

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Elektrotehnika instituut

AAR70LT

Ardi Viires

KEELPILLI AUTOMAATHÄÄLESTUS SERVOMOOTORIGA

Magistritöö

Instituudi direktor prof. Tõnu Lehtla

Juhendaja dotsent Madis Lehtla

Lõpetaja Ardi Viires

Tallinn 2015

AUTORIDEKLARATSIOON

Kinnitan, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Varem ei ole selle alusel kutse- ega teaduskraadi ega inseneridiplomit taotletud. Töö on koostatud litsentseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 02.02.2015

..... Ardi Viires

AAR70LT

Keelpilli automaathäälestus servomootoriga

Ardi Viires, üliõpilaskood 132724AAAMM, mai 2015. – 92 lk.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Energeetikateaduskond

Elektrotehnika instituut

Robotitehnika õppetool

Töö juhendaja: dotsent Madis Lehtla

Võtmesõnad: elektriajam, servomootor, automaatregulaator, automaathäälestus, signaalitöötlus, sagedusspekter, kitarr, helisignaali, helivõimendi, tarkvara, elektroonikadisain, digitaaltehnika

Referaat:

Lõputöö on 92 lehel, sisaldab 8 tabelit, 20 illustratsiooni ja 52 joonist.

Käesoleva lõputöö eesmärk on koostada arendusplaat ja programm keeles C++ kitarrikeelte põhivõnkesageduste tuvastamiseks helipea vahendusel ja pillikeelte automaatseks häälestamiseks servomootoriga.

Lõputöö seletuskiri on jagatud üheksaks peatükiks, mille esimestes peatükkides keskendutakse juhtimisobjekti (muusikainstrumendi) helipeadele ning analüüsitakse ostsiloskoobiga standardhäälestuses oleva kitarrilise helisignaali.

Vastavalt muusikainstrumendi helisignaali omapärale on koostatud analoogsignaali võimendusahel, mis võimendab helisignaali mikrokontrollerplaadi analoogsisendile sobivasse pingevahemikku (0...5) V. Süsteemi esimene osa tuvastab helisignaali põhivõnkesageduse ja visualiseerib saadud tulemuse kasutajale valgusdiodindikaatorite ja vedelkristallkuvari abil.

Süsteemi teine osa juhib pulsilaiusmodulatsiooni abil kitarrilise häälestavat servomootorit. Selleks otstarbeks kasutatakse täiendavat mikrokontrollerplaati, mille ülesanne on servoajami juhtimine vastavalt esimese mikrokontrollerplaadi juhtisignaale.

Häälestusprotsessi edasiarendamise lihtsustamiseks on projekteeritud ja koostatud

häälestusstend milles on lihtne ja mugav ligipääs kõigile süsteemi komponentidele.

Lõputöö tulemuseks on kavandatud ja valmistatud automaathäälestussüsteem, mis aitab vähendada kitarril häälestamiseks kuluvat aega nii algajatel kui kogunud muusikutel.

AAR70LT

Автоматическая настройка струнного инструмента с использованием сервопривода

Арди Вийрес, код студента 132724AAАММ, май 2015. – 92 стр.

ТАЛЛИННСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет энергетики

Институт электротехники

Кафедра робототехники

Руководитель работы: доцент Мадис Лехтла

Ключевые слова: электропривод, сервопривод, автоматический регулятор, автоматизированная настройка, обработка сигналов, частотный спектр, гитара, звуковой сигнал, звуковой усилитель, программное обеспечение, дизайн электроники, цифровая электроника

Реферат:

Дипломная работа состоит из 92 страницы, содержит 8 таблиц, 20 иллюстраций и 52 изображения.

Целью данной дипломной работы является составление специального программного кода на языке C++ для макетной платы, которая позволяет идентифицировать основные частоты гитарной струны через звукосниматель и затем звук струны автоматически настраивается с помощью сервопривода.

Пояснительная записка дипломной работы разделена на девять глав, из которых в первых главах особо заострено внимание на звукоснимателе инструмента и так же анализируются с помощью осциллоскопа аудиосигналы на стандартно настроенной гитаре.

Согласно особенностям звуковых сигналов инструмента, собрана цепь аналогового

усилителя, которая усиливает звуковой сигнал в требуемом диапазоне напряжения (0...5 В) для макетной платы, с использованием программного кода C++. В этот момент, одна из двух используемых макетных плат обнаруживает основную частоту звукового сигнала, а также пользователю демонстрируется полученный результат с помощью светодиодов и жидкокристаллического дисплея.

