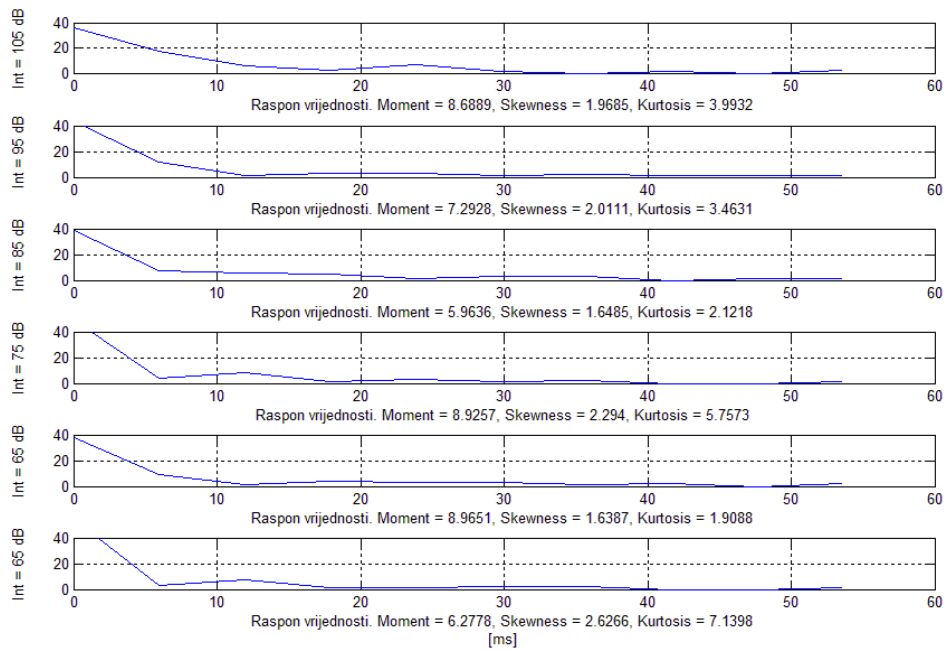
Sve slike generirane u ovom potpoglavlju mogu se dobiti upisivanjem u komandnu liniju MATLAB-a naredbe:

```
ResponseAnalysis('Emg','MeanResponsePlot');
```

### 5.3. STATISTIČKA ANALIZA PARAMETARA EMG ODZIVA

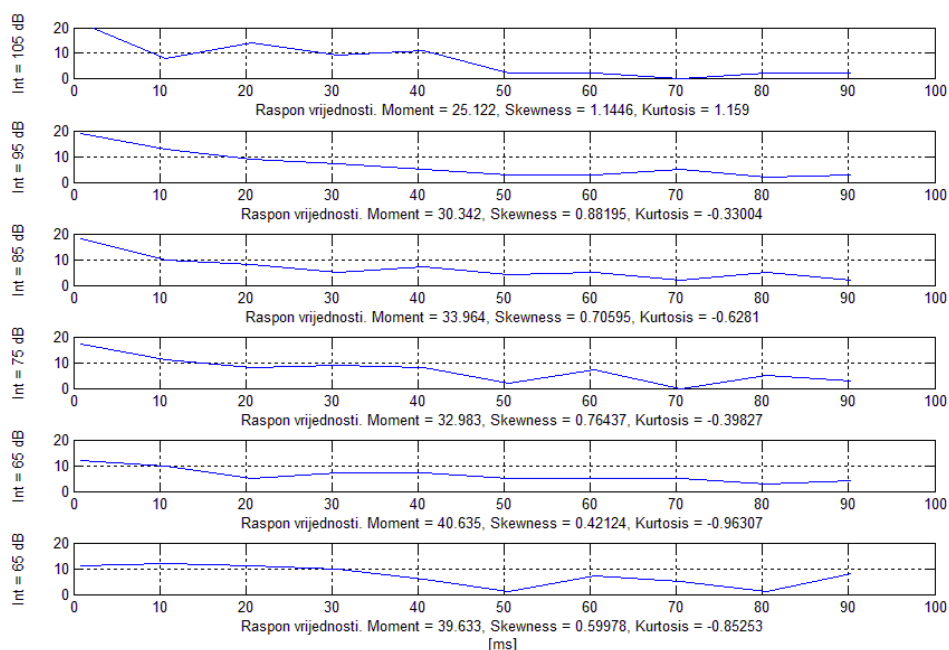


Slika 5.5: Histogram vršnih vrijednosti EMG odziva, za pobude sa varirajućim intenzitetom

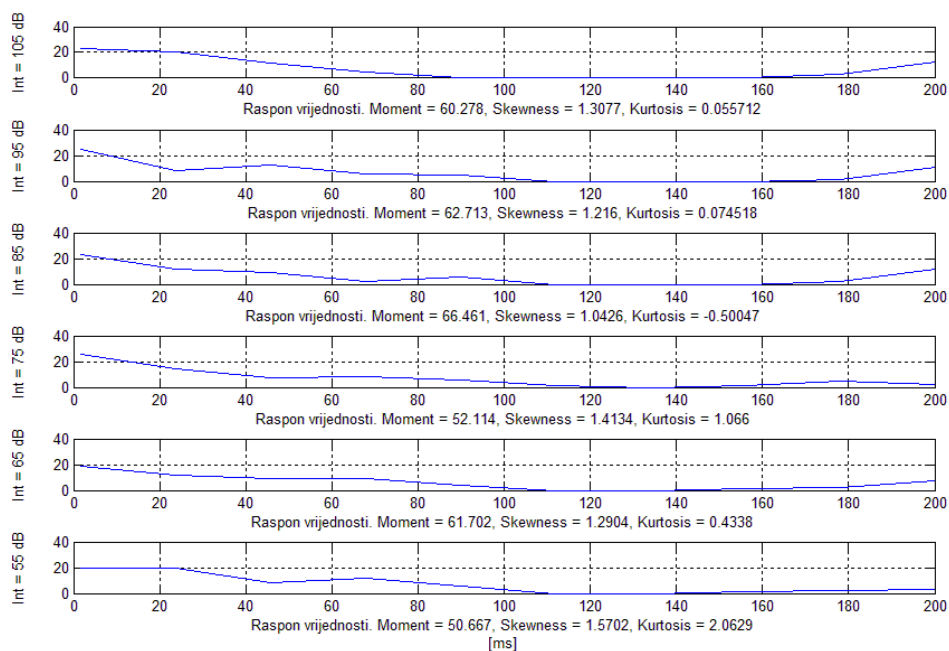


Slika 5.6: Histogram vršnih vrijednosti EMG odziva, za pobude sa varirajućim trajanjem

Slike 5.5 – 5.8 prikazuju histograme vršnih vrijednosti EMG odziva, za skupove pobuda sa varirajućim intenzitetom, trajanjem, vremenom porasta i valnim oblikom.



Slika 5.7: Histogram vršnih vrijednosti EMG odziva, za pobude sa varirajućim vremenom porasta



Slika 5.8: Histogram vršnih vrijednosti EMG odziva, za pobude sa varirajućim valnim oblikom

Podaci na slikama 5.5 – 5.8 su u svom skraćenom obliku sadržani u tabeli 5.1. Promatrajući momente na slici 5.5 potvrđujemo da na višim razinama intenziteta postoji veza između intenziteta pobude i vršne vrijednosti EMG odziva koju smo primijetili na slici 5.1. Srednja vrijednost vršnih vrijednosti odziva opada ovisno o intenzitetu za tri

najviša intenziteta, na kojima očekujemo češće pojavljivanje odziva, te lakšu detekciju, dok niža tri intenziteta pobude imaju jednake srednje vrijednosti vršnih vrijednosti odziva. Općenito se vidi da na više tri razine možemo primijetiti neku vezu između parametara odziva i parametara pobude, dok se na nižim razinama parametri fluktuiraju radi niže vjerojatnosti pojavljivanja pravilnog odziva i njegove teže detekcije, te ćemo daljnje komentare bazirati na vrijednostima za viša tri intenziteta pobude.

Vrijeme nastupa odziva opada sa smanjenjem intenziteta pobuda, dok vrijeme porasta odziva i trajanje odziva rastu sa smanjenjem intenziteta pobude.

**Tabela 5.1: Izlazni podaci statističke analize karakteristika EMG odziva za pobude sa promjenjivim intenzitetom**

Promjenjiv intenzitet pobude Int												
Int	Peak			Onset Time			Rise Time			Duration		
	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt
<b>105 dB</b>	0,10	2,51	6,45	8,69	1,97	3,99	25,12	1,14	1,16	60,28	1,31	0,06
<b>95 dB</b>	0,06	1,30	1,11	7,29	2,01	3,46	30,34	0,88	-0,33	62,71	1,22	0,07
<b>85 dB</b>	0,04	4,50	24,03	5,96	1,65	2,12	33,96	0,71	-0,63	66,46	1,04	-0,50
<b>75 dB</b>	0,03	2,49	6,04	8,93	2,29	5,76	32,98	0,76	-0,40	52,11	1,41	1,07
<b>65 dB</b>	0,03	2,19	5,03	8,97	1,64	1,91	40,63	0,42	-0,96	61,70	1,29	0,43
<b>55 dB</b>	0,03	2,78	8,53	6,28	2,63	7,14	39,63	0,60	-0,85	50,67	1,57	2,06

Iz tabele 5.2 možemo vidjeti da pobude sa vremenom trajanja od 30 ms imaju najbolje rezultate, što se tiče vršne vrijednosti odziva, vrijeme nastupa odziva ne pokazuje nikakve ovisnosti sa trajanjem pobude, vrijeme porasta odziva raste sa smanjenjem trajanja pobude, dok trajanje odziva opada sa smanjenjem trajanja pobude.

