



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Mehhatroonikainstituut  
Mehhatroonikasüsteemide õppetool

MHK40LT

*Ülari Lees*

## **Automaathäälestuse süsteem akustilisele kitarrile**

Bakalaureusetöö

Autor taotleb  
tehnikateaduste bakalaureuse  
akadeemilist kraadi

Tallinn

2014

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....” .....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....” .....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” .....201... a.

..... allkiri

TTÜ Mehhatroonikainstituut

Mehhatroonikasüsteemide õppetool

## **BAKALAUREUSETÖÖÜLESANNE**

2014. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Ülari Lees 112401MAHB

Õppekava: MAHB02/09

Eriala: Mehhatroonika

Juhendajad: Teadur Mairo Hiiemaa,

doktorant Marti Arak

### **BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:**

Automaathäälestuse süsteem akustilisele kitarrile

Automatic Tuning System for Acoustic Guitar

### **Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Olemasolevate automaathäälestajate ja isehäälestuvate kitarride funktsionaalsuse analüüs, nõuete defineerimine	19.03.2014
2.	Motoriseeritud keelepingsutusmehhanismi väljatöötamine	30.03.2014
3.	Helianalüüsi programmi loomine	13.04.2014
4.	Elektroonika projekteerimine	27.04.2014
5.	Katsetused automaathäälestuse süsteemiga	18.05.2014

### **Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:**

Tarkvara loomine heli komponentsageduste leidmiseks. Regulaatori süntees ja häälestamine. Elektroonika projekteerimine.

**Töö keel:** eesti keel

Kaitsmistootlus esitada hiljemalt 22.05.2014

**Töö esitamise tähtaeg** 22.05.2014

**Üliõpilane:** Ülari Lees /allkiri/ ..... kuupäev.....

**Juhendajad:** Mairo Hiiemaa /allkiri/ ..... kuupäev.....

Marti Arak /allkiri/ ..... kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

# SISUKORD

Sissejuhatus .....	6
1 Olemasolevate isehäälestuvate kitarride funktsionaalsuse analüüs.....	8
1.1 Gibson Min-ETune .....	8
1.2 Axcent Tuning Systems .....	8
1.3 TronicalTune .....	9
1.4 Antares AT-200 .....	9
2 Lähtemäärang .....	11
2.1 Nõuded.....	11
2.1.1 Täpsus.....	11
2.1.2 Kiirus .....	11
2.1.3 Universaalsus .....	11
2.1.4 Hind.....	12
2.2 Piirangud.....	12
2.2.1 Mass .....	12
2.2.2 Akustika .....	12
2.2.3 Ülereguleerimine .....	12
2.3 Lisafunktsioonid .....	13
3 Motoriseeritud keelepingsutusmehhanism .....	14
3.1 Tööolukorra analüüs .....	14
3.2 Ülekande valik.....	15
3.3 Mootori valik .....	16
3.3.1 Mootoritüüpide võrdlus.....	17
3.3.2 Valitud mootor .....	17
3.4 Mootori juhtimine.....	18
3.4.1 H-sild.....	18
3.4.2 PWM .....	19
3.4.3 Mootorikontrolleri valik .....	19
3.5 Regulaator.....	19
3.5.1 Mudel .....	19
3.5.2 Mudeli parameetrite määramine.....	23
3.5.3 Regulaatori süntees .....	23

3.5.4	Olekutaastaja .....	24
3.5.5	Regulaatori esmane häälestamine .....	25
3.5.6	Tiguülekanne mudel .....	26
4	Helialalüüsi programm .....	29
4.1	Heli tajumise anduri valik .....	29
4.2	Komponentsageduste arvutamine .....	29
4.2.1	Spetsiaalselt normaliseeritud autokorrelatsioon .....	30
4.2.2	Kiire <i>Fourier</i> ' teisendus .....	31
4.2.3	Oktavi määramine .....	32
4.3	Helialalüüsiprogrammi katsetamine .....	32
5	Katsestand .....	34
5.1	Plokkskeem .....	34
5.2	Süsteem SIMULINK keskkonnas .....	34
5.3	Elektronika .....	35
5.4	Mikrokontrolleri programmeerimine .....	36
5.4.1	Sisendi lugemine COM pordist .....	36
5.4.2	PWM signaali genereerimine .....	37
5.4.3	Manuaalne juhtimine nuppudest .....	37
5.5	Stand .....	37
6	Süsteemi integreerimine akustilise kitarriga .....	39
6.1	Väljapakutud integreerimislahenduse kontseptsioon .....	39
6.1.1	Pilli kõla mõjutamine .....	40
6.1.2	Detailide materjalid ja liited .....	40
6.1.3	Kõlakasti tugevus .....	41
	Kokkuvõte .....	43
	Summary .....	45
	kasutatud kirjandus .....	47
	Lisad .....	49
	Lisa 1 Optimaaljuhtimine ja olekutaastaja .....	49
	Lisa 2 WSNAC funktsioon .....	50
	Lisa 3 LPC-P2148 elektroonikaskeem .....	51
	Lisa 4 UART funktsioonid .....	52
	Lisa 5 PWM funktsioonid .....	53

## SISSEJUHATUS

Käesoleva bakalaureusetöö teema valik tulenes autori isiklikust huvist. Nimelt on autor kitarrimänguga tegelenud üle viie aasta ning kasutab sealjuures kümnekonda erinevat häälestust. Bakalaureusetöö raames valmivat süsteemi ja katsestendi arendatakse kindlasti hiljem edasi ning lõppeesmärgiks on luua valmis toode.

Kitarripalasisid mängitakse maailmas mitmeid erinevaid häälestusi kasutades. Erinevaid häälestusi kasutatakse mängimise lihtsustamiseks või selle võimaldamiseks ning samuti omapärase kõla saavutamiseks. Paljude kitarristide repertuaari kuulub lugusid, mille mängimiseks kasutatakse kümnekond või isegi rohkemat erinevat häälestust. Kuna kitarril häälestamine on küllaltki aeganõudev tegevus, siis võib häälestuse pidev muutmine muutuda tülikaks. Samuti ei ole esinemise ajal pidev pilli ümberhäälestamine aktsepteeritav. Selle vältimiseks kasutavad paljud kitarristid iga häälestuse jaoks erinevat instrumenti, kuid see muutub nii mõnegi kitarristi jaoks liiga kulukaks.

Kirjeldatud probleemi lahenduseks on isehäälestuv kitarr, mis suudab automaatselt lühikese aja jooksul ja paari nupuvajutusega muuta kitarril häälestust. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on luua automaathäälestuse süsteem ning katsestend süsteemi testimiseks.

Automaathäälestuse süsteem koosneb helialalüüsi programmist, motoriseeritud pingutusmehhanismist ja regulaatorist, millega süsteemi juhitakse. Regulaatori tööd pingutusmehhanismi juhtimisel modelleeritakse ning simuleeritakse Matlab ja Simulink keskkondades.

Kitarrikeelega võnkumisel tekkiv heli koosneb mitme erineva sagedusega komponentidest. Erinevad komponendid tekivad nii teiste keelte kaasavõnkumisest kui ka kõrgemat järku harmoonikute esinemisest keele võnkumisel. Helialalüüsi programmi katsetamiseks kasutatakse reaalse kitarrikeelega võnkumisest tekitatud helisignaale.

Katsestendi puhul piirduakse lihtsuse huvides ühe keele pingutamisega. Helialalüüsiprogramm ning regulaator realiseeritakse personaalarvutis. Mootori juhtimiseks kasutatakse mikrokontrollerit. Bakalaureusetöö raames kirjutatakse programmid lauarvutis ja mikrokontrolleris ning realiseeritakse ka seadmetevaheline suhtlus.

Lõpuks pakutakse välja võimalus, kuidas integreerida loodud süsteemi akustilise kitarriga ning uuritakse sellega kaasnevat probleeme. Kusjuures arvestatakse ka sellega, et häälestamine oleks võimalik, kui kasutatakse kapot – seadet, mida kasutatakse keelpillidel keelte mängimiseks kasutatava pikkuse vähendamiseks ehk helikõrguse tõstmiseks.

Bakalaureusetöö valmis TTÜ mehhatroonikainstituudi teaduri Mairo Hiiemaa ning mehaanikateaduskonna doktorandi Marti Araku juhendamisel. Lisaks konsulteeris autor automaatikainstituudi direktori Ennu Rüsterniga ja teiste autoomatikainstituudi töötajatega, kelle nõuannetest oli bakalaureusetöö valmimisel suur abi.

# 1 OLEMASOLEVATE ISEHÄÄLESTUVATE KITARRIDE FUNKTSIONAALSUSE ANALÜÜS

Hetkel on turul 4 automaatset kitarrihäälestajat:

- Gibson Min-ETune,
- Axcent Tuning Systems,
- TronicalTune.
- Antares AT-200,

Järgmisena kirjeldatakse igat lahendust üksikasjalikumalt ning hinnatakse nende plüsse ja miinuseid.

## 1.1 Gibson Min-ETune

Antud lahendus on väga kompaktne – seade mahub kitarriga pea tagaküljele ning on sama raske kui tavalised häälestajad, seega ei mõjuta pilli mängitavust. Toodet on võimalik osta paigaldatuna 11 erinevale Gibsoni kitarrile, kuid seda ei müüda eraldiseisvana. Tootja hinnangul suudetakse kitarr häälestada sekundite jooksul ning täis akuga saab häälestada 80-100 korda. Häälestustäpsuseks on kaks sajandikku pooltoon. Seadmes on salvestatud 12 häälestust, millest 6 saab kasutaja ise muuta. Seade kasutab tagasisidena keele pingutusjõudu, mis tähendab, et teistsuguse jämedusega keelte kasutamisel tuleb süsteem uuesti kalibreerida. Kalibreerimise kohta pole kahjuks tootja kodulehel informatsiooni, seega pole teada, kas seda on üldse võimalik teha. Toote hind on ligikaudu 400 €.

## 1.2 Axcent Tuning Systems

Tegemist on firmaga, mis pakub isehäälestuvate keelpillide lahendusi aastast 1987. Firma kasutab häälestamiseks patenteeritud „Open Loop Calibration“ tehnoloogiat [1]. Iga kitarr kalibreeritakse tootmise käigus ning vastavad kalibratsiooni parameetrid kirjutatakse püsivalt, mille järgi protsessor arvutab välja, mitu sammu mootorid peavad liikuma, et tagada vastav keele võnkesagedus. Pingutamiseks kasutatakse samm-mootoreid. Hetkel on valmis lahendused elektrikitarridele ning käivad katsetused „akustilise“ kitarriga jaoks – tegemist on siiski elektrilise kitarriga, mille kõla on võimalikult sarnane akustilisele kitarrile.



Suurim miinus antud toote puhul on see, et ei kasutata tagasisidet. Sellest tulenevalt võib tekkida häälestamisel viga, kui keskkonnatingimused muutuvad või kui kasutatakse erineva läbimõõduga keeli. Kalibreerimiseks tuleb viia läbi ajamahukaid katseid, mis viib toote hinna kõrgeks. Lahendus sobib vaid valitud kitarridele ning seda ei saa paigaldada olemasolevale kitarrile.



Sele 1.1 Axcent Tuning Systemsi häälestusseade Gibson Les Paul kitarril

### **1.3 TronicalTune**

TronicalTune on firma, mis toodab automaatseid häälestajaid, mida kasutatakse ka ülalmainitud tootes Gibson Min-Etune [2]. Lisaks pakub firma eraldiseisva tootena erinevate konfiguratsioonidega häälestajaid, mis sobivad teatud kitarridele. Toode on mõeldud olemasolevale kitarrile paigaldamiseks, seega on tegemist universaalsema lahendusega. Selline lahendus on tarbijale vastuvõetavam, kuna puudub vajadus kalli kitarril ostmiseks. Muudes aspektides on toode analoogne ülaltoodud Gibson Min-ET-ga seega kaasnevad samasugused tagasisidetüübist tulenevad probleemid. Seadme hinnaks on ligikaudu 300 €.

### **1.4 Antares AT-200**

Tegemist on eelnevatest teistsuguse lahendusega. Häälestamiseks mitte ei pingutata keeli mootoritega vaid töödeldakse helisignaali välise seadmega, mis tuleb ühendada kitarril ja võimendi vahele. Signaali spektraalanalüüsi tulemusena leitakse kitarrikeelte reaalsed sagedused ning liidetakse nendele vastavalt vajaminevad konstandid, kusjuures kitarr ise võib olla täiesti häälest ära. Seadet saab kasutada kõikide kitarridega, mida on võimalik ühendada võimendiga, kuid ei saa kasutada kui soovitakse mängida akustilise kitarriga ilma võimendita.

Sellise lahenduse puhul on keeruline edasi anda nüansse, mis tulevad erinevatest mängutehnikatest, rääkimata perkussioonist akustiliste kitarride puhul. Samuti on kitarristide jaoks antud lahendus kõige vähem vastuvõetavam just heli moonutuse tõttu. Täismahus tarkvara, mis sisaldab *Solid-Tune* intonatsiooni seadistamistehnoloogiat, 13 erinevat häälestust ning hulgaliselt lisafunktsioone, maksab \$300 [3].

## **2 LÄHTEMÄÄRANG**

Olemasolevate isehäälestuvate kitarride uurimise ning autori enda kogemuse põhjal määratletakse nõuded, piirangud ning lisafunktsioonid, mida üks konkurentsivõimeline automaathäälestussüsteemiga kitarr peaks omama. Järgnevates alapeatükkides toodud nõuete, piirangute ja lisafunktsioonide täitmine ei ole otseselt käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks, kuid nendega arvestatakse ka automaathäälestuse süsteemi katsestendi projekteerimisel.