Для того, чтобы без перебоев управлять сервоприводом с использованием широтно-импульсной модуляции, в процессе настройки гитары используется дополнительная макетная плата, которая применяет сервоприводы для работы в соответствии с полученными сигналами управления с первой макетной платы.

Для упрощения разработки процесса настройки спроектирован и собран подходящий для этих целей наладочный стенд, который включает в себя все участвующие компоненты системы и обеспечивает быстрый доступ для решения разного рода проблем.

Результатом дипломной работы является работоспособная система настройки, которая уменьшает время настройки гитары даже для неопытных музыкантов.

AAR70LT

String instrument automated tuning with servomotor

Ardi Viires, student code 132724AAAMM, May 2015. – 92 pages

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Power Engineering

Department of Electrical Engineering

Chair of Robotics

Tutor of the work: assistant Madis Lehtla

Key words: electrical drive, servo motor, automatic regulator, automated tuning, signal processing, frequency spectrum, guitar, audio signal, sound amplifier, software, design of the electronics, digital electronics

Summary:

Final thesis consists of 92 pages, 8 tables, 20 illustrations and 52 graphics.

The aim of the current thesis is to draw up a development board and C++ code which allows to establish fundamental frequencies of guitar strings through the guitar pickup and tunes up those strings automatically with servo motor.

Explanatory memorandum of the final thesis is divided into nine chapters, where in first chapters there is focused specifically on instrument pickups and where standard tuned guitar audio signals are analyzed with oscilloscope.

Analog signal amplifier circuit is drawn up in accordance with instrument audio signals singularity, which amplifies sound signal in proper voltage range (0...5 V) for the development board including C++ code. At this point the first part of the system detects fundamental frequency of the audio signal as well as visualizes obtained result to user with light-emitting diodes and liquid-crystal display.

The second part of the system manages a servo motor seamlessly with pulse-width modulation into guitar tuning process. For this reason there has been introduced an additional development board, which puts a servo motor into operation according to the first development board control signals.

With a view to simplify development of the tuning process there has been designed and composed a proper tuning stand for it, which allows a quick access to all components taking part of the system them while solving the problems.

The result of the final thesis is designed and prepared automated tuning system, which allows to tune the guitar with reduced time expenditure even for experienced musician.

SISUKORD

Magistritöö ülesanne	10
2. Sissejuhatus.....	11
2.1. Teema valik.....	11
3. Muusikainstrument	13
3.1. Akustiline kitarr	14
3.2. Elektrikitarr.....	15
3.3. Helipeade võrdlus	17
3.4. Katsealune pill	18
4. Võnkesagedused	21
4.1. Instrumendi häälestus	21
4.2. Pillikeelte võnkesageduse mõõtmine ostsilloskoobiga.....	23
4.3. Järeldused mõõtmistulemuste põhjal.....	39
5. Elektrisignaali töötlus	40
5.1. Analoo signaali kvantimine ajas	40
5.2. Mikrokontrolleri A/D muunduri töösageduse seadistamine.....	43
5.3. Pillikeele põhiharmonilise sageduse tuvastamisalgoritm	45
6. Häälestussüsteemi tööpõhimõte.....	49
7. Komponentide valik ja põhjendus	52
7.1. Analoo gahela komponentide valik	52
7.2. Servomootori valik	57
7.3. Mikrokontrollerplaadid.....	61
7.3.1. Mikrokontrollerplaatide valik	61
7.3.2. Andmeside mikrokontrollerplaatide vahel.....	65
7.4. Ahela toide.....	67
8. Häälestusstend	69

8.1. Stendi koostamine.....	69
8.2. Häälestusprotsessi kirjeldus stendil	73
9. Kokkuvõte.....	77
Kasutatud kirjandus.....	82
Lisad	84
Lisa 1 Elektriskeem.....	85
Lisa 2 Protsessi kirjeldav voogesitusdiagramm.....	86
Lisa 3 Stendi joonised.....	89

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Elektrotehnika instituut

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

Ardi Viires, üliõpilaskood 132724AAAM

Magistritöö teema: Keelpilli automaathäälestus servomootoriga

Ülesanne:

Koostada digitaalne juhtimissüsteem keelpilli keelte põhivõnkesageduste tuvastamiseks ja pillikeelte automaatseks häälestamiseks servomootori abil.