**Tabela 5.2: Izlazni podaci statističke analize karakteristika EMG odziva za pobude sa promjenjivim trajanjem**

Promjenjivo trajanje pobude T												
T	Peak			Onset Time			Rise Time			Duration		
	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt
<b>50 ms</b>	0,05	1,20	1,17	7,44	2,49	5,97	28,34	1,01	0,36	64,24	1,06	-0,54
<b>30 ms</b>	0,06	1,57	2,85	6,44	1,02	-0,32	29,66	0,62	-0,69	61,13	1,39	0,54
<b>10 ms</b>	0,04	1,31	0,60	11,35	2,12	3,61	35,47	0,76	-0,37	57,41	1,48	1,14

Tabela 5.3 nam pokazuje statističke podatke karakteristika EMG odziva za pobude sa različitim vremenima porasta, no iz statističkih podataka se ne mogu iščitati nikakvi pravi zaključci o ovisnosti parametara odziva o parametrima pobude. Tabela 5.4 nam daje rezultate, koji su neočekivani po onome što znamo o EMG odzivima iz literature, budući da očekujemo da pobuda valnog oblika bijelog šuma ima najveće vršne vrijednosti EMG odziva, što je u našem slučaju kod sinusne pobude.

**Tabela 5.3: Izlazni podaci statističke analize karakteristika EMG odziva za pobude sa promjenjivim vremenom porasta**

Promjenjivo vrijeme porasta pobude Trise												
Trise	Peak			Onset Time			Rise Time			Duration		
	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt
<b>0 ms</b>	0,09	3,03	9,66	6,65	1,81	3,53	34,18	1,02	0,20	58,58	1,54	1,16
<b>10 ms</b>	0,09	2,30	5,37	4,91	2,15	4,69	26,33	1,11	0,20	50,95	1,52	1,01
<b>20 ms</b>	0,09	2,71	8,31	7,62	2,01	3,72	28,14	1,38	1,00	79,72	0,64	-1,31

Najvjerojatiji razlog toga je u manjem broju uzoraka za statističku analizu, nego u ostalim grupama.

**Tabela 5.4: Izlazni podaci statističke analize karakteristika EMG odziva za pobude sa promjenjivim valnim oblikom**

Promjenjiv valni oblik pobude Stim												
Stim	Peak			Onset Time			Rise Time			Duration		
	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt	Mean	Skew	Kurt
<b>White</b>	0,05	1,18	0,04	13,11	1,74	2,50	32,45	1,14	0,89	96,77	0,35	-1,68
<b>Color</b>	0,05	1,34	0,58	9,50	1,94	3,62	32,49	0,68	-0,58	62,96	1,29	0,23
<b>Sinus</b>	0,07	2,02	3,35	10,84	1,20	0,58	31,31	0,68	-0,50	88,98	0,53	-1,30

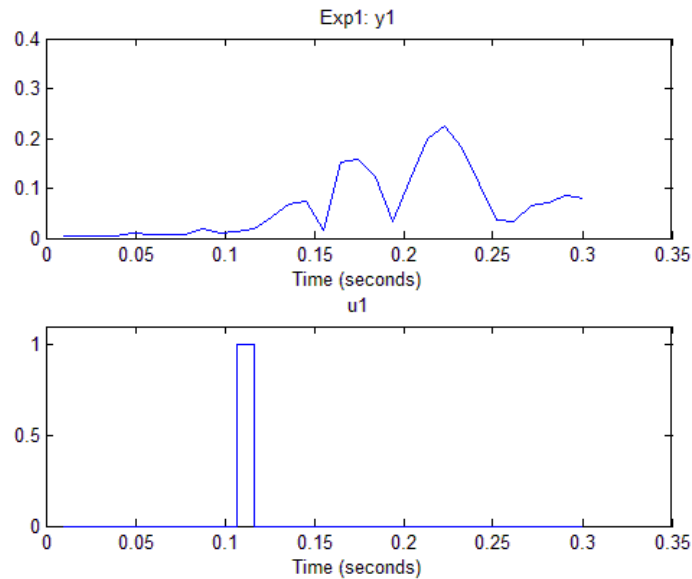
Sve tabele i slike generirane u ovom potpoglavlju mogu se dobiti upisivanjem u komandnu liniju MATLAB-a naredbe:

```
ResponseAnalysis('Emg', 'ResponseCharacteristics');
```

#### 5.4. PREDOBRADA PODATAKA ZA IDENTIFIKACIJU SUSTAVA

Kao i u poglavlju koje je opisivalo ovu temu u kontekstu identifikacije sustava odziva  $F_0$ , kao ulazni podaci identifikacije sustava koriste se isti EMG podaci koji su se koristili za analize usrednjenih EMG odziva, te statističku analizu parametara EMG odziva, no i ovaj put sa nižom frekvencijom uzorkovanja od 100 Hz, što nam na vremenskim odsječcima  $t \in (-0.1, 0.2)$  daje isti broj uzoraka kao i kod identifikacije sustava  $F_0$  odziva, što nam omogućuje da koristimo slične redove modela u ovoj analizi. Kao i kod analize  $F_0$ , opet se mora paziti na očuvanje uzorka koji označava trenutak nastanka pobude, iako u ovom slučaju, odziv nije normiran na taj uzorak. Opet se izrađuje sintetička pobuda, budući da nisu dokazane linearne ovisnosti između parametara pobude i parametara odziva.

Slika 5.9 pokazuje primjer jednog para pobude i EMG odziva na ulazu u modeliranje identifikacijom sustava.



Slika 5.9: Primjer para pobude i EMG odziva na ulazu u modeliranje identifikacijom sustava

### 5.5. ODABIR PARAMETARA MODELA

Za odabir parametara modela kod EMG odziva vrijede isti navodi već navedeni u potpoglavlju 4.7 kada smo navodili način odabira parametara modela za  $F_0$  odziv. Opservacije EMG signala koje koristimo kao ulazne podatke u identifikaciji sustava su smanjenog vremena uzorkovanja i jednakog broja uzoraka kao što su opservacije  $F_0$  odziva, tako da slični redovi modela vrijede i za njih.

### 5.6. USPOREDBA RADA RAZLIČITIH MODELA

Tabela 5.5 nam pokazuje rezultate modeliranja EMG odziva prikazane za sve grupe opservacija vezane za parametre pobude, te različite vrste modela.

Kao i kod analize iz potpoglavlja 4.8.1 u kojoj su na isti način modelirani  $F_0$  odzivi, vidimo da jednostavniji tipovi modela redom imaju puno lošije rezultate naspram kompliciranijih. Ustvari, jedini rezultati koje možemo iskoristiti za daljnji rad su oni od Box-Jenkins modela, i to za grupu opservacija gdje je pobuda bila razine 105 dB, jer se za nju najlakše raspoznaje kontura odziva, te se sam odziv najredovitije pojavljuje, te najsporije habituira.