### **2.1 Nõuded**

#### **2.1.1 Täpsus**

Tüüpiliselt on kitarride häälestajate täpsus ligikaudu üks sajandik pooltoonist või vähem [4], mis on madalam kui inimkõrva eristusvõime. Häälestamise täpsus sõltub sageduse määramise täpsusest ning mootorite juhtimise täpsusest.

#### **2.1.2 Kiirus**

Automaatse kitarrihäälestaja suurimaks eeliseks võrreldes manuaalse häälestamisega on see, et kõiki keeli on võimalik häälestada samaaegselt. Ideaalsel juhul tuleks pilli ära häälestada nii, et keeled tuleb vaid üks kord korraga helisema panna. Olemasolevad isehäälestuvad kitarrid seda veel ei suuda, seega on rahuldav ka see, kui keeli tuleb helisema panna kaks või äärmise juhul kolm korda.

#### **2.1.3 Universaalsus**

Automaathäälestuse süsteemi universaalsuse all saab mõista kahte asjaolu: universaalsust erinevate kitarride suhtes ning universaalsust erinevate keelte suhtes. Automaathäälestuse süsteem peab kindlasti olema võimeline pilli häälestama olenemata sellest, kui jämedad keeled kitarrile parasjagu paigaldatakse. Kindlasti on eeliseks, kui selleks ei ole vaja süsteemi manuaalselt seadistada. Universaalsus kitarride suhtes ei ole niivõrd kohustuslik element, kuid sobitumine kõikvõimalike kitarridega oleks kindlasti eeliseks, sest nii ei pea tarbijad automaathäälestaja tõttu endale uut pilli soetama.

## **2.1.4 Hind**

Loomulikult on iga toote juures konkurentsivõimelisuse näitajaks hind. Hetkel turul olevate isehäälestuvate kitarride hinnaklass on umbes 300-400 eurot. Loodavast süsteemist arendatava toote hinda tarbijale on keeruline hinnata, kuid katsestendis kasutatavate komponentide koguhind ei tohiks ületada 300 eurot. Toote omahind on kindlasti väiksem kui katsestendi oma ning loodava tarkvara lisandväärtus on ligikaudu sama suur kui komponentide omahind. Seega oleks antud süsteemist arendatava toote realistlik hind tarbijale 400-450 eurot.

## **2.2 Piirangud**

### **2.2.1 Mass**

Kitarri mass ning eelkõige massijaotus omavad suurt tähtsust pilli mängimise mugavuses. Siinkohal on piiravaks faktoriks eelkõige see, et kitarri pea külge, kus enamikul kitarridel on pingutid, ei saa lisada eriti lisaraskust. See viiks kitarri masskeskme liialt kaugemale kehast ning kitarri kael hakkaks mängides ebamugavalt alla vajuma.

Olemasolevad isehäälestuvad kitarrid kasutavad seetõttu väikeseid ja kergeid mootoreid. Väikesed reduktoriga mootorid aga ei suuda arendada piisavat väändemomenti, et pingutada jämedamaid keeli soovitud pingsuseni, või on sellised mootorid kordades kallimad.

### **2.2.2 Akustika**

Akustiliste kitarride puhul on eriti tähtsal kohal pilli kõla. Seda ei tohi mingil juhul ära summutada. Keelte võnkumine muudetakse õhu võnkumiseks peamiselt kõlalaua abil, milleks on kõlakasti ülemine plaat. Kõlakast on konstrueeritud nii, et see võimendaks bassi toone. Samas ei ole näiteks bassitoonide võimendamine alati soovitud, seega pilli kõla vähesel mõjutamisel võib justnimelt saavutada omapärase meeldiva kõlaga pilli.

### **2.2.3 Ülereguleerimine**

Keelpillide häälestamise puhul on tähtis, et keeli häälestatakse pingutades. Vastasel juhul võib keel takerduda roobi või sadula nurga taha ning järgmise keeletõmbega sealt vabaneda. See tähendab, et keele pingsus muutub hüppeliselt ja keele võnkesagedus ei ole enam õige.

Ülereguleerimise vältimiseks tuleb mootori juhtimine realiseerida väga täpselt, käesolevas töös koostatakse pingutusemehhanismi kohta mudel ning kasutatakse integraalset tagasisidet sageduse järgi, mis peaks tagama võimaluse seadistada regulaator nii, et ülereguleerimist ei toimuks.

## **2.3 Lisafunktsioonid**

Kõige lihtsamaks, kuid samas väga kasulikuks lisafunktsiooniks automaathäälestuse süsteemi puhul on keelte maha ja peale kerimine mootoriga. Iga kitarrist teab, et keelte vahetamine on suhteliselt tüütu tegevus. Seda oleks võimalik teha mootorit nupust pöörates. Teiseks lisafunktsiooniks võiks olla kangi funktsiooni realiseerimine, kusjuures iga keelt saaks pingutada või lõdvendada sõltumatult, mis tavalise kangi puhul on võimatu. Kolmandaks saaks tuvastada pilli intonatsiooni paigasolekut. See eeldaks, et üks kitarrisadulatest oleks reguleeritav ehk intonatsioon muudetav. Lisafunktsiooniks võib ka lugeda seda, kui automaathäälestussüsteemi abil on võimalik kitarrisadulatest häälestada ka siis, kui kasutatakse kapot.

### 3 MOTORISEERITUD KEELEPINGUTUSMEHCHANISM

#### 3.1 Tööolukorra analüüs

Keele võnkesagedus sõltub keele pikkusest, massist ning pingsusest. Nendest saab muuta vaid pingsust ning nii kitarrikeeli häälestataksegi. Järgnevalt uuritakse kui suurt tõmbejõudu tuleb rakendada keeltele, et saavutada soovitud võnkesagedusi.

Esmalt tuleb määrata igale keelele maksimaalne ja minimaalne kasutatav sagedus. Allolevas tabelis on toodud kasutatavad sagedusvahemikud (vt Tabel 3.1), mis tagavad autori enda poolt kõige ekstreemsemate häälestuste kasutamisevõimaluse.

Tabel 3.1 Keele sagedusvahemikud

Keel	Sagedus			
	Minimaalne		Maksimaalne	
	Hz	noot	Hz	noot
1	246,9	B3	392	G4
2	185	F#3	311,1	Eb4
3	146,8	D3	246,9	B3
4	110	A2	174,6	F3
5	82,4	E2	138,6	C#3
6	58,3	Bb1	98	G2

Maksimaalsetele sagedusele vastavad maksimaalsed keelte tõmbejõud on leitavad järgmise valemi abil:

$$F_k = 4 \cdot \rho_j \cdot l^2 \cdot f^2, \quad (3.1)$$

kus  $F_k$  – keelele mõjuv tõmbejõud [N],

$\rho_j$  – keele joontihedus  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}}\right]$ ,

$l$  – keele võnkuva osa pikkus [m],

$f$  – keele võnkesagedus [Hz].

Järgnevalt leitakse ühe tuntuima kitarrikeelte tootja Daddario poolt pakutava keeltekomplekti jaoks maksimaalsed keeltele mõjuvad jõud. Keeltekomplektiks valitakse kõige jämedamatest keeltest koosnev komplekt EJ18 Phosphor Bronze, Heavy, 14-59 [5]. Vastavate keelte joontihedused on leitavad tootekataloogist [6]. Leitud maksimaalsed jõud on toodud allolevas tabelis ( vt Tabel 3.2).

Tabel 3.2 Keeltele mõjuvad maksimaalsed tõmbejõud

Keel	$\rho_j$ (g/m)	$l$ (m)	$f$ (Hz)	$F_k$ (N)
6. PB059	12,60	0,65	98	204,4
5. PB049	8,78	0,65	138,6	285,0
4. PB039	5,56	0,65	174,6	286,4
3. PB027	2,65	0,65	246,9	272,9
2. PL018	1,28	0,65	311,1	209,6
1. PL014	0,78	0,65	392	201,4

### 3.2 Ülekande valik

Ülekande valiku puhul on väga tähtis, et see oleks iselukustuv. Kindlasti on olulised ka reduktori mass ja mõõtmed. Samuti on tarvilik küllaltki suur ülekandearv, sest eelnevalt leitud maksimaalsete pingutusjõudude tagamiseks on vaja rakendada küllaltki suurt momenti. Teatavasti täidab kõik eelnimetatud tingimused tiguülekanne, mistõttu just selle kasutamiskõlblikkust antud rakenduses esmalt uuritaksegi.

Tiguülekanne kasutatakse suure ülekandearvu saavutamiseks väikese reduktori massi ja mõõtmete juures. Ka manuaalsetes kitarrikeelte pingutites kasutatakse tiguülekanne, seega on loogiline kasutada seda ka motoriseeritud pingutusmehhanismis. Lisaks on tiguülekanne

eeliseks iselukustuvus, mistõttu ei ole vaja pidevalt mootorit koormata. Tiguülekande suurimaks puuduseks on väike kasutegur, mis sõltuvalt ülekandetegurist on 0,6 kuni 0,8.

Iselukustuvus on tiguülekande puhul tagatud, kui on täidetud järgnev tingimus [7]:

$$\cos\phi_n \tan\lambda_l \leq \mu_s \leq \cos\phi_n \cot\lambda_l, \quad (3.2)$$

kus  $\phi_n$  – hambumisnurk [rad],

$\lambda_l$  – teo keerme tõusunurk [rad],

$\mu_s$  – staatiline hõõrdetegur teo ja tiguratta vahel.

Käesoleva bakalaureusetöö tulemusena valmiva katsestendil kasutatakse täpselt samasugust tiguülekanne, mida kasutatakse tüüpilise akustilise kitarriga manuaalsetes pingutites. Seetõttu ei peeta tiguülekanne tugevuse ülearvutamist vajalikuks. Käesolevas töös kasutatava ülekandearvu 15 juures on see 0,8.

### 3.3 Mootori valik

Katsestendis kasutatakse keelte pingutamiseks kõige levinumat meetodit: keeled keritakse ümber silindrilise võlli. Alternatiivselt võiks keele kinnitada pukile, mida lineaarselt liigutades pingutatakse keelt, kuid selle mehhaanika realiseerimine oleks oluliselt keerukam, mistõttu seda ei rakendata. Katsestendis kasutatava pinguti võlli diameeter on 6 mm.

Nüüd on olemas piisavalt andmeid, et valida katsestendis kasutatav mootor. Vajaminev mootori moment on leitav valemiga:

$$T = S \cdot \frac{F_k \cdot d}{2 \cdot \eta \cdot i_{wg}}, \quad (3.3)$$

kus  $T$  – mootori moment [N · m],

$S$  – varutegur,

$d$  – pinguti võlli diameeter [m],

$\eta$  – tiguülekanne kasutegur,



$i_{wg}$  – tiguülekanne ülekanne arv.

Kuna lisaks keele pingutusjõule on vaja ületada ka hõõrdejõud keele ja sadula vahel ning mootori moment väheneb madalatel pööretel töötades siis valitakse varuteguriks 3. Seega katsestendis kasutatava mootori vajaminev moment on:

$$T = 3 \cdot \frac{286,4 \cdot 0,006}{2 \cdot 0,8 \cdot 15} = 0,2148 \text{ N} \cdot \text{m} = 21,48 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

### 3.3.1 Mootoritüüpide võrdlus

Mootori valikul kaalutakse erinevate alalisvoolu mootorite tüüpide vahel: harjadega ja harjadeta alalisvoolumootorid ning samm-mootor. Kriteeriumiteks valikul on täpsus, mass, mõõtmed, juhtimise keerukus, tarbitav vool, toitepinge ja hind. Võrdluse tulemused on toodud allolevas tabelis (vt Tabel 3.3). Tabeli koostamisel on arvestatud, et mootorite juhtimiseks ei kasutata enkoodreid ning kontrollida on vaja mootori väljundvõlli positsiooni.

Tabel 3.3 Mootoritüüpide võrdlus

kriteerium	harjadega mootor	harjadeta mootor	samm-mootor
täpsus	ebatäpne	keskmine	täpne
mass	väike	keskmine	suur
mõõtmed	väike	keskmine	suur
juhtimise keerukus	lihtne	keeruline	lihtne
hind	madal	kõrge	keskmine

### 3.3.2 Valitud mootor

Eelpool nimetatud kolmest mootoritüübist osutus kõige sobivamaks harjadega alalisvoolu mootor, sest seda on suhteliselt lihtne juhtida, mootoril on väikesed mõõtmed ja mass ning see on odav. Täpsus on küll väiksem kui samm-mootoril, kuid seda saab kompenseerida regulaatori täpse häälestamisega.

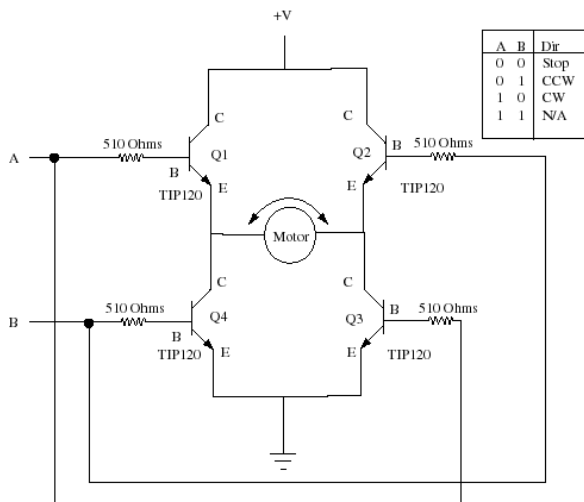
Katsestendi jaoks valiti Eestist kiirelt kättesaadavast allikast sobiv mootor. Sobivaimaks osutus *ITT Group*'i poolt pakutav mootorreduktor [8], mille nimimoment on  $2,5 \text{ kg} \cdot \text{cm}$  ehk  $0,24 \text{ N} \cdot \text{m}$  ning pöörlemiskiirus 70 pööret minutis.

### 3.4 Mootori juhtimine

Harjadega alalisvoolu mootori juhtimiseks kasutatakse nn H-silda, mis võimaldab muuta mootorile rakendatava pingesuunda (märki). Mootorile rakendatavat pinget muudetakse impulsslaiusmodulatsiooni (PWM signaali) abil.

#### 3.4.1 H-sild

Kõige lihtsam H-sild koosneb kahest transistoripaarist, mis on ühendatud mootoriga nii, nagu on näidatud alloleval joonisel (vt Sele 3.1). Kui sisend A on kõrge ning B madal, siis avatakse transistorid Q1 ja Q3 ning mootor rakendatakse pinge  $+U$ . Kui sisend B on ühendatud kõrgele pingeniivoole ning A madalale, siis avatakse transistorid Q2 ja Q4 ning rakendatakse pinge  $-U$ . Kui mõlemad sisendid on ühendatud madalale pingeniivoole, siis ei ole mootori klemmid galvaaniliselt ühendatud pingesallikaga. Kui aga mõlemad sisendid on kõrgel pingeniivoole, siis on kõik transistorid avatud, ning pingesallika klemmid on omavahel lühistatud. Sellist olukorda tuleb vältida, sest transistorid ei talu lühisvoolu ning „põlevad maha“.



Sele 3.1 H-sild

### 3.4.2 PWM

Kui H-silla kasutamise on võimalik mootorit pöörata mõlemas suunas, siis mootorile rakendatava pinge muutmiseks kasutatakse PWM signaali. PWM ehk impulsslaiusmodulatsioon on nelinurksignaali. Muutes signaali kõrgel ja madalal nivool olemise aja vahekorda ehk pulsi laiust saab muuta mootorile näiliselt rakendatava pinge väärtust. Näiteks kui toitepinge on 6 V ning PWM signaal on poole ajast kõrgel ja poole ajast madalal pingeniivool, siis mootorile näiliselt rakendatav pinge on 3 V.

### 3.4.3 Mootorikontrolleri valik

Katsestendis kasutatava mootorikontrolleri valikul kaaluti kahe variandi vahel: Parallax MC33926 [9] ning Pololu TB6612FNG [10]. Pololu poolt pakutav mootorikontroller on küll juhitav kõrgema sagedusega PWM signaaliga (100 kHz) ning on ligi 3 korda odavam, kuid maksimaalne pikaajaline vool mootori kohta on 1 A, mis võib jääda veidi madalaks, kuna valitud mootori maksimaalne voolumäär on 1,6 A. Lisaks suuremale lubatud voolumäärile (3 A) on Parallaxi mootorikontrolleri eeliseks mootori voolumäär jälgimise võimalus. Seda saab kasutada mootori kaitsmise eesmärgil liigasuure voolu eest ning kui tagada piisavalt ühtlased tingimused ülekandes siis saab mõõdetud voolu kasutada ka mootori juhtimisel.

## 3.5 Regulaator

Kuna kitarrikeeli tuleb häälestada keeli pingutades, siis on oluline, et regulaator on häälestatud nii, et ei toimiks ülereguleerimist. Seetõttu koostatakse süsteemi kohta matemaatiline mudel, mille peal esmalt regulaator häälestatakse. Hiljem kasutatakse mudelit mootori pöörlemiskiiruse hindamiseks, mille abil on võimalik ka reaalselt süsteemi paremini juhtida.

### 3.5.1 Mudel

Mudeli koostamisel võeti aluseks Mathworks'i poolt pakutud alalisvoolu mootori positsiooni juhtimisesüsteemi näide [11]. Antud süsteemi mudelile tehti vajaliku muudatused, et mudel kirjeldaks motoriseeritud keelepingsutusmehhanismi.

Keele sageduse määrab keele võnkumise osa pikkus, joontihedus ning pingutusjõud, mis on omavahel seotud järgmise valemiga:

$$f = \sqrt{\frac{F_k}{4 \cdot \rho_j \cdot l^2}}, \quad (3.4)$$

kus  $F_k$  – keelele mõjuv tõmbejõud [N],

$\rho_j$  – keele joontihedus [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}}$ ],

$l$  – keele võnkuva osa pikkus [m],

$f$  – keele võnkesagedus [Hz].

Tõmbejõud on põhjustatud keele elastsest deformatsioonist keele kerimisel ümber silindrilise võlli, seega saab leida seose keele tõmbejõu ning pinguti võlli nurga vahel.

$$F_k = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot E \cdot \frac{d \cdot \varphi}{2 \cdot L}, \quad (3.5)$$

kus  $D$  – keele tõmbele töötava osa diameeter [m],

$E$  – keele tõmbele töötava osa materjali elastsusmoodul [Pa],

$d$  – pinguti võlli diameeter [m],

$\varphi$  – pinguti võlli pöördenurk [rad],

$L$  – kogu keele pikkus [m].

Eelnevate valemite järgi saab leida seose keele võnkesagedus ning pinguti võlli pöördenurga vahel.

$$f = \sqrt{c_1 \varphi}, \quad (3.6)$$

kus

$$c_1 = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot E \cdot d}{32 \cdot L \cdot \rho_j \cdot l^2}, \quad (3.7)$$

*Kirchoffi* pingeseadusest saame välja kirjutada [11]

$$L \frac{di}{dt} = u - iR - k_b \cdot \dot{\varphi}, \quad (3.8)$$

kus  $L$  - mähise induktiivsus [H],

$i$  – mähise vool [A],

$u$  – mähise sisendpinge [V],

$R$  – mähise takistus [ $\Omega$ ],

$k_b$  – vastuelektromotoorjõu koefitsent [ $\frac{V \cdot s}{rad}$ ].

Mootori väändemoment on arvutatav valemiga

$$T = T_L + I \frac{d\dot{\varphi}}{dt}, \quad (3.9)$$

kus  $T$  – mootori moment [ $N \cdot m$ ],

$T_L$  – keele tõmbejõust tulenev moment [ $N \cdot m$ ],

$b$  – sumbuuse koefitsent [ $N \cdot m \cdot s$ ]

$I$  – süsteemi inertsimoment taandatuna pinguti  $i$  võlli pöörlemiskiirusele [ $kg \cdot m^2$ ].

Mootori momendi ja voolu vahel on võrdeline seos

$$T = k_m \cdot i, \quad (3.10)$$

kus  $k_m$  – momendi koefitsent [ $\frac{N \cdot m}{A}$ ].

Keele tõmbejõust tulenev moment on leitav valemiga

$$T_L = F_k \cdot \frac{d}{2}. \quad (3.11)$$

Võrranditest 3.4-11 saame moodustada esimest järku diferentsiaalvõrrandite süsteemi, mille alusel saab koostada kitarrikeelte pingutusmehhanismi iseloomustava süsteemi.

$$\frac{di}{dt} = \frac{u}{L} - \frac{i \cdot R}{L} - \frac{k_b \cdot \dot{\varphi}}{L}$$

$$\frac{d\dot{\phi}}{dt} = \frac{k_m \cdot i}{I} - \frac{E \cdot \pi \cdot d^2 \cdot D^2}{16 \cdot L \cdot c_1} \cdot \frac{f^2}{I} \quad (3.12)$$

$$\frac{d(f^2)}{dt} = c_1 \cdot \dot{\phi}$$

Tähistame

$$k_F = \frac{E \cdot \pi \cdot d^2 \cdot D^2}{16 \cdot L} \quad (3.13)$$

Diferentsiaalvõrrandite süsteemist saame kirjutada süsteemi olekuvõrrandi, kusjuures süsteemi olekuteks on mähise vool, mootori nurkkiirus ja keele vönkesageduse ruut ning sisendiks on mähisele antav pinge.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (3.14)$$

kus olekuvektor  $X = \begin{bmatrix} i \\ \dot{\phi} \\ f^2 \end{bmatrix}$ ,

$$\text{olekumaatriks } A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_b}{L} & 0 \\ \frac{k_m}{I} & 0 & -\frac{k_F}{c_1 \cdot I} \\ 0 & c_1 & 0 \end{bmatrix},$$

sisendvektor  $U = [u]$ ,

$$\text{sisendmaatriks } B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ L \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Süsteemi väljundvõrrandiks tulenevalt võrrandist 3.6 on

$$Y = CX, \quad (3.15)$$

kus väljundvektor  $Y = [f^2]$ ,

$$\text{väljundmaatriks } C = [0 \quad 0 \quad 1]$$

Süsteemi väljundiks on keele võnkesageduse ruut. See on vajalik selleks, et saada väljundvõrrand oma kõige tavalisemale kujule, tänu millele on integraalse tagasiside lisamiseks vajalike laiendatud maatriksite leidmine lihtsam.

### 3.5.2 Mudeli parameetrite määramine

Mudelis esinevad mitmed parameetrid tuleb määrata mootori nimiväärtustest lähtuvalt ning keele materjali omadused tuleb leida käsiraamatutest. Samuti on vaja leida andmed tiguülekande kohta kas siis ise mõõtes, või tootekataloogist. Katsesendi jaoks valitud mootori puhul on mugavalt antud nimimoment ning nimivool, mille abil on hõlpsasti leitav mootori momendi koefitsient

$$k_m = \frac{T_{nom}}{i_{nom}}. \quad (3.16)$$

$$k_m = 4,9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A}}.$$

Momendi koefitsient on alalisvoolu mootorite puhul alati võrdne vastuelektromotoorjõu koefitsiendiga. See on tuletatav energia jäävuse seadusest. Seega

$$k_b = k_m = 4,9 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{rad}}$$

Jõu koefitsient  $k_F$  tuleb iga keele jaoks määrata eraldi. Metallkeeled akustilistele kitarridele on tehtud roostevabast terasest elastsusmooduliga 210 GPa. Antud katsesendi puhul on pinguti võlli diameeter 6 mm ning keele kogupikkus 91,5 cm. Näiteks 0,015 tollise läbimõõduga keele jaoks

$$k_F = 0,234 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Mootori mähise induktiivsus ja takistus pole valitud mootori kohta kättesaadavad, seega tuleb need määrata mõõtmise teel.

### 3.5.3 Regulaatori süntees

Kuna süsteem ei arvesta hõõrdejõududega, mis on tegelikkuses küllaltki suured, siis antud süsteemi järgi pingutusmehhanismi reguleerides tekiks väljundil lubamatult suur staatiline

viga. Antud ülesande puhul pole reguleerimisaeg kriitiline kvaliteedinäitaja seega on tarvilik ja sobilik kasutada täiendavat integreerivat tagasisidet väljundi järgi. Konstantse seadesuuruse juures on ühekordse integraalse tagasiside tulemusena väljundi staatiline viga null, seega kogu seadme viga on võrdne sageduse määramise veaga. Selleks on regulaatori sünteesil vaja kasutada laiendatud oleku-, sisendi- ja väljundmaatrikseid ning laiendatud olekuvektorit. [12]

Regulaator sünteesitakse optimaaljuhtimist kasutades. See meetod võimaldab lihtsalt määrata nii olekutele kui ka sisendile kitsendusi – väärtusi, mida need ei tohi ületada. Samuti on lihtne kaalumatriksi tegureid muutes mõjutada kindla oleku või sisendi siiret. Optimaaljuhtimise meetodil regulaatori süntees toimub järgmist võrrandit minimeerides:

$$I(x, u) = \frac{1}{2} \sum_k (x(k)Qx(k)^T + u(k)Ru(k)^T), \quad (3.17)$$

kus  $Q$  – oleku kaalumatriks,

$R$  – sisendi kaalumatriks.

Funktsioonil  $I(x,u)$  eksisteerib miinimum, kui  $Q$  on positiivselt poolmääratud ja  $R$  on positiivselt määratud. Regulaatori sünteesiks kasutatud Matlabi kood on toodud lisades (vt Lisa 1 Optimaaljuhtimine ja olekutaastaja).

### 3.5.4 Olekutaastaja

Antud süsteemi puhul on mõõdetavateks suurusteks keele võnkesagedus ning mootori tarbitav vool. Kuna mootori tarbitav vool on hõrdejõudude tõttu suurem kui arvutuslikult ning sõltub ka muudest tingimustest (nt ülekande määritus), siis mõõdetakse ainult keele võnkesagedust. Teised olekud – mootori tarbitav vool ja pöörlemiskiirus tuleb leida olekutaastaja abil.