Tabela 5.5: Rezultati modeliranja EMG odziva po svim modelima i grupama pobude

Rezultati modeliranja EMG odziva na pobude varirajućeg intenziteta									
Int		Arx1st	Arx2nd	OE1st	OE2nd	Armax1st	Armax2nd	BJ1st	BJ2nd
105 dB	Fit[%]	-14,57	-16,90	-5,69	2,13	-10,03	-8,48	3,36	13,41
	SNR[dB]	-31,10	-31,98	-29,90	-29,13	-36,57	-26,53	-42,81	-37,67
95 dB	Fit[%]	-9,86	-14,67	5,39	14,91	-2,03	-4,90	6,10	4,52
	SNR[dB]	-34,54	-34,29	-35,17	-38,34	-41,10	-30,95	-46,16	-43,36
85 dB	Fit[%]	-2,46	-11,92	-2,53	-1,26	8,52	3,25	9,91	9,85
	SNR[dB]	-42,85	-39,05	-39,68	-34,60	-45,21	-35,48	-50,50	-48,83
75 dB	Fit[%]	4,92	-0,46	-0,28	-3,58	8,20	5,38	7,45	6,28
	SNR[dB]	-47,69	-44,20	-44,65	-41,79	-49,82	-40,00	-78,42	-68,40
65 dB	Fit[%]	-4,02	-14,63	-4,31	-2,08	-4,07	-24,46	3,72	2,75
	SNR[dB]	-44,61	-43,12	-44,63	-44,62	-49,91	-83,27	-54,14	-55,97
55 dB	Fit[%]	-0,03	-6,36	-4,85	-0,30	2,69	-9,58	1,19	0,79
	SNR[dB]	-45,55	-45,35	-43,04	-41,77	-50,60	-57,60	-49,89	-47,95
Rezultati modeliranja EMG odziva na pobude varirajućeg trajanja									
T		Arx1st	Arx2nd	OE1st	OE2nd	Armax1st	Armax2nd	BJ1st	BJ2nd
50 ms	Fit[%]	-17,36	-16,26	-12,24	-9,35	-5,90	-10,15	2,36	0,81
	SNR[dB]	-36,29	-36,71	-34,19	-32,49	-39,65	-29,18	-44,82	-41,13
30 ms	Fit[%]	-14,15	-25,89	-11,78	-15,47	-1,91	-24,66	7,15	9,17
	SNR[dB]	-32,62	-31,45	-34,73	-35,26	-34,80	-39,67	-45,02	-40,51
10 ms	Fit[%]	-3,65	-4,73	-3,95	-5,83	-8,97	-7,51	-0,24	-3,20
	SNR[dB]	-43,05	-44,56	-43,12	-44,27	-50,46	-45,24	-65,19	-41,21
Rezultati modeliranja EMG odziva na pobude varirajućeg vremena porasta									
Trise		Arx1st	Arx2nd	OE1st	OE2nd	Armax1st	Armax2nd	BJ1st	BJ2nd
0 ms	Fit[%]	-0,33	-10,78	3,03	7,68	4,28	-3,13	7,30	-2,36
	SNR[dB]	-31,60	-29,61	-31,23	-30,71	-33,56	-31,25	-36,42	-33,88
10 ms	Fit[%]	-17,16	-31,85	-14,32	-14,97	-17,09	-15,58	-0,72	0,62
	SNR[dB]	-33,06	-33,24	-31,83	-33,37	-41,15	-35,72	-41,58	-37,24
20 ms	Fit[%]	-21,54	-38,79	-36,04	-18,62	-12,05	-33,53	-2,65	-19,09
	SNR[dB]	-31,71	-29,27	-29,96	-26,90	-34,84	-27,69	-41,46	-31,76
Rezultati modeliranja EMG odziva na pobude varirajućeg valnog oblika									
Stim		Arx1st	Arx2nd	OE1st	OE2nd	Armax1st	Armax2nd	BJ1st	BJ2nd
0 ms	Fit[%]	-24,18	-18,64	-6,52	2,36	-8,42	-15,01	-1,86	-3,20
	SNR[dB]	-31,39	-33,46	-34,01	-30,95	-31,91	-26,57	-35,16	-38,59
10 ms	Fit[%]	-30,69	-29,50	-6,88	-3,08	-12,29	-12,15	-2,26	-0,36
	SNR[dB]	-33,23	-33,39	-36,18	-34,33	-37,17	-41,33	-39,31	-44,77
20 ms	Fit[%]	-8,86	-5,08	0,29	-6,21	2,84	-6,64	11,44	12,57
	SNR[dB]	-34,18	-33,10	-30,48	-28,08	-38,35	-27,46	-45,72	-38,97

Prva stvar koju primjećujemo kod rezultata je da su redom za sve modele i grupe opservacija vrijednosti SNR-a niske ili negativne. Razlog tome je što je EMG pojava koja čak i nakon velike količine predobrade sadržava velike količine suma i smetnje. To je

ujedno i razlog zašto Box-Jenkins modeli pokazuju najkvalitetnije rezultate, budući da imaju najfleksibilniju granu šuma koja može jednostavnije modelirati taj šum.

Iz tog razloga prikazati ćemo za primjer Box-Jenkins model, za grupu opservacija sa pobudom intenziteta 105 dB.

Model je dan jednadžbom prijenosne funkcije

**Jednadžba 5.1: Jednadžba prijenosne funkcije primjernog BJ modela EMG odziva**

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t) + \frac{C(z)}{D(z)}e(t)$$

uz vrijednosti pripadnih polinoma

$$B(z) = -0.003523z^{-1} - 0.01724z^{-2} + 0.02183z^{-3}$$

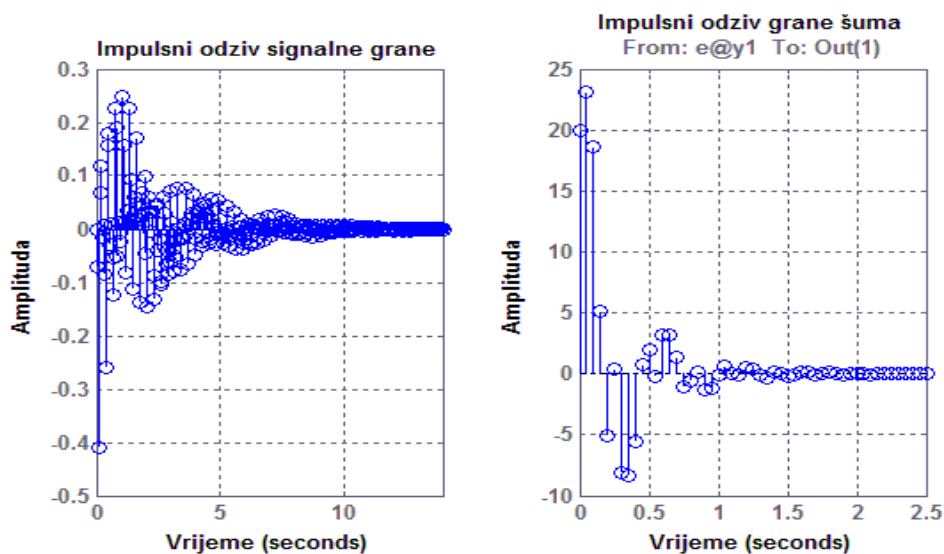
$$C(z) = 1 + 1.59z^{-1} + 1.58z^{-2} + 0.8946z^{-3}$$

$$D(z) = 1 + 0.4345z^{-1} + 0.1491z^{-2} + 0.06446z^{-3} - 0.06842z^{-4} + 0.07551z^{-5} + 0.3936z^{-6} + 0.102z^{-7}$$

$$F(z) = 1 - 0.9321z^{-1} + 0.185z^{-2} - 0.2928z^{-3} + 0.09103z^{-4} - 0.2008z^{-5} - 0.5639z^{-6} + 0.7767z^{-7}$$

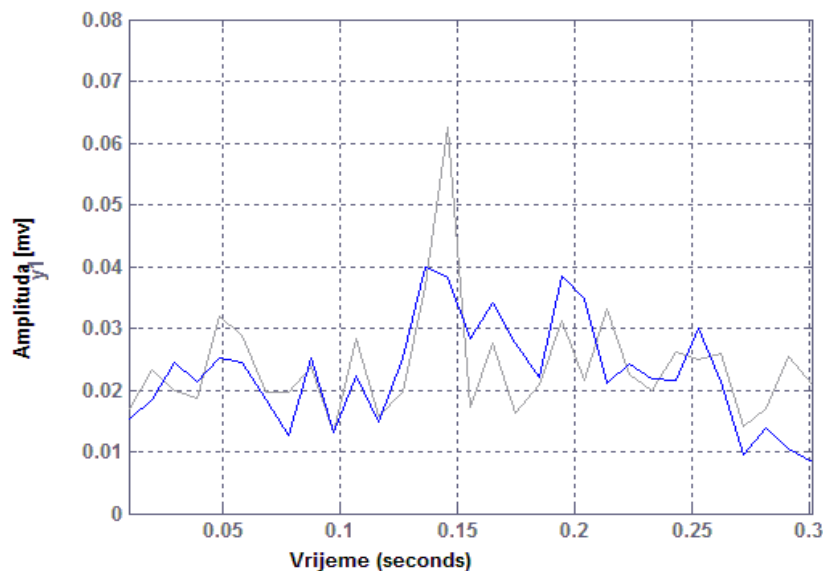
Estimacijski skup podataka se sastojao od 65 EMG odziva i pripadajućih pobuda. Model ima usrednjeni fit za estimacijski skup podataka od 40.36 %, s rasponom od -33.92 % do 72.83 %, finalnu predikcijsku pogrešku FPE = 0.001163, te usrednjeni MSE = 0.000331.

SNR modela iznosi -40.0045 dB, te su impulsni odzivi signalne grane i grane šuma dani na slici 5.10.



**Slika 5.10: Impulsni odzivi signalne grane i grane šuma primjernog BJ modela za EMG odziv**

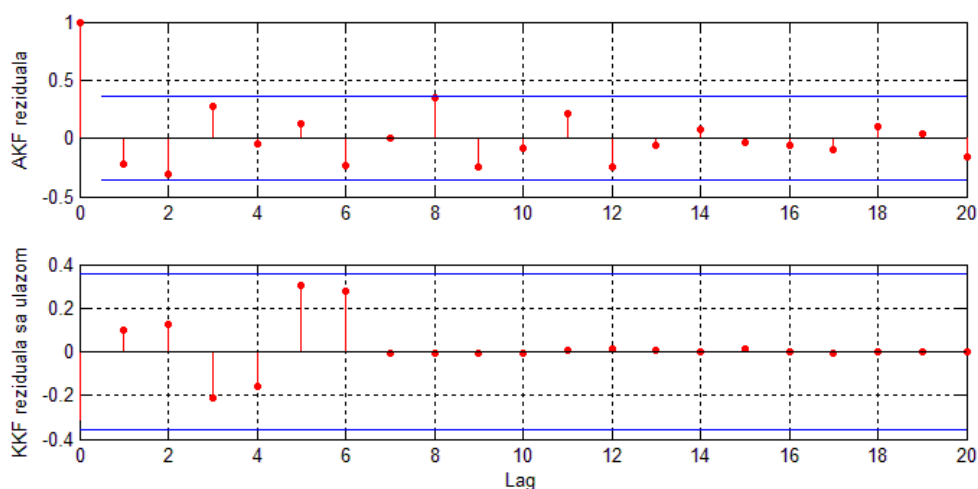
Validacijski skup podataka se sastoji od 7 EMG odziva, koji nisu sadržani u estimacijskom skupu podataka. Usrednjeni fit za validacijski skup podataka je 18.1133 %, sa rasponom od 11.61% do 29.21%.



**Slika 5.11: Primjer usporedbe prediktiranog izlaza modela i mjenenog izlaza validacijskog skupa podataka za EMG odziv**

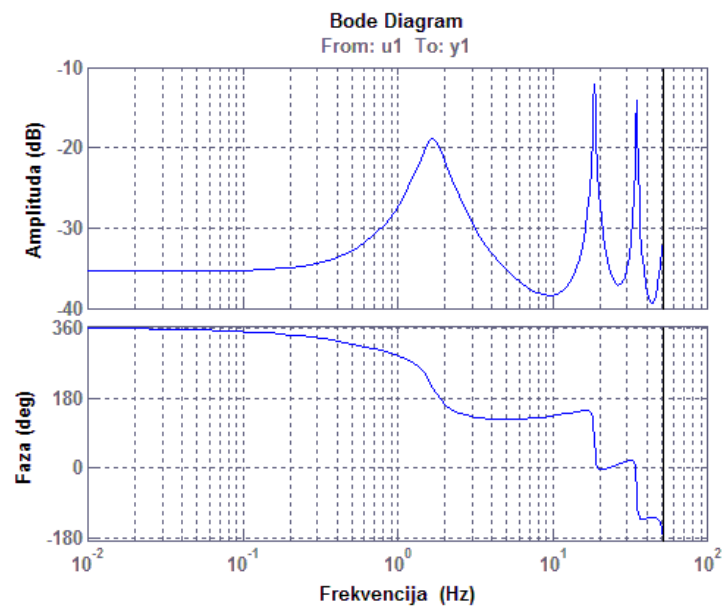
Slika 5.11 prikazuje primjer usporedbe prediktiranog izlaza modela i mjenenog izlaza validacijskog skupa podataka. Vidimo da su „šumne“ pojave prije i poslije EMG doziva dobro opisane modelom, kao i vrijeme nastupa odziva, te trajanje, no treba dodatan rad na opisivanju dinamike odziva.

Slika 5.12 prikazuje rezultate analize reziduala za primjer sa slike 5.11.



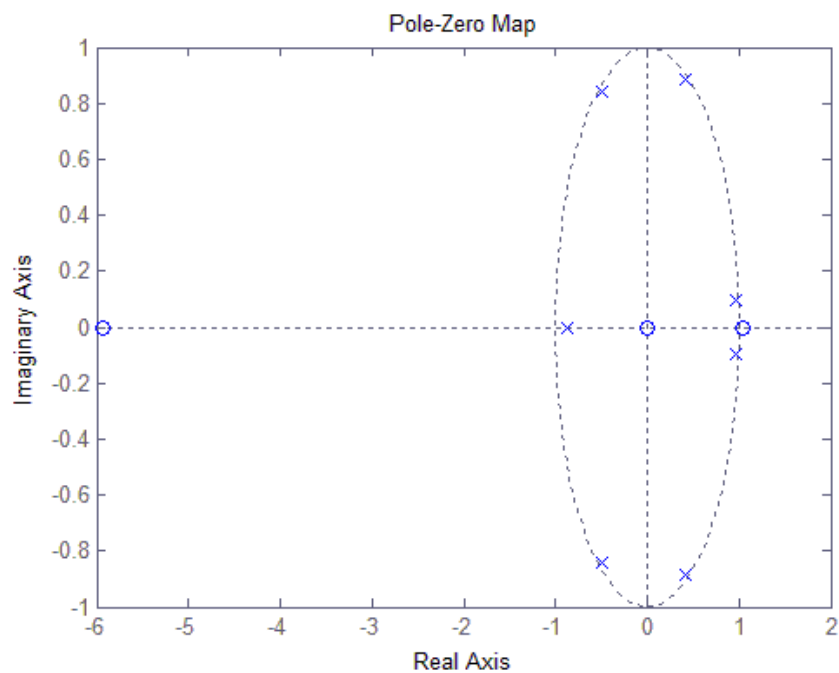
**Slika 5.12: Prikaz analize reziduala predikcije za slučaj prikazan na slici 5.11**

Slika 5.13 nam prikazuje amplitudno frekventijsku i fazno frekventijsku karakteristiku modela, dok nam slika 5.14 prikazuje nule i polove sustava u z ravnini.



Slika 5.13: Prikaz frekventijske karakteristike primjernog BJ modela za EMG odzive

Ono što vidimo gledajući obe slike je da većina utjecaja na frekventijsku karakteristiku dolazi od 3 para kompleksno konjugiranih polova, te jednog pola blizu Nyquistove frekvencije. Svi polovi su jako blizu jediničnoj kružnici što dovodi do jakih utjecaja na amplitudno-frekventijsku karakteristiku.



Slika 5.14: Prikaz nula i polova u z ravnini primjernog BJ modela za EMG odzive

Promatrajući nule vidimo da sustav nema minimalnu fazu za što vrijede isti komentari kao i u potpoglavlju 4.8.1. Grupno kašnjenje sustava iznosi 0.4072.

#### 5.5. DISKUSIJA REZULTATA IDENTIFIKACIJE SUSTAVA EMG ODZIVA

Prikazanim rezultatima smo pokazali da je identifikacija sustava EMG odziva moguća, no da treba investirati još vremena u pronalaženje optimalnih metoda predobrade signala, te prikaza opservacija EMG odziva kao ulaznih podataka u procesu identifikacije sustava.

## 6. SPOJ ANALIZE EMG SIGNALA I $F_0$ SIGNALA

### 6.1. PREDOBRAĐA PODATAKA

U ovom poglavlju, pokušati ćemo analizirati vezu između EMG odziva orbicularis oculi mišića i odziva  $F_0$  glasa kroz identifikaciju sustava, tako da ćemo koristiti vrijednosti koje opisuju karakteristike EMG odziva, kao parametar pobude kod identifikacije sustava  $F_0$  odziva. Kao što je već navedeno, u ranijim poglavljima, za sintetiziranja pobude pri identifikaciji sustava koristili smo jedinične impulse čija je jedina poveznica sa originalnim pobudama korištenim u eksperimentu vrijeme nastupa pobude. Takav pristup smo morali koristiti, budući da nismo mogli dokazati linearnu vezu između parametara odziva i parametara pobuda. U ovoj analizi ćemo opet za pobudu koristiti impulse postavljene u vremenske trenutke u kojima je stvarna pobuda nastupala, no neće biti jedinični, već će se opisna vrijednost ekstrahirana iz EMG odziva koristiti kao amplituda impulsa. Takav pristup nam omogućava da jednom veličinom „objasnimo“ tri najvažnija parametra odziva, te da lakše usporedimo linearnost veze istih sa intenzitetima originalnih pobuda.

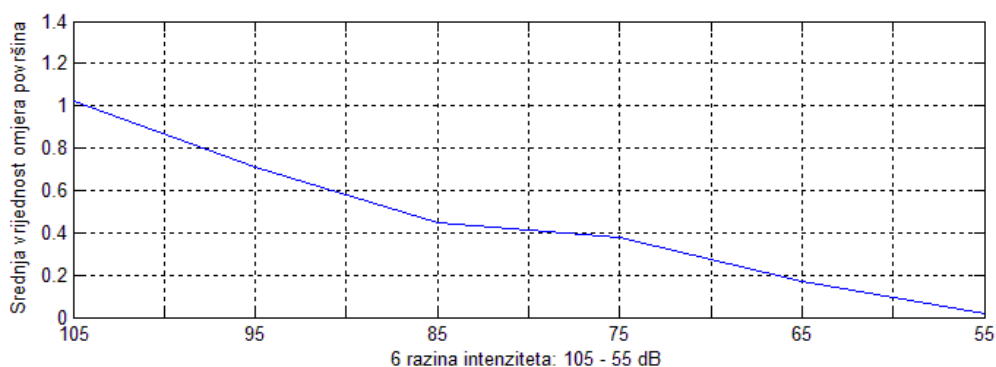
Dakle, nakon predobrade EMG signala možemo primijetiti uzorak ponašanja koji se proteže kroz većinu opservacija. Opservacije se sastoje od dijela osnovice (eng. *baseline*), tj. DC vrijednosti, koji je prije valnog ispravljanja signala predstavljao osciliranje oko nulte vrijednosti, te konture koja prelazi preko te vrijednosti i opisuje treptajni odziv. Izoliranjem dijela konture iznad osnovice i računanjem njene površine, te njenoga odnosa naspram površine ispod osnovice u vremenskom području pojavljivanja treptaja, dobivamo vrijednost koja nam istovremeno opisuje nekoliko parametara odziva :

- Relativnu amplitudu/vršnu vrijednost amplitude EMG odziva
- Trajanje EMG odziva

Za takvu vrijednost je lakše dokazati linearnu vezu sa parametrima pobude iz eksperimenta, što smo i napravili. Linearna veza te vrijednosti postoji sa prve 3 najviše razine intenziteta pobude, dok na nižim intenzitetima trend veze se nastavlja, no ne i linearnost što se može vidjeti na slici 6.1. Iz tog razloga će ova analiza biti provedena samo nad opservacijama ta 3 intenziteta. Nelinearna veza je na tim intenzitetima i očekivana, radi manje vjerojatnosti pojavljivanja refleksa, te lakšeg habituiranja.