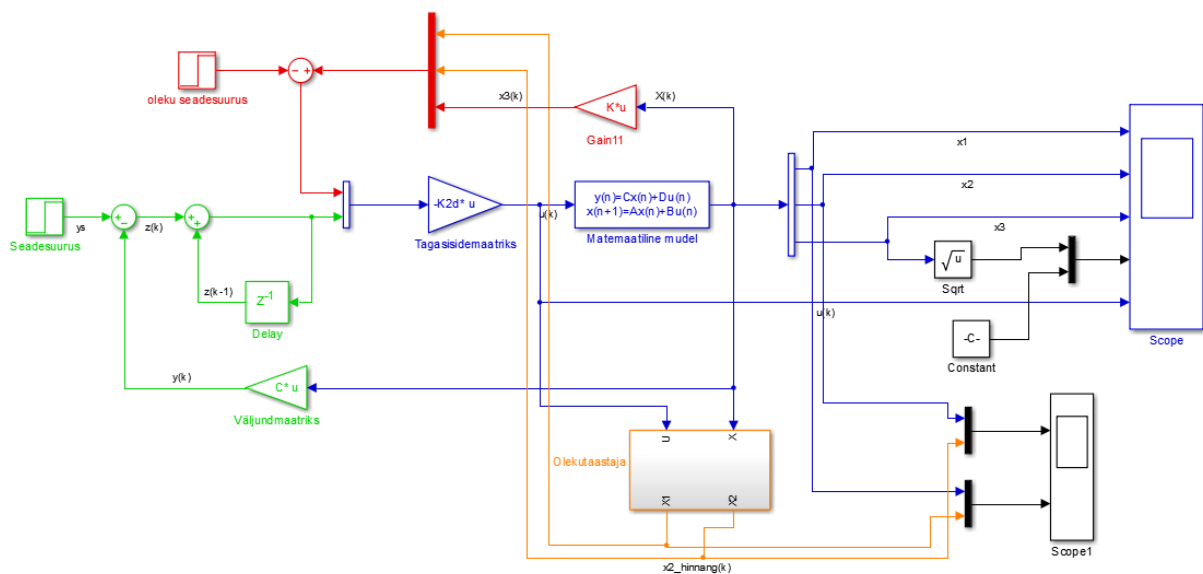
Olekutaastajas arvutatakse matemaatilise mudeli järgi mittemõõdetavad olekud teades sisendi ning mõõdetava oleku väärtusi. Olekutaastaja kasutamine on võimalik tingimusel, et antud süsteem on täielikult jälgitav st mõõdetud sisend- ja väljundsuuruste alusel on võimalik lõpliku ajalõigu piires kindlaks teha olekumuutujate hetkeväärtusi [13].



### 3.5.5 Regulaatori esmane häälestamine

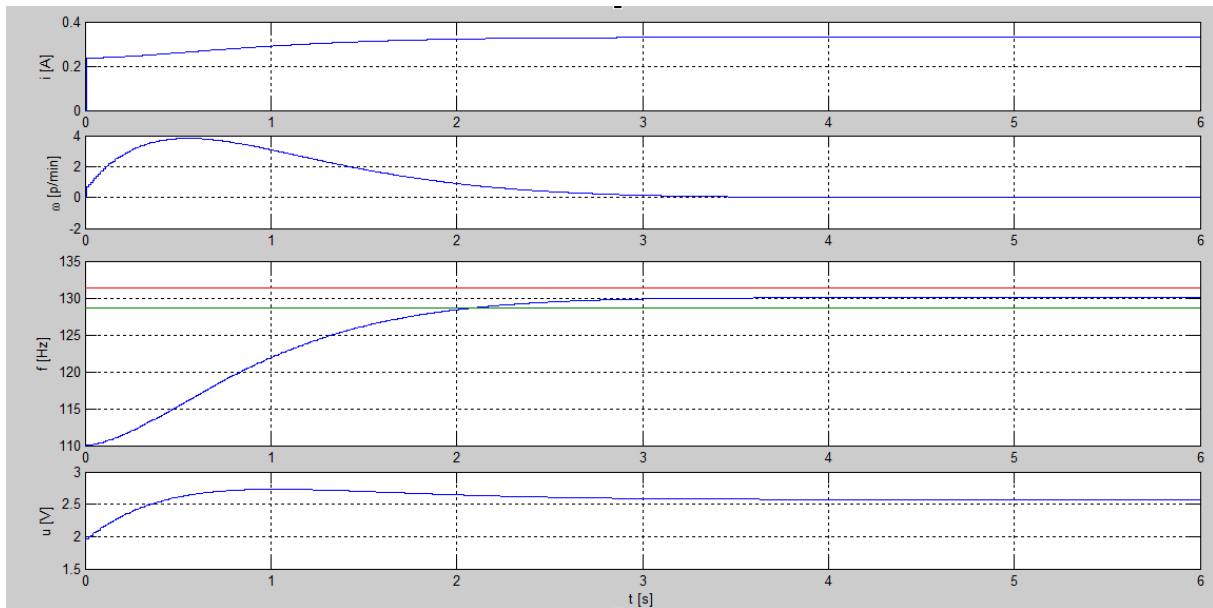
Regulaatorit häälestatakse kaalumatriksite elementide valikuga. Kaalumatriksid  $Q$  ja  $R$  on vastavalt  $n \times n$  ja  $m \times m$  matriksid, kus  $n$  on süsteemi olekute arv ja  $m$  on süsteemi sisendite arv. Oleku kaalumatriksi peadiagonaalil asuvate elementidega saab mõjutada otseselt iga oleku siiret. Lihtsuse huvides kasutataksegi esialgu ainult peadiagonaalil asuvaid elemente, ülejäänud elemendid võetakse võrdseks nulliga.

Esmane regulaatori häälestamine teostati süsteemi simuleerides koostatud matemaatilise mudeli peal. Kasutatud simulatsiooniskeem on toodud järgmisel joonisel (vt Sele 3.2).



Sele 3.2 Simulatsiooniskeem

Esmane häälestamine viidi läbi kitarril 4. keele andmeid kasutades, seadesuuruseks oli 130 Hz. Häälestamise tulemusel saavutatud siirdeprotsessid on näha järgmisel joonisel (vt Sele 3.3).



Sele 3.3 Siirdeprotsessid simulatsiooniskeemi järgi

Nagu näha, siis antud süsteem ei arvesta tiguülekande iselukustuva omadusega. Mootori mähistele rakendatakse ka pärast seadesuuruse saavutamist konstantne pinge, mille juures mootor keele tõmbejõust põhjustatud momendi mõjumise tulemusel püsib siiski paigal. Sellise juhtimise juures küll saavutatakse soovitud tulemus, kuid kulutatakse mõttetult energiat siis, kui siirdeprotsess on lõppenud. Seetõttu tuleks koostada süsteemi kohta uus mudel, mis arvestab ka tiguülekande olemasoluga.

### 3.5.6 Tiguülekande mudel

Et modelleerida tiguülekandega alalisvoolu mootorit tuleb vaadata, kuidas jaotuvad jõud tigurattal ja teol [7]. Vastavalt sellele tuleks koostada süsteemi dünaamika kohta uus diferentsiaalvõrrand:

$$\frac{d\phi}{dt} = C_I \cdot i + C_f \cdot f^2, \quad (3.18)$$

kus  $C_I$  ja  $C_f$  on võrdetegurid, mis sõltuvad järgnevatest parameetritest:

- $I_w$  – teo ja mootori võlli ning nendevahelise ühenduse inertsimoment [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ],
- $I_g$  – tiguratta ja pinguti võlli inertsimoment [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ],
- tiguülekande ülekandearv,
- $d_w, d_g$  – teo ja tiguratta läbimõõdud [m],

- $\mu$  – hõõrdetegur teo ja tiguratta vahel,
- $\lambda$  – teo keerme tõusunurk [rad],
- $\theta$  – hambumisnurk [rad],
- mootori momendi koefitsient,
- keele joontihedus,
- keele võnkuva osa pikkus
- pinguti võlli diameeter.

Keelepingutusmehhanismi puhul on täidetud tingimus

$$T \leq \frac{I_w i_{wg}}{I_g} T_L, \quad (3.19)$$

seega võrdetegurid on leitavad järgmiste valemite järgi [7]:

$$C_l = \frac{k_m}{I_w i_{wg} + K_1 I_g} \quad (3.20)$$

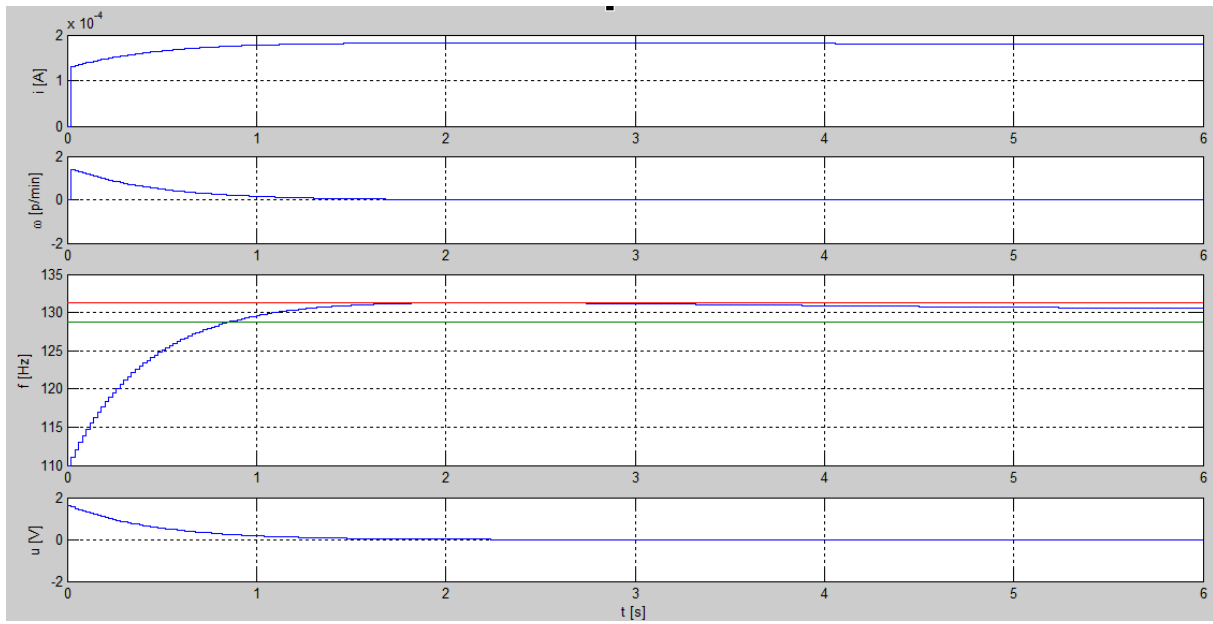
ja

$$C_f = \frac{2\rho_j l^2 d K_1}{I_w i_{wg} + K_1 I_g}, \quad (3.21)$$

kus

$$K_1 = \frac{d_w (\cos \theta \sin \lambda - \mu \cos \lambda)}{d_g (\cos \theta \cos \lambda + \mu \sin \lambda)}. \quad (3.22)$$

Antud muudatusega mudeli jaoks häälestati regulaator uuesti ning saavutatud siirdeprotsessid on näha alloleval joonisel (vt Sele 3.4). Siirdeprotsesside juures on märgata, et mudel on liiga idealistlik, sest arvutuslik tarbitav vool on alla 1 mA. Kuna aga mootori sisendpinge ning keele võnkesageduse vahel saavutati antud mudeliga loogiline seos, siis võib eeldada, et mudel on kasutatav pingutusmehhanismi juhtimiseks. Soovitud võnkesageduse (130 Hz) lähedase sageduseni jõutakse 100 hertsiliselt algsageduselt juba esimesel sekundil. Võnkesageduse siirdes esineb mõningane ülereguleerimine, kuid aja kokkuhoiu mõttes ei hakatud regulaatorit täpsemini häälestama, sest seda on reaalse katsestendi jaoks nii kui nii vaja uuesti teha. Reaalse keele pingutamisel katsestendis võiks reguleerimisaeg jääda eelduste kohaselt alla 2 sekundi.



Sele 3.4 Siirdeprotsessid tiguülekande mudeli järgi

## 4 HELIANALÜÜSI PROGRAMM

### 4.1 Heli tajumise anduri valik

Kitarri keelte võnkumist on võimalik tajuda mitmel erineval moel, näites mikrofoniga, magnetiliste helipeadega või piesoanduriga, mis on paigutatud alumise sadula alla. Piesoanduri või magnetiliste helipeade kasutamine tagaks väiksema mürataseme signaalis ning oleks vähem mõjutatud taustahälte poolt, kui mikrofoni kasutamine. Samas on katsestendi puhul kõige lihtsam ja kiirem viis heli tajumiseks just mikrofoni kasutamine – selle saab ühendada otse arvuti külge. Lisaks on mikrofoni kasutatav automaathäälestaja universaalsem, sest selle saab hõlpsasti kinnitada seadme enda külge, mitte kitarri külge ning see ei nõua ühegi anduri olemasolu kitarril.

Lisaks heli tajumisele on ka teisi võimalusi keele võnkesageduse mõõtmiseks. Näiteks mõõdavad TronicalTune'i poolt valmistatud isehäälestuvad kitarrid keele pingsust ning Axcent Tuning Systems'i poolt pakutavas lahenduses mõõdetakse pinguti võlli pöördnurka. Mõlema lahenduse puuduseks on see, et mõõdetavad suurused ei ole invariantseid keele jämeduse suhtes. Seega vajavad sellised seadmed keele jämeduse muutmisel kalibreerimist.

### 4.2 Komponentageduste arvutamine

Käesoleva bakalaureusetöö tulemusena valminud katsestendis kasutatakse heli tajumiseks mikrofoni. Mikrofonist tulenevat signaali tuleb töödelda, et leida selle komponentsageduste väärtused. Esialgu piirduakse vaid ühe keele sageduse määramisega, kuid pikemas perspektiivis oleks vaja mõõta kõigi kuue keele sagedust korraga, et oluliselt vähendada häälestusaega. Komponentageduste arvutamiseks on mitmeid meetodeid nii aja- kui ka sagedusdomeenis.