Da bi bili sigurni da izvlačimo pravi dio konture, detektiramo ga u vremenskom području od 20 do 120 ms nakon nastupa pobude, tražeći vrijednost koja je za dvije standardne devijacije veća od srednje vrijednosti DC trenda u vremenu od 50 ms prije nastupa pobude.

Druga razina predobrade podataka za ovu analizu je vezana uz kvalitetu EMG opservacija. U potpoglavlju 5.2 smo pri analizi usrednjenih EMG odziva primijetili da usrednjene EMG konture u vremenu prije nastupa pobude imaju relativno visoke vrijednosti, koje doduše jesu bile niže od vrijednosti kod pojave startle treptaja, ali su naspram DC osnovice bile puno veće. To nam upućuje na veliki broj opservacija kod kojih je došlo do spontanog treptaja nevezanog za pobudu, u trenucima neposredno prije nastupa pobude, što utječe na pojavu i parametre treptaja izazvanog pobudom.



Slika 6.1 Odnos razine intenziteta i srednje vrijednosti omjera površina EMG treptaja i osnovice

Iz tog razloga za ovu analizu su sve opservacije pojedinačno promotrene i ocijenjeno je da li se mogu koristiti u analizi. Literatura navodi 3 razloga radi kojih bi se podaci i/ili sudionici trebali izbaciti iz daljnje analize:

- Sudionici koji u određenom broju pobuda ne registriraju određeni broj treptaja, tj. odziva na pobudu (eng. *non-responders*)
- Sumjerljiva ili prekomjerna smetnja i šum u signalu (eng. *excessive noise*), što od utjecaja pomicanja drugih mišića, što radi utjecaja smetnje gradske mreže ili okolnih električnih uređaja, što radi utjecaja mjerne opreme (npr. nevaljanih elektroda, mjernih vodova sa oštećenim oklopom itd.)
- Pojava spontanog treptaja u vremenu neposredno prije nastupa pobude

Kao što je već navedeno, opservacije su pojedinačno prikazivane, te promotrene uz pomoć vizualnih markera koji nam ukazuju na moguću pojavu druga dva razloga, dok je prvi razlog analiziran računalno.

Ukupno je nakon predobrade izolirano 172 opservacije za daljnju analizu po svih 6 razina intenziteta, od čega su 103 za prve tri razine intenziteta.

## 6.2. KORELACIJA EMG I $F_0$ SIGNALA

Računanjem korelacije između vršnih vrijednosti EMG i  $F_0$  odziva, dobili smo  $r = 0.2202$ , uz  $p = 0.0037$ ,  $N = 172$ , što nam upućuje na nisku korelaciju visoke značajnosti. Razlog tome su možda navodi istraživača da iz dosad nepoznatih razloga postoje velike individualne razlike između vršnih vrijednosti EMG opservacija treptaja (Bluemthel, Cuthbert, Fillion, Hackley, Lipp, & Van Boxtel, 2005), gdje ponašanje pojave koju promatramo, tj. startle treptaja nije inherentno povezano sa tim razlikama, niti su eksperimentalni uvjeti poput parametara pobude vezani za njih. Ako za iste razine intenziteta, kod EMG odziva postoje vršne vrijednosti, koje su za par redova veličine veće od ostalih, a takvo ponašanje ne postoji kod  $F_0$  odziva, to bi mogao bit razlog tako niske korelacije.

S druge strane, dosad nismo našli literaturu po kojoj bi mogli uspoređivati rezultate, te je jedina referenca koju imam vezano za visoku korelaciju  $F_0$  i EMG signala vezana za EMG odzive krikotiroidnog mišića (lat. *musculus cricothyreoideus*), koji je jedan od mišića koji sudjeluje u proizvodnji govora na glasicama (Sapir & McClean, 1983).

## 6.3. ODABIR PARAMETARA MODELA

Kod odabira parametara modela u ovoj analizi vrijede isti navodi koji su već spomenuti u potpoglavljima 4.7 i 5.5 što se tiče odabira parametara modela, no radi većeg broja opservacija koje sada imamo na raspolaganju u istoj analizi, redovi polinoma su sada veći, iako je ulazno-izlazno kašnjenje modela  $n_k$  u istim razinama razmatranja.

Gornja granica dostupnih redova nam je postavljena sa brojem uzoraka u opservacijama do trenutka nastupa pobude.

## 6.4. USPOREDBA RADA RAZLIČITIH MODELA I REZULTATI

**Tabela 6.1: Usrednjeni rezultati modeliranja odziva  $F_0$  korištenjem opisne veličine EMG odziva kao parametra pobude**

Rezultati za različite vrste modela								
	Arx1st	Arx2nd	OE1st	OE2nd	Armax1st	Armax2nd	BJ1st	BJ2nd
<b>Fit[%]</b>	-2,88	-0,73	9,10	11,62	-1,49	12,10	32,15	44,23
<b>SNR[dB]</b>	0,74	1,06	-0,72	0,15	-6,03	1,63	-9,79	6,32



Tabela 6.1 pokazuje izvedbu različitih vrsta modela pomoću dvije karakteristike, „fit-a“, te SNR-a. Možemo vidjeti, da kao i kod prošlih analiza, najjednostavniji ARX modeli imaju najlošije rezultate, što je i očekivano.

Box-Jenkins modeli su pokazali najbolju izvedbu, no radi manjeg vremena računanja i računalne kompleksnosti, trebalo bi se razmotriti mogućnost rafiniranja OE i ARMAX modela, te njihovog eventualnog korištenja, ako se postupkom rafiniranja dođe do prihvatljivijih rezultata.

Za primjer izvedbe modeliranja  $F_0$  korištenjem opisne veličine EMG odziva kao parametra pobude prikazati ćemo primjer Box-Jenkins modela, kroz nekoliko prikaza koji nam opisuju najvažnija svojstva dobivenog modela. Dobiveni model je dan jednadžbom

**Jednadžba 6.1: Jednadžba prijenosne funkcije primjernog BJ modela za  $F_0$  odzive modelirane korištenjem opisne veličine EMG odziva kao parametra pobude**

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t) + \frac{C(z)}{D(z)}e(t)$$

*uz vrijednosti pripadnih polinoma*

$$B(z) = -0.3401z^{-1} + 0.0112z^{-2}$$

$$C(z) = 1 - 0.7369z^{-1}$$

$$D(z) = 1 - 1.287z^{-1} + 0.3818z^{-2} + 0.1009z^{-3} - 0.1931z^{-4} + 0.0648z^{-5} \\ + 0.0567z^{-6} + 0.0482z^{-7}$$

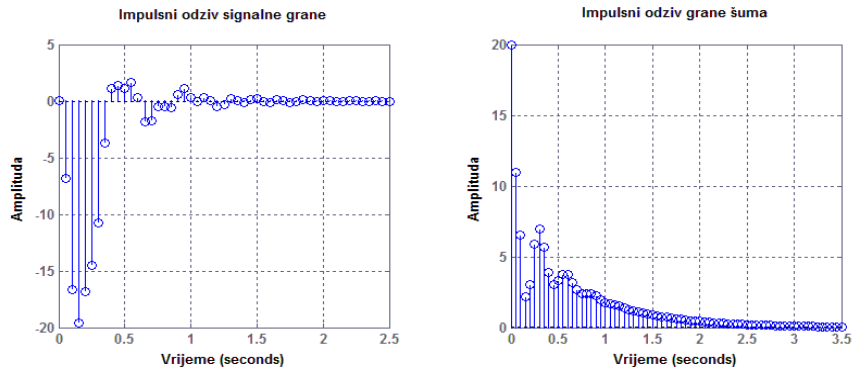
$$F(z) = 1 - 2.482z^{-1} + 3.196z^{-2} - 3.153z^{-3} + 2.532z^{-4} + 1.319z^{-5} + 0.3027z^{-6}$$

Estimacijski skup podataka se sastojao od 93 para  $F_0$  odziva i pobude sintetizirane pomoću opisne vrijednosti pripadnih EMG odziva.

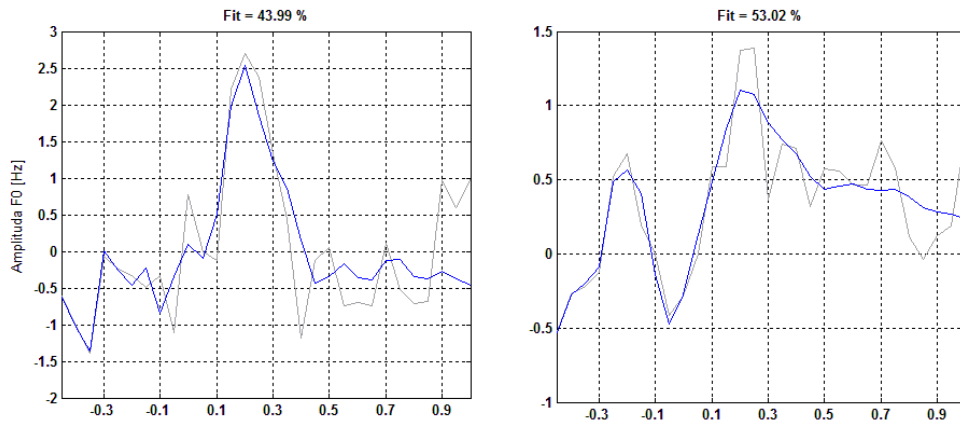
Prikazani model ima usrednjeni fit za estimacijski skup podataka od 48.24 % sa rasponom fit-a od 5% do 82%, finalnu predikcijsku pogrešku  $FPE = 0.2533$ , te usrednjenu  $MSE = 0.293$ . SNR modela iznosi 3.8703 dB, te se impulsni odzivi signalne grane i grane šuma mogu vidjeti na slici 6.2. Validacijski skup podataka se sastoji od 10  $F_0$  odziva, koji nisu sadržani u estimacijskom skupu podataka. Usrednjeni fit za validacijski skup podataka je 44.09 % sa rasponom od 31.35 % do 62.41%.

Slika 6.3 prikazuje dva primjera usporedbe prediktiranog izlaza modela i mjerenog izlaza validacijskog skupa podataka. Na lijevom dijelu slike možemo primijetiti  $F_0$  odziv koji je lako raspoznatljiv od komponenata koje nisu vezane za startle pobudu radi oblika i

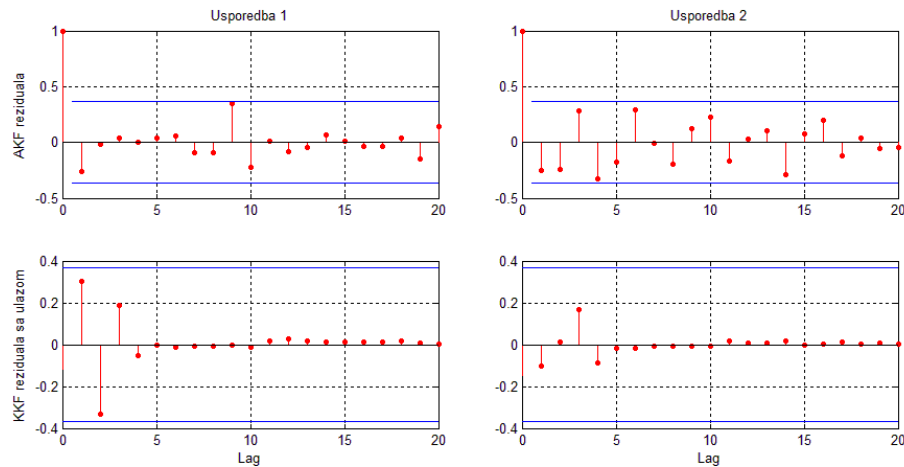
amplitude samoga odziva, dok je desni odziv sumjerljiv pojavama koje nisu vezane za sami startle, iako je i takav dobro modeliran.



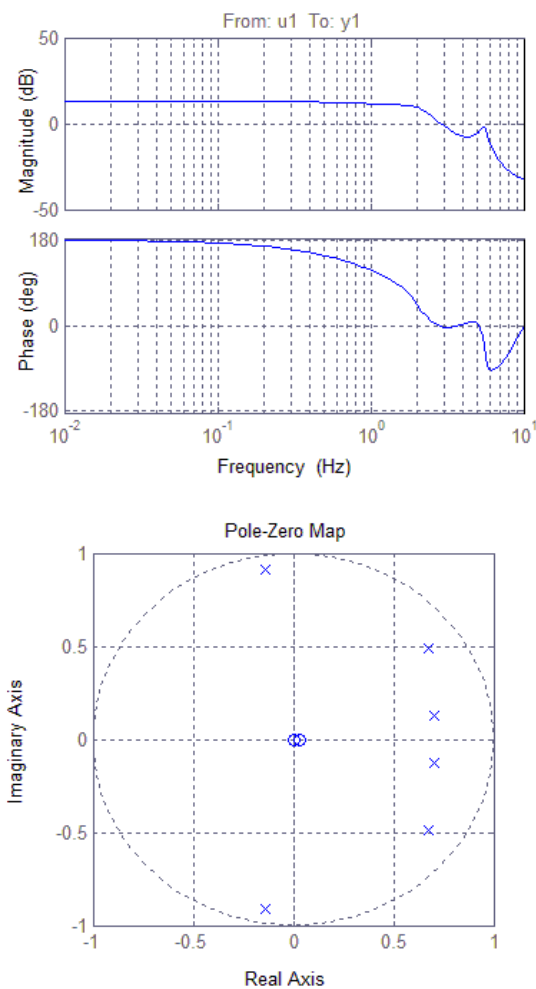
Slika 6.2: Impulsni odzivi signalne grane i grane šuma primjernog BJ modela za  $F_0$  odzive modelirane korištenjem opisne veličine EMG odziva kao parametra pobude



Slika 6.3: Primjeri usporedbe prediktiranog izlaza modela i mjerenog izlaza validacijskog skupa podataka

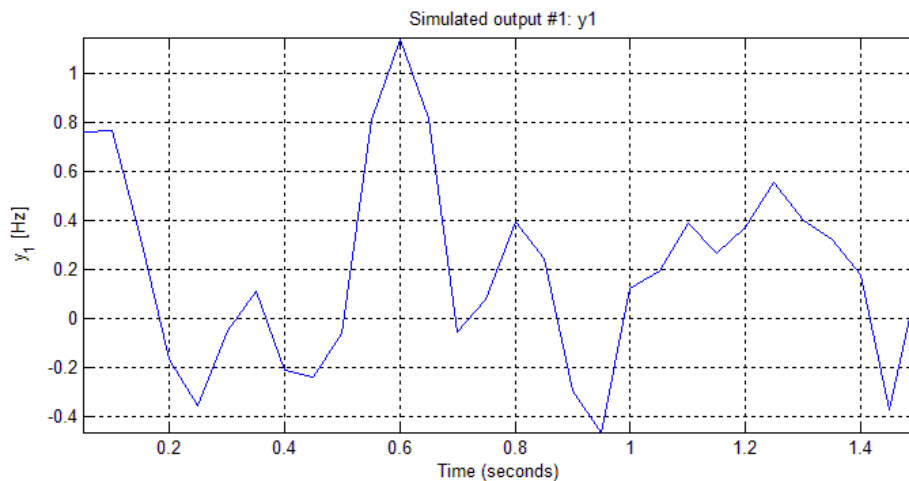


Slika 6.4: Pripadajući prikaz reziduala predikcije za dvije usporedbe na slici 6.3



Slika 6.5: Frekvencijska karakteristika, te prikaz nula i polova primjernog modela

simuliranju, grana šuma je pobuđena bijelim šumom čiji su parametri izračunati pri modeliranju. Prikaz takvoga odziva možemo vidjeti na slici 4.18. Možemo vidjeti da sustav kvalitetno prikazuje pojavu koju smo modelirali.



Slika 6.6: Prikaz odziva modela na pravokutnu pobudu trajanja 50 ms

Slika 6.4 prikazuje reziduale za primjere sa prošle slike. Sve vrijednosti auto-korelacijske funkcije reziduala su unutar intervala povjerenja  $p$ , tako da je pogreška slučajna, te su sve vrijednosti kros-korelacijske funkcije ulaza i reziduala isto unutar intervala povjerenja što nam govori da je izlaz optimalno objašnjen modelom za sve uzorke ulaza.

Na slici 6.5 imamo prikazanu frekvencijsku karakteristiku BJ modeliranog sustava, te njegov prikaz nula i polova. Primjećujemo da imamo stabilan, minimalno fazni model s izračunatim grupnim kašnjenjem modela 3.6702.

Zadnja točka provjere rada modela, nam je simulacija odziva modela na pravokutnu pobudu trajanja 50 ms sličniju pobudi u eksperimentu. Pri takvom

## 6.5. DISKUSIJA REZULTATA

Rezultati modeliranja  $F_0$  odziva, u kojem je za amplitudu impulsne pobude korištena opisna veličina omjera površina EMG baseline-a i odziva, pokazuju veliki napredak u odnosu na rezultate modeliranja  $F_0$  u kojima je za pobudu korišten jedinični impuls koji je opisivao samo trenutak nastupa pobude. Iako je broj opservacija korištenih u ovom modeliranju bio veći nego kod grupa opservacija u ranijim analizama  $F_0$ , moramo primijetiti da su u ovom modeliranju korištene tri različite grupe opservacija, čije su razlike bile u intenzitetima pobuda, te da nam dobri rezultati sugeriraju dobro prikazanu vezu između intenziteta pobude, te EMG i  $F_0$  odziva, te općenito EMG odziva orbicularis oculi mišića naspram  $F_0$  odziva, unatoč rezultatima korelacijske analize.