Komponentsageduste spekter leitakse, kui rakendatakse signaalile *Fourier* teisendus ehk minnakse üle sageduse domeeni. Selline lähenemine tagaks küll kõikide keelte sageduse leidmise üheaegselt, kuid nii pole võimalik saavutada vajaminevat täpsust. Lisaks täpsuse tagamisele on automaathäälestaja puhul oluline, et komponentsagedusi suudetakse määrata reaajas piisavalt lühikese reageerimisajaga. Sellistele nõuetele vastab Philip McLeodi poolt muusika analüüsimiseks väljatöötatud tarkvara Tartini, mida on sobilik kasutada ka automaathäälestajas. Tarkvara täpsus ajas muutumatu sagedusega signaalide juures on üks

tuhandik pooltooni ning kiirelt muutuvate sageduse ja amplituudiga signaal puhul jääb alla 5 sajandiku pooltooni [14]. Tarkvara kasutatakse spetsiaalselt normaliseeritud autokorrelatsiooni (SNAC) ning oktavi määramiseks modifitseeritud *cepstrum* algoritmi. Autokorrelatsiooni efektiivsemaks arvutamiseks kasutatakse kiiret *Fourier* teisendust (FFT). Järgnevalt kirjeldatakse lühidalt tarkvara olemust.

#### 4.2.1 Spetsiaalselt normaliseeritud autokorrelatsioon

Antud normaliseerimismeetodi eeliseks varasemate ees on see, et varasemad meetodid eeldasid energia ühtlast jaotust üle kogu piirkonna („akna“). Helisignaalide puhul selline eeldus ei pea kindlasti paika. SNAC on defineeritud järgmiselt:

$$n'(\tau) = \frac{2 \sum_{j=0}^{W-1-\tau} (w_j w_{j+\tau} x_j x_{j+\tau})}{\sum_{j=0}^{W-1-\tau} [w_j w_{j+\tau} (x_j^2 + x_{j+\tau}^2)]} = \frac{2r'(\tau)}{m'(\tau)}, \quad (4.1)$$

kus  $x$  – uuritav signaal,

$W$  – akna laius sample'ites,

$w$  – akna funktsioon,

$\tau$  – nihe sample'ites,

$n'$  – SNAC funktsioon,

$r'$  – normaliseerimata autokorrelatsioon,

$m'/2$  – spetsiaalne normaliseerimistegur.

SNAC definitsioonis olev nimetaja iseloomustab korrelatsiooni tegurite  $x_j$  ja  $x_{j+\tau}$  energiat. SNAC funktsiooni väärtused jäävad vahemikku  $-1 \leq n'(\tau) \leq 1$ . Kui signaali ning  $\tau$  võrra nihutatud signaali vahel ei esine korrelatsiooni, siis SNAC funktsiooni lugeja on null ja seega ka kogu funktsiooni väärtus on null. Kui vastavate signaalide vahel esineb ideaalne korrelatsiooni ehk  $x_j = x_{j+\tau}$  iga  $j$  ja  $\tau$  korral siis on SNAC funktsiooni väärtuseks 1. Viimane omadus ei ole tagatud *normalised unbiased autocorrelation* meetodil. SNAC puhul on funktsiooni väärtus kindlas seoses korrelatsiooni esinemisega, mis võimaldab usaldusväärse

piirväärtuse kasutamist. Katsesendis kasutatakse SNAC funktsiooni versiooni (WSNAC), kus tavalisele SNAC funktsioonile on lisatud akna funktsioon  $w$ , kusjuures

$$w_j = 0,5 \cdot \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi j}{W-1}\right) \right], \quad (4.2)$$

kus  $W$  – akna funktsiooni laius.

Akna funktsiooni lisamine võimaldab leida sagedusi kitsamas signaalilõigis. Sisuliselt antakse igale signaali elemendile kaal akna funktsiooni järgi. WSNAC funktsiooni puhul on normaliseerimistegur  $m'/2$  leitav ristkorrelatsioonina funktsioonide  $x \cdot w$  ja  $w$  vahel.

#### 4.2.2 Kiire *Fourier'* teisendus

*Fourier'* teisendust kasutatakse signaalide teisendamiseks aja domeenist sageduse domeeni.

*Fourier'* teisendus diskreetsel kujul leitakse järgneva summa abil:

$$X_k = \sum_{j=0}^{N-1} x_j e^{-\frac{2\pi i}{N} jk}, \quad (4.3)$$

kus  $k$  – indeks sageduse domeenis  $0 \leq k \leq N - 1$ ,

$j$  – indeks aja domeenis,

$x$  – signaal aja domeenis,

$X$  – signaal *Fourier'* sageduse domeenis,

$N$  – *Fourier'* teisenduse punktide arv.

Üldjuhul on  $X$  kompleksarvuline, kus kompleksarv kirjeldab kindla komponentsageduse faasi ja amplituudi.

Kiire *Fourier'* teisendus (FFT) põhineb teisenduse teostamiseks vajalike arvutuste mahu vähendamises teatud tulemuste korduva ärakasutamise teel või mõne spetsiaalse vaheteisenduse kasutamise teel [15]. Kiire *Fourier'* teisenduse pöördtehet nimetatakse kiireks *Fourier'* pöördteisenduseks (iFFT).

Signaalide  $v_a$  ja  $v_b$  ristkorrelatsiooni arvutamiseks *Fourier'* ehk sageduse domeenis tuleb täita järgmised sammud [14]:

- lisada signaalide ( $v_a, v_b$ ) lõppu  $p$  nulli (*zero-padding*), tüüpiliselt  $p = N/2$ ,
- leida FFT abil kujutised  $V_a$  ning  $V_b$ , kasutades  $N + p$  FFT punkti,
- korrutada omavahel iga kompleksarvu moodulid  $V_{ab}(k) = |V_a| \cdot |V_b|$ ,
- leida iFFT  $V_{ab}$ -st, mille tulemusena saadaksegi  $v_a$  ja  $v_b$  ristkorrelatsioon.

Autokorrelatsioon on ristkorrelatsiooni erijuht, kus  $v_a = v_b$ . Matalabi kood, millega realiseeritakse sageduse domeenis WSNAC funktsioon on toodud lisades (vt Lisa 2 WSNAC funktsioon).

### 4.2.3 Oktavi määramine

Kitarrikeelee võnkumisest ei teki puhas siinuslaine. Tekkinud heli sisaldab lisaks põhisagedusele ka kõrgemat järku harmoonikuid. Seetõttu võib autokorrelatsiooni tulemusena leida, et mängitav noot võib kuuluda mitmesse erinevasse oktavisse. Philip McLeodi poolt välja töötatud muusika analüüsi programm *Tartini* [14] kasutab oktavi määramiseks modifitseeritud *Cepstrum* algoritmi. Antud algoritmi kasutati esmakordselt seismiliste signaalide spektraalanalüüsiks ning võeti kiirelt ka kasutusel kõnetuvastuses.

Käesolevas bakalaureusetöös eeldatakse, et kitarrikeelte võnkesagedus ei välju määratud sagedusvahemikest, mistõttu oktavi määramine muutub oluliselt lihtsamaks. Seda asjaolu tõttu, et ühegi keele lubatud sagedusvahemik ei hõlma suuremat vahemikku kui üks oktav.

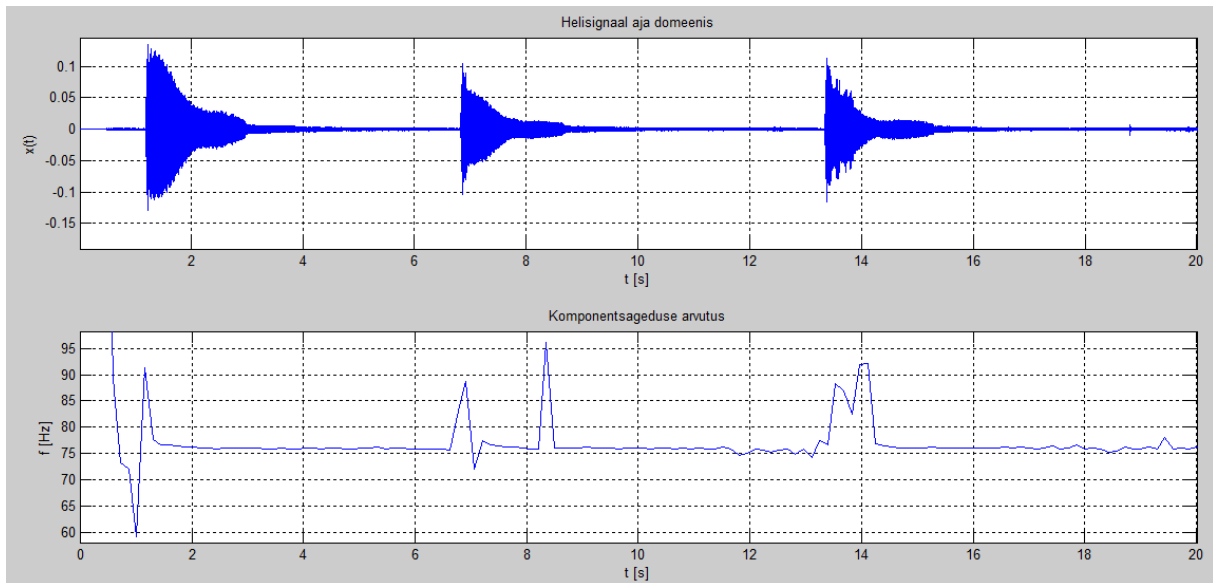
## 4.3 Helianalüüsi programmi katsetamine

Helianalüüsi programmi katsetati nii pieeso summeriga genereeritud kui ka kitarrikeele poolt tekitatud helisignaalide peal. Pieeso summeriga tekitatud heli on küllaltki siinussignaali sarnane, seega selle sageduse mõõtmine ei valmistanud bakalaureusetöö raames loodud helianalüüsi programmi jaoks raskusi. Huvitavam on vaadata kitarrikeele poolt tekitatud helisignaali analüüsi.

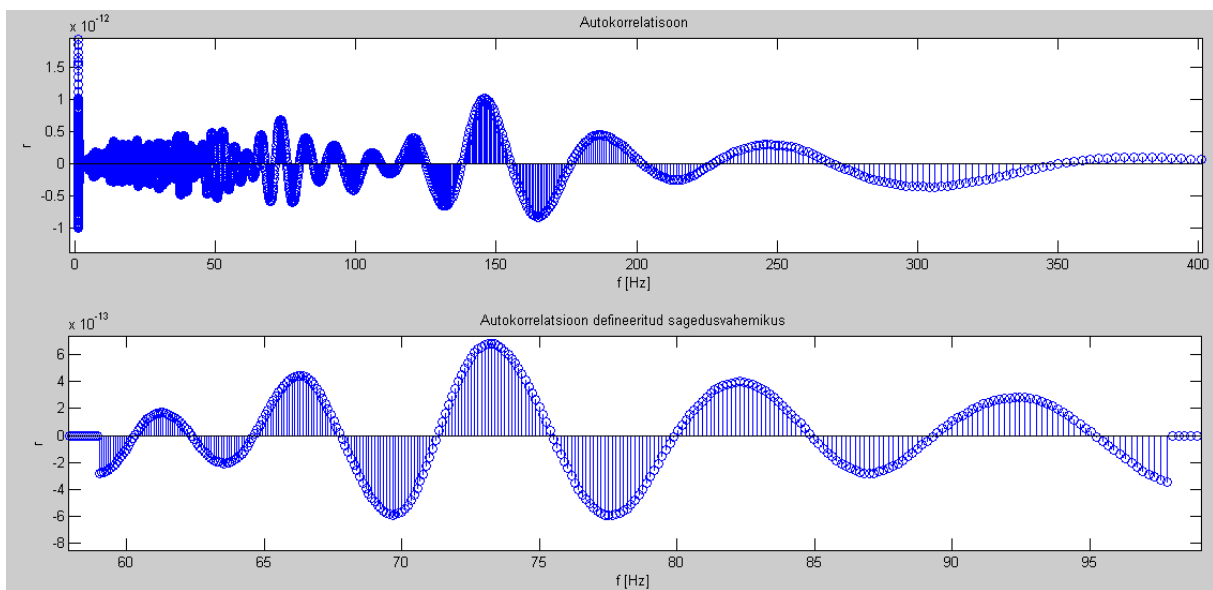
Katsetused toimusid kitarrikeele 6. keele peal, mis oli häälestatud noodile D2 (73,42 Hz). Akna funktsiooni laiuseks on 6144 mõõtepunkti ehk 0,14 s. Testsignaal koosneb kolmest



keeletõmbest. Järgnevatel joonistel on näha helianalüüsi programmi tulemused graafilisel kujul (vt Sele 4.1 ja Sele 4.2). Graafikutelt on näha, et komponentsageduste arvutamisel tekib probleeme keele tõmbamishetkel, kus tekib lühiajaline võnkumine defineeritud sagedusvahemiku piiride vahel. Sellised võnkumised tuleks arvutustulemustest välja filtreerida. Lisaks on autokorrelatsiooni graafikutelt näha, et lahtise kitarrikeelega tõmbamisel domineerib teist järku harmoonik, kuid keele jaoks defineeritud sagedusvahemikus leitakse tugevaim korrelatsiooni siiski esimese harmooniku juures.