## 7. ZAKLJUČAK

Ovaj rad je rezultat proučavanja odziva fundamentalne frekvencije  $F_0$  ljudskog glasa i EMG odziva orbicularis oculi mišića na zvučne pobude visokog intenziteta i impulsnog tipa, koji u današnje vrijeme nalaze na mnoge primjene u društvu, posebice pri liječenju ljudi sa poremećajima u percepciji takvih pobuda, npr. kod ljudi sa posttraumatskim stresnim poremećajem ili kod ljudi sa anksioznim poremećajima.

Odziv fundamentalne frekvencije glasa  $F_0$  na zvučne pobude visokog intenziteta i impulsnog tipa je tema koja je slabo istraživana, naspram česte primjene EMG odziva orbicularis oculi mišića, te kao takav predstavlja moguću alternativu ustaljenim metodama, te je pouzdanost analize  $F_0$  prikazana rezultatima ovog rada.

Rad se bazirao na dvjema vrstama analize, statističkoj analizi karakteristika odzivnih pojava i modeliranjem odzivnih pojava korištenjem identifikacije sustava. Takvim pristupom smo si omogućili da obje pojave što bolje proučimo prije nego što pristupimo kompleksnom problemu modeliranja samih pojava. Radom su prezentirani rezultati obje vrste analiza, i za odziv fundamentalne frekvencije glasa  $F_0$  i EMG odziv treptaja, te su diskutirani rezultati.

Završni dio rada se bavi izvedbom zajedničke analize  $F_0$  odziva i EMG odziva, kroz korelaciju parametara odziva, te identifikaciju sustava  $F_0$  odziva korištenjem opisne veličine EMG odziva kao parametra pobude u identifikaciji sustava. Analiza korelacije nije dovela do očekivanih rezultata, no performanse modela u spojenom modeliranju identifikacijom sustava su pokazale poboljšanje naspram pojedinačnih analiza.

Rad kao takav postavlja kvalitetnu podlogu za nastavak analize odziva fundamentalne frekvencije  $F_0$  i EMG odziva orbicularis oculi mišića na zvučne pobude visokog intenziteta i impulsnog oblika, te ujedno postavlja podlogu za analizu primijećenih pojava u  $F_0$  odzivima koje su u identifikaciji modela klasificirane kao šum, a ustvari su niz superponiranih pojava vezanih uz ljudsku fonaciju. Budući da smo u ovom radu koristili takozvanu Black Box identifikaciju (MathWorks Inc., 2014), daljnji smjer rada bi mogao biti Grey Box identifikacija (MathWorks Inc., 2014) u kojoj bi koristili rezultate ovih analiza za raspoznavanje dodatnih karakteristika spomenutih odziva, i ostalih pojava prisutnih pri odzivima na zvučne pobude visokog intenziteta i impulsnog oblika.

## LITERATURA

- Balanda, K. P., & MacGillivray, H. L. (1988). Kurtosis: A Critical Review. *The American Statistician* , 111 - 119.
- Bluemnthal, T. D., Cuthbert, B. N., Filion, D. L., Hackley, S., Lipp, O. V., & Van Boxtel, A. (2005). Committe report: Guidelines for human startle eyeblink electromyographic studies. *Psychophysiology* , 1-15.
- Brookes, M. (2005). Retrieved Travanj 3, 2014, from VOICEBOX: Speech Processing Toolbox for MATLAB: <http://www.ee.ic.ac.uk/hp/staff/dmb/voicebox/voicebox.html>
- Brown, P. (1998). Physiology of the normal startle response. *1st European Meeting on Brainstem Reflexes and Functions*, (str. 107-118).
- Dropuljić, B., Topčić, K., Bagić, M., Lučić, M., Kosalec, N., Luetić, I., i dr. (siječanj 2014). Analiza dominantnih akustičkih značajki u uvjetima generiranja startle impulsa, tj. Diracovih delta funkcija. *Seminarski radi iz golegija "Obrambeni sustavi i tehnologije"* . Zagreb.
- Gonzales, S., & Brookes, M. (2011). A Pitch Estimation filter Robust to High Levels of Noise. *19th European Signal Processing Conference*, (pp. 451 - 455). Barcelona, Spain.
- Kasi, K. (2002). *Master's Thesis: Yet another algorithm for Pitch Tracking (YAAPT)*. Washington: Old Dominion University.
- Ljung, L. (2014). *System Identification Toolbox: Reference (R2014a)*. Natick: The MathWorks, Inc.
- MathWorks Inc. (n.d.).
- MathWorks Inc. (2014). *Black-Box Modeling*. Retrieved lipanj 23, 2104, from MathWorks.com: <http://www.mathworks.com/help/ident/ug/black-box-modeling.html?searchHighlight=black+box>
- MathWorks Inc. (2014). *Linear Grey-Box Models*. Retrieved lipanj 23, 2014, from MathWorks.com: <http://www.mathworks.com/help/ident/linear-grey-box-models.html?searchHighlight=grey+box>
- MathWorks Inc. (2014). *MathWorks.com*. Retrieved lipanj 23, 2014, from Box-Jenkins Methodology: <http://www.mathworks.com/help/econ/box-jenkins-methodology.html>

- MathWorks Inc. (2014). *Residual Analysis*. Retrieved lipanj 23, 2014, from MathWorks.com: <http://www.mathworks.com/help/ident/ug/residual-analysis.html>
- MathWorks, Inc. (2014). *Mathworks*. Retrieved lipanj 16, 2014, from Model Structure Selection: Determining Model Order and Input Delay: <http://www.mathworks.com/help/ident/ug/model-structure-selection-determining-model-order-and-input-delay.html>
- Middleton, G. (2003, Prosinac 17). *Pitch Detection Algorithms*. Retrieved Svibanj 10, 2014, from <http://cnx.org/>: <http://cnx.org/content/m11714/1.2/?format=pdf>
- Pilloti, m., Balota, D. A., Sommers, M., & Khurshid, A. (2000). Auditory Habituation in Young and Older Adults: The Verbal Transformation Effect. *Psychology and Aging* , 313-322.
- Rubin, P., & Vaitakotis-Bateson, E. (1998). Measuring and Modeling Speech Production. *Animal Acoustic Communication* , 251 - 290.
- Sapir, S., & McClean, M. (1983). Human laryngeal responses to auditory stimulation. *The journal of the Acoustical Society of America* , 315-321.
- Scherer, K. R. (1989). Vocal Correlates of Emotional Arousal And Affective Disturbances. U H. Wagner, & A. Manstead, *Handbook of Psychophysiology: Emotion and social behavior* (str. 165 - 197). London, UK: Wiley.
- Snell, R. C. (1993). Formant Location From LPC Analysis Data. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing* , 129 - 134.
- Talkin, D. (1995). A Robust Algorithm for Pitch Tracking (RAPT). In *Speech Coding and Synthesis* (pp. 495 - 518). Washington: Elsevier Science B.V.
- Wikipedia. (2014, lipanj 6). Retrieved lipanj 16, 2014, from Cross-validation (statistics): [http://en.wikipedia.org/wiki/Cross-validation\\_\(statistics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Cross-validation_(statistics))

## **NASLOV, SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI**

**NASLOV:** Analiza akustičkih parametara glasa kao odziva na intenzivne zvučne pobude impulsnog oblika

**SAŽETAK:** Ovaj rad se bazira na analizi dviju pojava, odziva fundamentalne frekvencije glasa i EMG odziva orbicularis oculi mišića na zvučne pobude visokog intenziteta i impulsnog oblika. Izvršene su statistička analiza, te modeliranje identifikacijom sustava za obje pojave. Izvršena je i dodatna analiza modeliranja  $F_0$  odziva identifikacijom sustava, te korištenjem opisne veličine EMG odziva kao parametra pobude. Svrha te analize je bila pokušaj spajanja dviju analizu, da bi se pokazala veza između dviju pojava

**KLJUČNE RIJEČI:** startle odziv, fundamentalna frekvencija glasa, identifikacija sustava, startle treptaj, analiza odziva

## **TITLE, SUMMARY AND KEYWORDS**

**TITLE:** Analysis of acoustic speech parameters as a response to intensive impulse sound startle

**SUMMARY:** This thesis is based on the analysis of two distinct phenomena, the voice fundamental frequency response, and the electromyographic response of the orbicularis oculi muscle, to high intensity, impulse type stimuli. The analysis performed were statistical analysis, and System Identification modeling, of both phenomena. An additional System Identification analysis was performed on the voice fundamental frequency, using a descriptive value of the electromyographic response as a stimulus parameter. The purpose of that last analysis was attempting to combine both System Identification analysis, and showing the connection between the two phenomena.