Sele 4.1 Helisignaali komponentsageduste arvutamine WSNAC funktsiooni abil

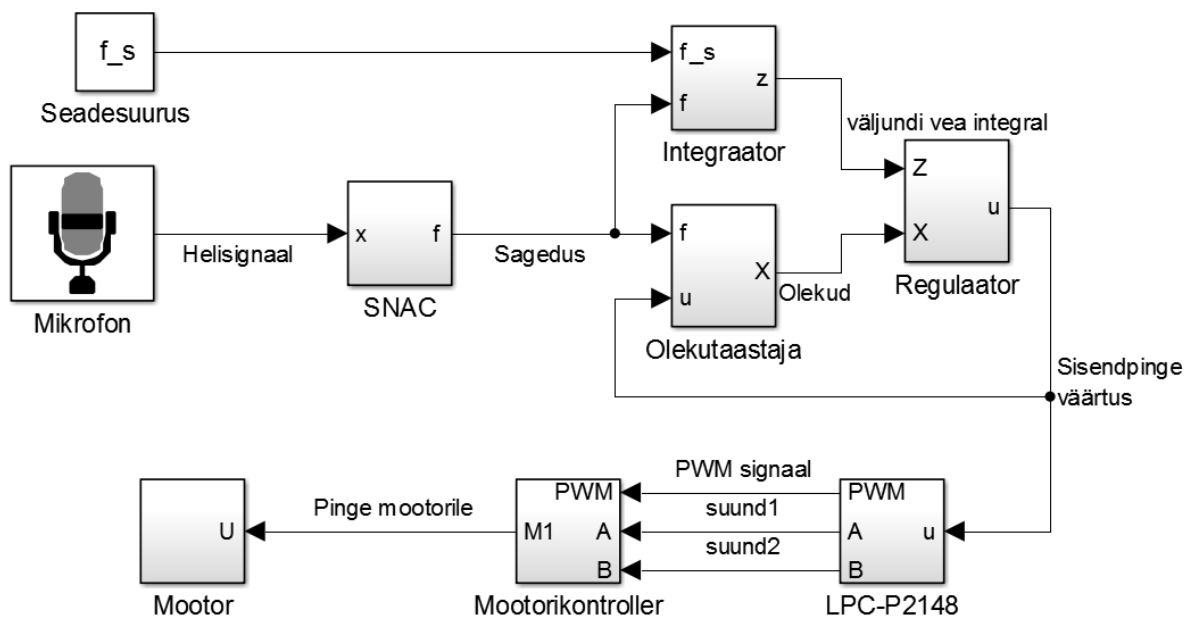


Sele 4.2 Helisignaali autokorrelatsioon

## 5 KATSESTEND

### 5.1 Plokkskeem

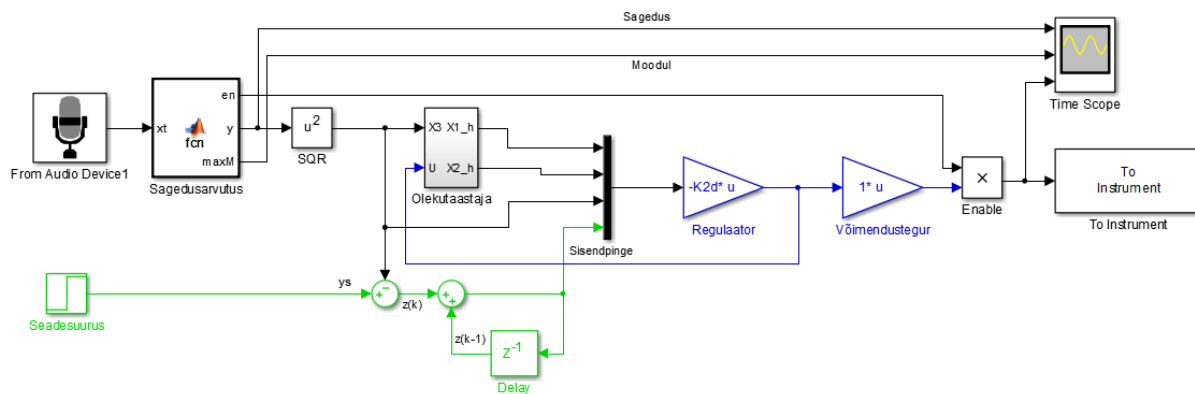
Järgnevalt on toodud põhimõtteline plokkskeem, mis näitab, kuidas mikrofoniga mõõdetud helisignaali alusel jõuab mootorini sisendpinge, mille korral toimub keele korrektne häälestamine (vt Sele 5.1). Helisignaali püüdmiseks kasutati sülearvuti sisseehitatud mikrofoni.



Sele 5.1 Katsesendi plokkskeem

### 5.2 Süsteem SIMULINK keskkonnas

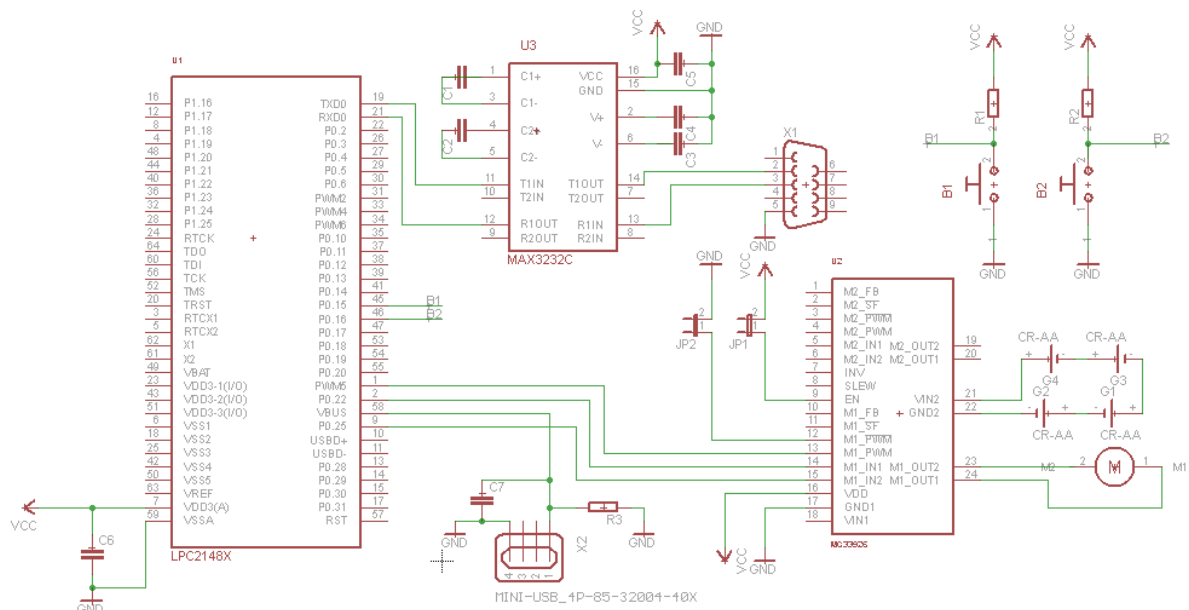
Katsesend töötab osaliselt SIMULINK keskkonnas, kus toimub helisignaalist komponentsageduse arvutamine ning olekute taastamine ning regulaatori alusel sisendi väärtuse arvutamine. Sisendpinge väärtus edastatakse virtuaalse COM pordi kaudu mikrokontrollerile. Alloleval joonisel on toodud katsesendi SIMULINK mudel (vt Sele 5.2). Rohelisega on märgitud väljundi vea integraator, sinisega regulaator ning võimendustegur. Viimase eesmärgiks on väljundpinge väärtuse teisendamine vahemikku -120 kuni 120, sest selliselt on defineeritud mikronkontrolleris PWM signaali pulsi laiuse piirid (pulsi laiuse määrab absoluutväärtus, märk näitab mootori pöörlemis-suunda).



Sele 5.2 Katsesendi SIMULINK mudel

### 5.3 Elektroonika

Katsesendis kasutatav elektroonika on küllaltki triviaalne. Arvuti on ühendatud Trendnet TU-59 USB to Serial converteri abil mikrokontrolleri arendusplaadiga. MAX3232C translaatori abil teisendatakse RS-232 jadapordist tulev signaal TTL loogikanivooga ühilduvaks signaaliks, mis omakorda läheb juba mikrokontrollerisse. Mikrokontrolleriga on ühendatud veel kaks mikrolülitit ning mootori juhtimiseks kasutatavaid väljundeid on kolm. Mikrokontrolleri väljundid on ühendatud mootorikontrolleriga, mille väljundid omakorda ühendatud juba mootori klemmidega. Katsesendi elektroonikaskeem on toodud järgneval joonisel (vt Sele 5.3). Skeemil on VCC-ga tähistatud pingeniivo 3,3 V GND suhtes. Lihtsuse mõttes on arendusplaadi elektroonikaskeemist välja toodud ainult see osa, mida realselt kasutatakse. Kogu arendusplaadi elektroonikaskeem on toodud lisades (vt Lisa 3 LPC-P2148 elektroonikaskeem).



Sele 5.3 Katsesendi elektroonikaskeem

## 5.4 Mikrokontrolleri programmeerimine

Katsesendis kasutatakse NXP arendusplaati LPC-P2148. Mikrokontrolleri valikul lähtuti sellest, et oleks piisavalt PWM ning GPIO väljundeid kuue mootori juhtimiseks. Oluliseks peeti ka JTAG ühilduvust, mis lihtsustab oluliselt programmi testimist ning vigade leidmist. Programmeerimine toimus IAR Embedded Workbench for ARM keskkonnas, programmeerimiskeeles C. Mikrokontrolleri ülesandeks katsesendis on arvutist saadetava informatsiooni vastuvõtmine ning sellele vastava laiusega PWM signaali genereerimine.

### 5.4.1 Sisendi lugemine COM pordist

COM pordist informatsiooni lugemiseks tuleb esmalt initsialiseerida UART. Selleks luuakse funktsioon `void init_UART(int baud)`. Funktsioonile antakse sisendina `baud rate` ehk väärtus, mitu bitti sekundis edastatakse. Lisaks `baud rate`’ile määratakse initsialiseerimisfunktsioonis paarsus ning andmebittide arv ühes pakettis.

Järgmisena kirjutatakse funktsioon `char readByte()`, mille abil on võimalik lugeda esimesena puhvrisse salvestatud väärtust, kui see eksisteerib. Kui puhver on tühi, siis oodatakse, kuni saabub arvutilt informatsioon. Eelnimetatud funktsioonide sisu on toodud lisades (vt Lisa 4 UART funktsioonid).

## 5.4.2 PWM signaali genereerimine

Saadud väärtusele tuleb genereerida vastava pulsi laiusega PWM signaal. Esmalt tuleb jällegi luua funktsioon initsialiseerimiseks – *void motorInit()*. Funktsioonis määratakse PWM signaali sagedus ning valitakse vastavate kontrolleri väljundviikude režiimid nii, et oleks olemas üks PWM väljund mootorile rakendatava pinge reguleerimiseks ning kaks GPIO väljundviiku mootori pöörlemissuuna määramiseks. Loendurid nullitakse ning lisaks kirjutatakse funktsioon *void start\_PWM()*, mille välja kutsumisel alustatakse loendamist.

Järgmisena kirjutatakse funktsioon *void set\_motor\_voltage2(signed char power)*. Funktsiooni kasutatakse PWM signaali pulsi laiuse muutmiseks ning mootori pöörlemissuunda määravata väljundviikude ümberlülitamiseks. Maksimaalne pulsi laius on sisendite 120 või -120 korral. Kui sisend on absoluutväärtuselt piirväärtustest suurem, siis võetakse see võrdseks piirväärtusega. Sisendi märk määrab mootori pöörlemissuuna. Eelnimetatud funktsioonide sisu on toodud lisades (vt Lisa 5 PWM funktsioonid).

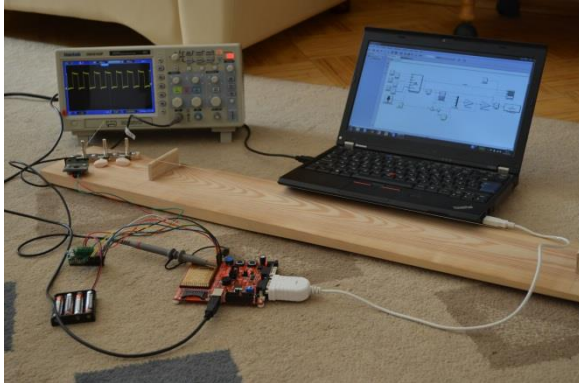
## 5.4.3 Manuaalne juhtimine nuppudest

Mootori manuaalne juhtimine on vajalik selleks, et katsetuste käigus oleks võimalik keelt eelnevalt pingutada ning ka keelte vahetamiseks. Katsestendis kasutataval arendusplaadil on olemas kaks mikrolülitit. Kontroller töötab kahes režiimis – automaatses ja manuaalses juhtimisrežiimis. Vahetamine režiimide vahel toimub mõlemale nupule samaaegselt vajutades. Kontrolleril defineeritakse muutuja, mille väärtust kontrollitakse iga tsükli alguses, et tuvastada, milles režiimis parasjagu peab olema. Manuaalses režiimis vasakule nupule vajutades hakkab mootor pöörlema vastupäeva. Kui vajutatakse uuesti vasakule nupule suureneb PWM signaali laius – mootor pöörleb kiiremini. Mootorit on võimalik seisma vajutades üks kord paremale nupule. Analoogne juhtimisloogika kehtib ka parema nupu kohta.

## 5.5 Stend

Käesoleva bakalaureusetöö tulemusena valmis katsestend ühe kitarrikeele pingutamiseks (vt Sele 5.4 ja Sele 5.5). Kuigi kõik süsteemi komponendid töötasid katsetuste käigus küllaltki hästi, ei õnnestunud süsteemi kui terviku katsetused rahuldavalt. Põhjuseks oli tõenäoliselt see, et helianalüüsiprogramm tuvastas keele võnkesageduse sõrmitsemise hetkel valesti.

Eelduste kohaselt peaks selle probleemi kõrvaldamisel katsestand ka tervikuna toimima. Kõige lihtsamaks lahenduseks oleks sõrmitsemise hetkel leitud võnkesageduse eiramine. Seega on süsteemi eeldatavasti võimalik kasutada isehäälestuva kitarri loomisel.