**KEYWORDS:** startle response, voice fundamental frequency, system identification, startle blink, response analysis



## POPIS SLIKA

Slika 2.1: Položaji pojedinih organa ljudskog sustava za govor, te pojednostavljena shema sustava .....	2
Slika 2.2: Spektralne karakteristike signala na izlazu iz glasnica, prijenosna funkcija vokalnog trakta, te spektralna karakteristika izlaza iz vokalnog trakta.....	3
Slika 2.3 : Moždani izvori kontrole govora (Scherer, 1989).....	4
Slika 4.1: Usporedba estimirane fundamentalne frekvencije algoritama RAPT i PEFAC ...	7
Slika 4.2: Izvedba PEFAC algoritma u području u kojem ne postoje aberantne vrijednosti udvostručenja i prepolovljenja $F_0$ .....	8
Slika 4.3 : Usrednjeni $F_0$ odzivi za pobude s varirajućim intenzitetom, usrednjene po klasama intenziteta .....	12
Slika 4.4: Usrednjeni $F_0$ odzivi za pobude sa varirajućim trajanjem, usrednjene po klasama trajanja .....	13
Slika 4.5: Usrednjeni $F_0$ odzivi za pobude sa varirajućim vremenom porasta, usrednjeni po klasama vremena porasta.....	13
Slika 4.6: Usrednjeni $F_0$ odzivi za pobude sa varirajućim valnim oblikom,usrednjeni po vrstama valnog oblika.....	14
Slika 4.7: Primjeri parametara odziva $F_0$ .....	15
Slika 4.8: Histogram vršnih vrijednosti $F_0$ odziva, za pobude sa varirajućim intenzitetom .....	16
Slika 4.9: Histogram vremena nastupa $F_0$ odziva, za pobude sa varirajućim intenzitetom	16
Slika 4.10: Histogram vremena porasta $F_0$ odziva, za pobude sa varirajućim intenzitetom .....	17
Slika 4.11: Histogram trajanja $F_0$ odziva, za pobude sa varirajućim intenzitetom.....	17
Slika 4.12: Primjer para $F_0$ odziva i sintetičke pobude .....	21
Slika 4.13: Impulsni odzivi signalne grane i grane šuma primjernog BJ modela za $F_0$ odzive.....	27

Slika 4.14: Primjeri usporedbe prediktiranog izlaza modela i mjenenog izlaza validacijskog skupa podataka .....	27
Slika 4.15: Pripadajući prikaz analize reziduala predikcije za dva slučaja prikazana na slici 4.14 .....	28
Slika 4.16: Prikaz frekvencijske karakteristike primjernog BJ modela $F_0$ odziva .....	29
Slika 4.17: Prikaz nula i polova primjernog modela $F_0$ odziva u z ravnini.....	30
Slika 4.18: Prikaz odziva modeliranog sustava na pravokutnu pobudu trajanja 50 ms .....	30
Slika 4.19: Impulsni odzivi signalne grane i grane šuma primjernog OE modela $F_0$ odziva .....	32
Slika 4.20: Usporedba prediktiranog izlaza modela i mjenenih validacijskih podataka.....	33
Slika 4.21: Prikaz analize reziduala predikcije za slučaj prikazan na slici 4.20.....	33
Slika 4.22: Frekvencijska karakteristika primjernog OE modela $F_0$ odziva.....	34
Slika 4.23: Prikaz nula i polova primjernog OE modela $F_0$ odziva.....	34
Slika 5.1: Usrednjeni EMG odzivi, za pobude sa varirajućim intenzitetom, usrednjene po klasama intenziteta .....	37
Slika 5.2: Usrednjeni EMG odzivi za pobude sa varirajućim trajanjem, usrednjeni po klasama trajanja .....	37
Slika 5.3: Usrednjeni EMG odzivi za pobude sa varirajućim vremenom porasta, usrednjeni po klasama vremena porasta.....	38
Slika 5.4: Usrednjeni EMG odzivi za pobude sa varirajućim valnim oblikom, usrednjeni po klasama pobude .....	38
Slika 5.5: Histogram vršnih vrijednosti EMG odziva, za pobude sa varirajućim intenzitetom .....	39
Slika 5.6: Histogram vršnih vrijednosti EMG odziva, za pobude sa varirajućim trajanjem	39
Slika 5.7: Histogram vršnih vrijednosti EMG odziva, za pobude sa varirajućim vremenom porasta.....	40
Slika 5.8: Histogram vršnih vrijednosti EMG odziva, za pobude sa varirajućim valnim oblikom.....	40

Slika 5.9: Primjer para pobude i EMG odziva na ulazu u modeliranje identifikacijom sustava .....	43
Slika 5.10: Impulsni odzivi signalne grane i grane šuma primjernog BJ modela za EMG odziv .....	45
Slika 5.11: Primjer usporedbe prediktiranog izlaza modela i mjerenog izlaza validacijskog skupa podataka za EMG odziv .....	46
Slika 5.12: Prikaz analize reziduala predikcije za slučaj prikazan na slici 5.11.....	46
Slika 5.13: Prikaz frekvencijske karakteristike primjernog BJ modela za EMG odzive ....	47
Slika 5.14: Prikaz nula i polova u z ravnini primjernog BJ modela za EMG odzive.....	47
Slika 6.1 Odnos razine intenziteta i srednje vrijednosti omjera površina EMG treptaja i osnovice .....	50
Slika 6.2: Impulsni odzivi signalne grane i grane šuma primjernog BJ modela za $F_0$ odzive modelirane korištenjem opisne veličine EMG odziva kao parametra pobude .....	53
Slika 6.3: Primjeri usporedbe prediktiranog izlaza modela i mjerenog izlaza validacijskog skupa podataka .....	53
Slika 6.4: Pripadajući prikaz reziduala predikcije za dvije usporedbe na slici 6.3.....	53
Slika 6.6: Prikaz odziva modela na pravokutnu pobudu trajanja 50 ms.....	54
Slika 6.5: Frekvencijska karakteristika, te prikaz nula i polova primjernog modela .....	54

## POPIS TABELA

Tabela 4.1: Prikaz razlika vršnih vrijednosti $F0$ odziva naspram prvog referentnog te srednje vrijednosti svih razlika.....	11
Tabela 4.2: Prikaz razlika vršnih vrijednosti $F0$ odziva naspram prvog referentnog te srednje vrijednosti svih razlika.....	11
Tabela 4.3: Raspon vršnih vrijednosti $F0$ odziva za pobude varirajućeg intenziteta.....	18
Tabela 4.4: Izlazni podaci statističke analize karakteristika odziva $F0$ za pobude s promjenjivim trajanjem .....	19
Tabela 4.5: Raspon vršnih vrijednosti $F0$ odziva za pobude sa varirajućim trajanjem.....	19
Tabela 4.6: Izlazni podaci statističke analize karakteristika odziva $F0$ za pobude sa promjenjivim vremenom porasta.....	20
Tabela 4.7: Raspon vršnih vrijednosti $F0$ odziva za pobude sa varirajućim vremenom porasta.....	20
Tabela 4.8: Izlazni podaci statističke analize karakteristika odziva $F0$ za pobude sa promjenjivim valnim oblikom .....	20
Tabela 4.9: Rezultati modeliranja $F0$ odziva, po različitim grupama pobuda i modelima .	25
Tabela 4.10: Rezultati modeliranja $F0$ odziva usrednjenih po sudionicima, za pobude varirajućeg intenziteta.....	31
Tabela 5.1: Izlazni podaci statističke analize karakteristika EMG odziva za pobude sa promjenjivim intenzitetom .....	41
Tabela 5.2: Izlazni podaci statističke analize karakteristika EMG odziva za pobude sa promjenjivim trajanjem .....	41
Tabela 5.3: Izlazni podaci statističke analize karakteristika EMG odziva za pobude sa promjenjivim vremenom porasta.....	42
Tabela 5.4: Izlazni podaci statističke analize karakteristika EMG odziva za pobude sa promjenjivim valnim oblikom .....	42
Tabela 5.5: Rezultati modeliranja EMG odziva po svim modelima i grupama pobude .....	44
Tabela 6.1: Usrednjeni rezultati modeliranja odziva $F0$ korištenjem opisne veličine EMG odziva kao parametra pobude .....	51

## POPIS JEDNADŽBI

Jednadžba 4.1: Struktura ARX modela (Ljung, 2014) .....	22
Jednadžba 4.2: Struktura OE modela (Ljung, 2014) .....	22
Jednadžba 4.3: Struktura ARMAX modela (Ljung, 2014).....	22
Jednadžba 4.4: Struktura BJ modela (Ljung, 2014) .....	22
Jednadžba 4.5: Jednadžba prijenosne funkcije primjernog BJ modela za $F_0$ odziv .....	26
Jednadžba 4.6: Jednadžba prijenosne frekvencije primjernog OE modela $F_0$ odziva .....	32
Jednadžba 5.1: Jednadžba prijenosne funkcije primjernog BJ modela EMG odziva.....	45
Jednadžba 6.1: Jednadžba prijenosne funkcije primjernog BJ modela za $F_0$ odzive modelirane korištenjem opisne veličine EMG odziva kao parametra pobude .....	52