Sele 5.4 Katsestand



Sele 5.5 Motoriseeritud keelepingsutusmehhanism

Käesoleva töö raames hinnati ka stendi maksumust. Erinevalt realselt valmis ehitatud stendist arvestati maksumuse hindamisel kuue pingsutusmehhanismiga, mis annab parema ettekujutuse lõpliku toote omahinnast. Siinkohal tuleks märkida, et realsel tootel ei ole vaja kasutada mõningaid kalleid komponente (mikrokontrolleri arendusplaat, *USB to serial converter*), mida kasutati katsestandis. Samuti väheneb oluliselt toote omahind, kui komponente ostetakse hulgimüüjatelt. Katsestandi maksumuse hinnang on toodud allolevas tabelis (vt Tabel 5.1).

Tabel 5.1 Katsestandi maksumus

Komponent	Ühiku hind	Kogus	Kokku
Mootor	12,00 €	6	72,00 €
Mikrokontroller	55,95 €	1	55,95 €
Mootorikontroller	34,20 €	3	102,60 €
Pingutid	10,90 €	1	10,90 €
<i>USB to serial converter</i>	9,60 €	1	9,60 €
Juhtmed, pistikud	3,00 €	1	3,00 €
Muu mehaanika	10,00 €	1	10,00 €
<b>Kokku</b>			<b>264,05 €</b>

## **6 SÜSTEEMI INTEGREERIMINE AKUSTILISE KITARRIGA**

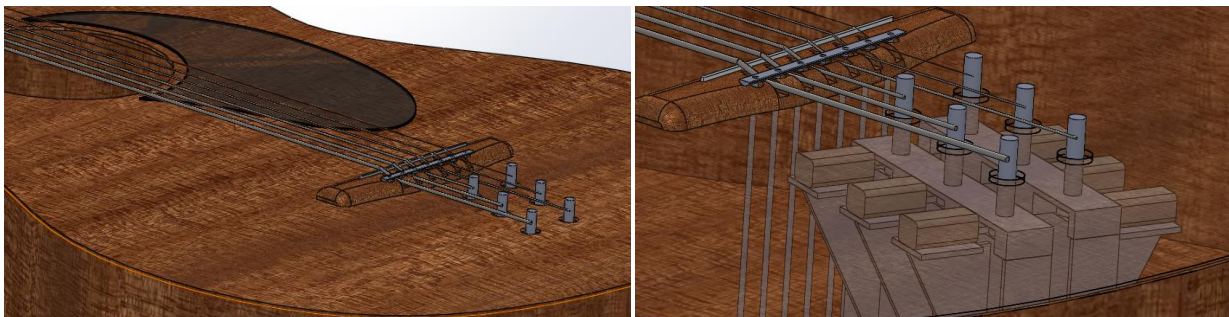
Käesolevas peatükis pakutakse kontseptsiooni tasemel välja üks võimalikest automaathäälestuse süsteemi integreerimisvõimalustest akustilise kitarriga ning käsitletakse sellega kaasnevaid probleeme.

Motoriseeritud keelepingsusmehhanismi paigutamiseks akustilise kitarrile on kaks võimalust: kitarriga pea külge ning kõlakasti külge. Olenevalt paigutusest kaasnevad erinevad probleemid. Kinnitades pingsusmehhanismi kitarriga pea külge tekivad probleemid heli sageduse mõõtmisega, massijaotusega ning dimensioonide piirangutega. Pingsusmehhanismi kõlakasti külge kinnitamisel on kitsaskohtadeks kõlakasti tugevus, pilli kõla mõjutamine ning pingsusmehhanismi massi piirangud.

Lisaks eelpool nimetatud probleemidele tuleb implementeerida helianalüüsi programm ning regulaator mikrokontrolleris. Komponentisageduste arvutamine reaajas nõuab suurt mälu mahtu ning kõrget protsessori taktsagedust.

### **6.1 Väljapakutud integreerimislahenduse kontseptsioon**

Väljapakutavas lahenduses on keelepingsusmehhanism paigutatud kitarriga kõlakasti alumise plaadi ja karkassi külge. Sellise paigutuse valikul on mitu põhjust. Kõlakasti pool on keelte poolt tekitatud heli valjus suurem, seega on lihtsam mõõta heli komponentsagedusi. Kuna massijaotuse pärast ei ole vaja muretseda, siis saab kasutada suuremaid mootoreid, mis võimaldavad pingutada ka jämedamaid keeli. Lisaks on keeli kõlakasti poolt pingutades võimalik pilli häälestada, kui kasutatakse kapot. Uudne lahendus pakuks mõningaid eeliseid olemasolevate isehäälestuvate kitarride ees, kuid samas on sellel ka probleeme, mida tuleb lahendada. Pingsusmehhanismi paigutus kitarril on toodud allolevatel seledel (vt Sele 6.1 ja Sele 6.2).



Sele 6.1 pingutusmehhanismi paigutus akustilisel kitarril

Sele 6.2 pingutusmehhanism akustilisel kitarril läbipaistva kõlalauaga

Järgnevalt käsitletakse põgusalt integreerimislahendusega kaasnevaid probleeme.

### 6.1.1 Pilli kõla mõjutamine

Kitarrikelte võnkumine muudetakse õhu võnkumiseks ning seda võimendatakse kõlalaua ning kõlakastis oleva õhu abil [16]. Enamus võimendusest toimub kõlalaua abil, milleks akustilise kitarril puhul on kõlakasti ülemine plaat. Kõlakastis oleva õhu resonantssagedusvahemik on tüüpiliselt 110 Hz ümbruses seega kõlakasti sees võimendatakse põhilisel madalama sagedusega heli. Kõlakasti seinad tehakse tavaliselt lainelise kujuga, sest paralleelsete seinte puhul tekiks mingi kindla sagedusega heli liigne resoneerimine, mida üritatakse vältida.

Sellest lähtuvalt paigutataksegi pingutusmehhanism just kõlakasti alumise plaadi külge, mis heli võimendamises eriti ei osale. Kõlakasti alumise plaadi võnkumine on ka summutatud pillimängija enda poolt. Kõlakasti ülemisele plaadile tuleb puurida mõningad avad, kuid muidu jääb see puutumatuks. Kõlakasti sisse jäävad detailid tuleb projekteerida nii, et nende vahelt saaks õhk võimalikult vabalt liikuda. Kindlasti vähendab selline pingutusmehhanismi paigutus madalamate sagedustega helide valjust. Selle mõju ulatust käesolevas bakalaureusetöös ei uurita ning eeldatakse, et see on võimalik viia kriitilisest madalamale tasemele.

### 6.1.2 Detailide materjalid ja liited

Kuna keelte võnkumine põhjustab kogu kitarril kehas vibratsioone, siis tuleb sellega arvestada liidete valikul. Kindlasti ei saa kasutada tavalisi polt-mutter liiteid, sest need võivad



vibratsiooni tulemusena lahti tulla ning mittesoovitavat heli tekitada. Pingutusmehhanismi kinnitamisel kitarril kõlakasti külge tuleks võimaluse kasutada „pillimeistrite võtteid“. Tuleks kasutada selliseid materjale, mida on lihtne liimides kinnitada puidu külge. Samuti tuleks võimaluse korral ära kasutada keelte pingutusjõudu, millega surutakse pingutusmehhanism vastu kõlakasti.

### 6.1.3 Kõlakasti tugevus

Akustilise kitarril kõlakast valmistatakse võimalikult kergest, kuid tugevast puidust. Kõlalaud valmistatakse tüüpiliselt kuusest ja põhi, seinad ning tugevust andev karkass väärspuidust (nt mahagonist). Pingutusmehhanism tuleks paigutada nii, et see toetuks kõlakasti alumise karkassi talade peale. Kuiva mahagoni paindetugevus on 60 MPa [17]. Pingutusmehhanismile mõjub kõikide keelte maksimaalsete pingsuste juures jõud 1460 N, mis rakendub kinnituskohast 13 cm kaugusel. Seega mõjub kinnituskohale moment  $M$

$$M = 1460 \cdot 0,13 = 190 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Lihtsuse mõttes eeldatakse, et pingutusmehhanism on kinnitatud ainult kahelt poolt karkassi külge. Karkassitaladele mõjuv jõud leitakse momendi asendamisel jõupaariga, kusjuures jõudude rakenduspunktid asuvad talade paiknemiskohas. Karkassitalade vahekaugus  $l_t$  on 13 cm seega kummalegi talale mõjub põikjõud

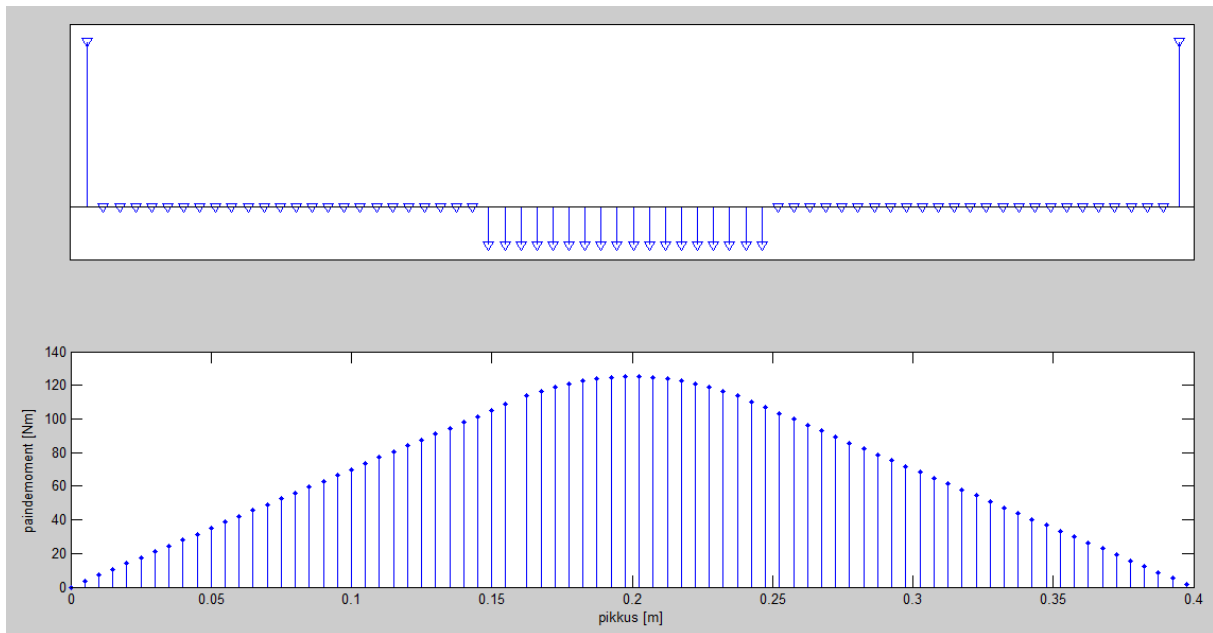
$$F_p = \frac{M}{l_t} = \frac{190}{0,13} = 1460 \text{ N.} \quad (6.1)$$

Põikjõud on taladel ühtlaselt jaotunud 85 mm laiusele alale. Tala pikkus  $L_t = 40$  cm, laius  $b_t = 1$  cm ning kõrgus  $h_t = 3$  cm. Tala tugevusmoment  $W_t$  on leitav järgmise valemiga

$$W_t = \frac{b_t h_t^2}{6}. \quad (6.2)$$

$$W_t = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3.$$

Järgnevalt leitakse tala paindemomendi epüür (vt Sele 6.3) ning maksimaalsele paindemomendile vastav paindepinge.



Sele 6.3 Kõlakasti talale mõjuva paindemomendi epüür

Talale maksimaalselt mõjuv paindemoment  $M_t = 125,1 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Sellele vastab maksimaalne paindepinge  $\sigma_{max}$

$$\sigma_{max} = \frac{M_t}{W_t} = \frac{125,1}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 83,4 \text{ MPa.} \quad (6.3)$$

Leitud paindepinge ületab küll tala paindetugevuse, kuid arvutustes tehti lihtsustus, et pingutusmehhanism on kinnitatud ainult talade külge. Tegelikult toetub pingutusmehhanism ka kõlakasti põhja külge, mis suurendab konstruktsiooni tugevust. Tugevuse tagamiseks tuleb lihtsalt leida vajaminev ülekate pingutusmehhanismi ja kõlakasti põhja vahel või lisada tugevust suurendavaid konstruktsioonelemente.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö raames loodi automaathäälestuse süsteem ning katsestend süsteemi testimiseks. Loodud motoriseeritud pingutusmehhanismi kohta koostati matemaatiline mudel, mille abil toimub süsteemi juhtimine. Samuti simuleeriti matemaatilise mudeli peal regulaatori tööd süsteemi juhtimisel. Esimeses lähenduses jäeti arvestamata kasutatava tiguülekande omapärasid, kuid katsetuste käigus selgus, et selliselt süsteemi juhtimine ei ole otstarbekas, mistõttu modelleeriti ka tiguülekanne.

Helianalüüsiprogrammis kasutati komponentsageduste leidmiseks WSNAC funktsiooni, mille täpsuseks funktsiooni looja andmetel on kuni üks tuhandik pooltooni. Iga keele jaoks defineeritakse sagedusvahemikud, mille abil välditakse kõrgemate harmoonikute mõju komponentsageduste arvutamisel. Helianalüüsi programmi testimisel reaalse kitarrikeele poolt tekitatud helisignaaliga saavutati rahuldavad tulemused.

Motoriseeritud keelepingsutusmehhanismi projekteerimisel arvestati kõigi isehäälestuvale kitarrile esitatud nõuete ning piirangutega. Mootori valikul lähtuti sellest, et iga keele sagedusvahemiku piirväärtused oleksid saavutatavad ka kõige jämedamaid kättesaadaval olevaid keeli kasutades. Valituks osutus ITTGroupi poolt pakutav harjadega alalisvoolu mootor redukoriga, millele lisati täiendava reduktorina tiguülekanne. Mootori juhtimiseks valiti mootorikontroller Parallax MC33926.

Pingutusmehhanismi täpselt juhtimiseks kasutati süsteemi kohta loodud matemaatilist mudelit olekutaastaja näol. Vajamineva täpsuse saavutamiseks kasutatakse lisaks olekutagasisidele integraalset tagasisidet keele võnkesageduse järgi. Regulaator sünteesiti kasutades optimaaljuhtimist. Matemaatilise mudeli peal tehtud katsetuste alusel hinnati reaalse süsteemi reguleerimisajaks ligikaudu kaks sekundit.

Bakalaureusetöö raames valminud katsestendis realiseeriti helianalüüsi programm ning regulaator personaalarvutis, milleks kasutati autori sülearvutit. Heli tajumise andurina kasutati sülearvuti sisseehitatud mikrofoni. Personaalarvutist edastati regulaatori väljundiks olev mootori sisendpinge väärtus virtuaalse COM pordi abil mikrokontrollerile, millega genereeriti vastava pulsi laiusega PWM signaal. Katsestendis kinnitati kitarril keel ja motoriseeritud

pingutusmehhanism puidust laua külge, kusjuures piirduti vaid ühe keele ning pingutusmehhanismiga.

Põgusalt käsitleti ka automaathäälestuse süsteemi integreerimist akustilise kitarriga ning sellega kaasnevaid probleeme. Suurimaks probleemiks osutus kõlakasti tugevus, sest lihtsustatud mehhanismi kinnitusviisi eeldades leiti, et kõlakasti karkassi tugevus ei ole piisav. Siiski on põhjust arvata, et parema kinnitusviisi valiku ning tugevust lisavate konstruktsioonelementide kasutamisega suudetakse tagada kõlakasti tugevuse piisavus.

Läbiviidud katsete ning arvutuste tulemusena näidati, et süsteemis kasutatavad komponendid töötavad korrektselt. Mõningaid probleeme tekkis helianalüüsiprogrammiga keele sõrmitsemise hetkel. Töö tulemusena leiti, et süsteemi osade, eelkõige helianalüüsiprogrammi, täiendaval arendamisel on käesolevas bakalaureusetöös loodud süsteemi võimalik kasutada isehäälestuva akustilise kitarriloomisel.

## SUMMARY

In this bachelor's thesis an automatic tuning system was created along with a test unit for experiments. A mathematical model, which describes the motorised tensioner, was created to control the system. At first the characteristics of a worm-gear was omitted, but during the first experiments it was found that this lead to impractical controlling of the system. So the worm-gear system was also modelled.

In the program for sound analysis a WNSAC function was used to determine the component frequencies of the signal. The accuracy of this function according to the author is up to one thousandth of a semitone. For each string a corresponding frequency range was defined to avoid the higher harmonics to influence the calculation of the component frequencies. When testing the sound analysis program satisfying results were achieved.

All demands and constraints were taken into account while designing the motorised tensioner. The motor was chosen so that the bounds of the defined frequency ranges would be achievable even when using the thickest strings available. The chosen motor was bought from ITTGroup and an additional worm-gear redactor was used. A Parallax MC33926 motor controller was used to control the motor.

For accurate control of the motorised tensioner a mathematical model of the system was used. In addition to the full state feedback an integral feedback was used. The regulator was calculated using optimal control. According to the simulations done on the mathematical model the regulation time was estimated to be about two seconds.

In the test unit the sound analysis system and regulator were implemented on a PC. For sound detection an internal microphone was used. The calculated input voltage for the motor was transmitted to the microcontroller via virtual COM port. With this information a PWM signal was generated with a corresponding pulse width. In the test unit a guitar string and the motorised tensioner were attached to a wooden base.

The problems with integration of the automatic tuning system with an acoustic guitar were also briefly covered. The biggest problem turned out to be the strength of the guitar body. With a simplified attachment it was shown that the guitar body is not strong enough.

Nevertheless there is reason to believe that with some extra parts to increase the strength and a little stronger attachment to the guitar body it is possible to guarantee the strength of the guitar body.

It was shown through tests and calculations that the components of the automatic tuning system are working correctly even though there were some problems with the sound analysis program. As a result of this thesis it was shown that with some further development the developed automatic tuning system could be used in the development of a self-tuning acoustic guitar.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] „Axcent,“ [Võrgumaterjal]. <http://axcenttuning.com/technology.html>. [Kasutatud 16 märts 2014].
- [2] „TronicalTune,“ [Võrgumaterjal]. <http://www.tronical.com/>. [Kasutatud 16 märts 2014].
- [3] „Antares,“ [Võrgumaterjal]. <http://www.antarestech.com/>. [Kasutatud 16 märts 2014].
- [4] B. Lee. [Võrgumaterjal]. <http://guitar-tuner-review.toptenreviews.com/>. [Kasutatud 22 aprill 2014].
- [5] [Võrgumaterjal].  
[http://www.daddario.com/DADProductDetail.Page?ActiveID=3769&productid=78&productname=EJ18\\_Phosphor\\_Bronze\\_\\_Heavy\\_\\_14\\_59](http://www.daddario.com/DADProductDetail.Page?ActiveID=3769&productid=78&productname=EJ18_Phosphor_Bronze__Heavy__14_59). [Kasutatud 14 aprill 2014].
- [6] [Võrgumaterjal]. [http://daddario.com/upload/tension\\_chart\\_13934.pdf](http://daddario.com/upload/tension_chart_13934.pdf). [Kasutatud 14 aprill 2014].
- [7] T.-J. Yeh, „Modeling and robust control of worm-gear driven systems,“ *Simulation Modelling Practice and Theory*, nr 17, pp. 767-777, 2009.
- [8] „ITT GROUP,“ [Võrgumaterjal]. <http://www.ittgroup.ee>. [Kasutatud 19 märts 2014].
- [9] [Võrgumaterjal]. [https://www.elfa.se/elfa3~ee\\_et/elfa/init.do?item=73-347-47&toc=0&q=dual+motor+drive](https://www.elfa.se/elfa3~ee_et/elfa/init.do?item=73-347-47&toc=0&q=dual+motor+drive). [Kasutatud 29 märts 2014].
- [10] [Võrgumaterjal]. <http://ittgroup.ee/et/e-shop/detail/3-draiverid/flypage%7Cask/237-mootori-draiver-tb6612fng?sef=hcfp>. [Kasutatud 29 märts 2014].
- [11] „Mathworks,“ [Võrgumaterjal].  
<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorPosition&section=System>

- mModeling. [Kasutatud 12 aprill 2014].
- [12] A. Rähni. [Võrgumaterjal]. [http://www.dcc.ttu.ee/LAS/ISS0021/2013/AJS\\_2009.pdf](http://www.dcc.ttu.ee/LAS/ISS0021/2013/AJS_2009.pdf). [Kasutatud 20 märts 2014].
- [13] „Süsteemiteooria põhimõistete seletusi,“ [Võrgumaterjal]. <http://www.dcc.ttu.ee/LAS/SILTERM.html#j>. [Kasutatud 18 aprill 2014].
- [14] P. McLeod, „Fast, Accurate Pitch detection Tools for Music Analysis,“ 30 mai 2008. [Võrgumaterjal]. [http://miracle.otago.ac.nz/tartini/papers/Philip\\_McLeod\\_PhD.pdf](http://miracle.otago.ac.nz/tartini/papers/Philip_McLeod_PhD.pdf). [Kasutatud 19 aprill 2014].
- [15] T. Parve. [Võrgumaterjal]. <http://www.elin.ttu.ee/~parveto/EthnLing/TechVoca/F/Fourier.htm>. [Kasutatud 20 aprill 2014].
- [16] [Võrgumaterjal]. <http://www.phys.unsw.edu.au/music/guitar/guitarintro.html#body>. [Kasutatud 29 aprill 2014].
- [17] „Matweb,“ [Võrgumaterjal]. <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8188e7e1f11b4deb9fd67fe18d83e272&ckck=1>. [Kasutatud 1 mai 2014].



## LISAD

### Lisa 1 Optimaaljuhtimine ja olekutaastaja

```
%%%%%%%%%%
%% OPTImAALJUHTIMINE %%
%%%%%%%%%%
    q11 = 0/(i_max^2);
    q22 = 0.1/(w_max^2);
    q33 = 1/(f2^2);
    q44 = 0.00000000000001;

    r11 = 1/(u_max^2);

    Q = diag([q11 q22 q33]);    %oleku kaalumaatriks
    Q2 = diag([q11 q22 q33 q44]);
    R = r11;    %sisendi kaalumaatriks

    K = lqr(A, B, Q, R);
    Kd = dlqr(Ad, Bd, Q, R);
    K2d = dlqr(A2d, B2d, Q2, R)

%%%%%%%%%%
%% OMAVÄÄRTUSTE ARVUTAMINE %%
%%%%%%%%%%
    sys = ss(A, -B*K, C, 0);
    P = pole(sys);

    sysd = ss(Ad, -Bd*Kd, C, 0);
    Pd = pole(sysd);

    sys2d = ss(A2d, -B2d*K2d, [C 0], 0);
    P2d = pole(sys2d)
%%%%%%%%%%
%% OLEKUTAASTAJA1 %%
%%%%%%%%%%
    C2 = [0 0 1];
    Zot = Pd*0.9;
    Ld = place(Ad', C2', Zot)';
    CX = [1 0 0; 0 1 0];
```

## Lisa 2 WSNAC funktsoon

```
function [y,en] = WSNAC(w, W, nFFT, fSampling, fAxis,
nWindow, xt)
assert (nWindow <=1024*32);
assert (nFFT <= 1024*32);
assert (length(xt) <= nWindow);
assert (length(w) <= nWindow);
assert (length(W) <= nFFT);

xw = xt.*w;
XW = fft(xw, nFFT);
XWW = (1/(fSampling*nFFT)).*abs(XW(1:1024)).*abs(W);
m = ifft(XWW, nFFT);
X = fft(xt, nFFT);
psdx = (1/(fSampling*nFFT)).*abs(X(1:1024)).^2;
r = ifft(psdx, nFFT);
n = 2.*r./m;
for i = 1:length(n)
    if(fAxis(i) < 59 || fAxis(i) > 135)
        n(i) = 0;
    end
end

[maxM, maksimumid] = max(n);
maxF = fAxis(maksimumid);
if(maxM == 0)
    en = 0;
    y = 0;
else
    en = 1;
    y = maxF;
end
```



## Lisa 4 UART funktsioonid

```
void feed (void)
{
    PLLFEED=0xAA;
    PLLFEED=0x55;
}
signed char readByte()
{
    while(!(U0LSR & 0x01));
    return (U0RBR);
}
void initUart(int baud)
{
    PLLCON_bit.PLLC = PLLCON_bit.PLLE = 0; // Disable and disconnect PLL
    feed(); // PLL feed sequence
    VPBDIV_bit.VPBDIV = 1;

    PINSEL0 = 5;
    U0FCR = 1; // Enable FIFOs whether used or not
    SetBit(U0LCR,DIVISOR_LATCH_SET_bit); // U1LCR = 0X80-enable access to divisor
    // latch bit, necessary for setting baud rate
    U0LCR |= EIGHT_BIT_CHARS; // Eight bits U1LCR = 0X83
    ClrBit(U0LCR,PARITY_ENABLE_bit); // No parity
    ClrBit(U0LCR,STOP_BIT_SELECT_bit); // One stop bit
    //configure baud rate
    U0DLL = XTALFREQ / (baud * 16);
    U0DLM = (XTALFREQ / (baud * 16)) >> 8;

    ClrBit(U0LCR,DIVISOR_LATCH_SET_bit); // Disable access to divisor latch
}
```

## Lisa 5 PWM funktsioonid

```
void motorInit()
{
    PINSEL1_bit.P0_21 = 1;    // set P0.21 as PWM
    PWMPR = 0x00000000;    // Load prescaler
    PWMPCR_bit.ENA5 = 1;    // enable PWM5 output
    PWMMCR_bit.MR0INT = 1;  // interrupt on match 0
    PWMMCR_bit.MR0RES = 1;  // reset on match 0
    PWMMCR_bit.MR5INT = 1;  // interrupt on match 5

    PWMMR0 = XTALFREQ/F_PWM; // set cycle to 1/F_PWM s
    PWMLER_bit.EM0L = 1;    //shadow latch for match 1
    PWMTCR = 0x00000002;    // Reset counter and prescaler
    PINSEL1_bit.P0_22 = 0;  // set P0.22 as GPIO
    PINSEL1_bit.P0_25 = 0;  // set P0.25 as GPIO
    IO0DIR_bit.P0_25 = 1;   // set P0.25 as output
    IO0DIR_bit.P0_22 = 1;   // set P0.22 as output
}

void start_PWM()
{
    PWMTCR = 0x00000009;    // release counter from reset
}

void restart_PWM()
{
    PWMTCR = 0x00000002;    // Reset counter and prescaler
    PWMTCR = 0x00000009;    // release counter from reset
}
```

```

//PWM5
void set_motor_voltage5(signed char power)
{

    if(power < 0)
    {
        IO0CLR_bit.P0_25 = 1;
        IO0SET_bit.P0_22 = 1;
        power = -power;
    }
    else
    {
        IO0CLR_bit.P0_22 = 1;
        IO0SET_bit.P0_25 = 1;
    }
    if(power >=MAX_POWER)
        power = MAX_POWER;
    PWMMR5 = (power*XTALFREQ)/(MAX_POWER*F_PWM);
    PWMLER |=0x20;
}

```