Lähteandmed:

1. Helisignaali töötamise näide keeles C++ põhiseduse eraldamiseks sisestatavast analoogsignaalist.
2. Kasutatava mikrokontrolleri arendusplaadi dokumentatsioon
3. Servomootori tehnilised andmed
4. Ülevaade keelpilli (elektrikitarr) ehitusest

Lahendamisele kuuluvate probleemide loetelu:

1. Süsteemi struktuuri ja elektriskeemi koostamine häälestusprotsessi juhtimiseks.
2. Instrumendi helisignaali analüüsimine.
3. Põhisageduse tuvastamise meetodi ülevaade.
4. Elektriskeemi komponentide valik ja põhjendus.
5. Juhtimisobjekti kirjeldus. Ülevaade tehnilistest probleemidest kitarrikeelte häälestamisel servomootoriga, Häälestusprotsessi optimeerimine.
6. Kasutatava tarkvara ja andmesideprotokollide ülevaade.
7. Kasutajaliidese koostamine ja häälestusprotsessi visualiseerimiseks.

Magistritöö esitada instituuti eesti keeles 2 eksemplaris hiljemalt

Juhendaja:

Ülesande vastu võtnud:

Dotsent M. Lehtla

Üliõpilane A. Viires

2. SISSEJUHATUS

2.1. Teema valik

Isiklik kogemus erinevate kitarridega ütleb seda, et pärast mõningast mängu instrumendiga vajab see taas häälestamist. Olenevalt pillist ja selle kvaliteedist (hinnast), võtab instrumendi häälestamine erinevalt aega. Häälest ära läinud pilliga ei ole aga võimalik jäljendada etteantud noodikirja ja seetõttu on hea muusika eelduseks korralikult häälestatud pill. Esinemise ajal on muusikutel pilli häälestamine enamasti raskendatud, sest kitarril häälestamiseks tuleb reeglina pillimäng katkestada. See idee võimaldas rakendada erialaseid teadmisi terviklahenduse koostamiseks pillikeelte automaatseks häälestamiseks vähendatud ajakuluga.

Tutvumine olemasoleva lahendusega

Alternatiivina käesolevale tööle on tänaseks laia tarbijaskonnani jõudnud firma Tronical poolt toodetav ja üks väheseid tööstuslikke automaatseid kitarrihäälestus-süsteeme. Firma Tronical tehniline lahendus sai alguse, kui muusikute seas kõrgelt hinnatud kitarrifirma Gibson palus Chris Adams'il ehitada süsteem pillikeelte automatiseeritud häälestamiseks. Kümneaastase arendustöö järel on toode jõudnud edukalt poelettidele ja saavutanud ülemaailmse tuntuse [1].

Ülevaade käesolevas töös käsitletavast tehnilisest lahendusest

Käesoleva lõputöö raames koostati mikrokontrollerplaadile C++-keelne programm, mis võimaldab tuvastada kitarrikeelte põhivõnkesageduse helipea vahendusel ja seejärel automaatselt pillikeeled servomootoriga häälestab.

Analoogsignaali võimendusahel muundab kitarrist tuleva (± 200 mV) elektrisignaali vastavale arendusplaadi analoogsisendile sobivasse pingevahemikku (0...5 V). Mikrokontrollerplaati sisenevast ja ülesvõimendatud signalist tuleb eristada põhiharmooniline signaalikomponent ning tuvastada sagedus. Selle järgi saadakse teada, kas ja kui palju on häälestatava pilli keel hääles. Kõnealuse töö teeb ära mikrokontrollermoodul *Arduino Mega*, mida programmeeritakse programmeerimiskeskonnas *Arduino IDE (versioon 1.5.5-r2)*. Internetist võib leida sobivaid programme pillikeele signaali põhiharmoonilise tuvastamiseks [2].

Internetist saadav programmilõik C++ programmeerimiskeeles vajab aga omajagu kohandamist.

Programmi edasiseks arendamise eelduseks on elektriskeemi ja selle komponenteide valik. Konkreetsed riistvarakomponendid peavad omavahel kokku sobima ja ühilduma ka programmiga, et süsteem häälestusprotsessi käigus probleemideta töötaks.

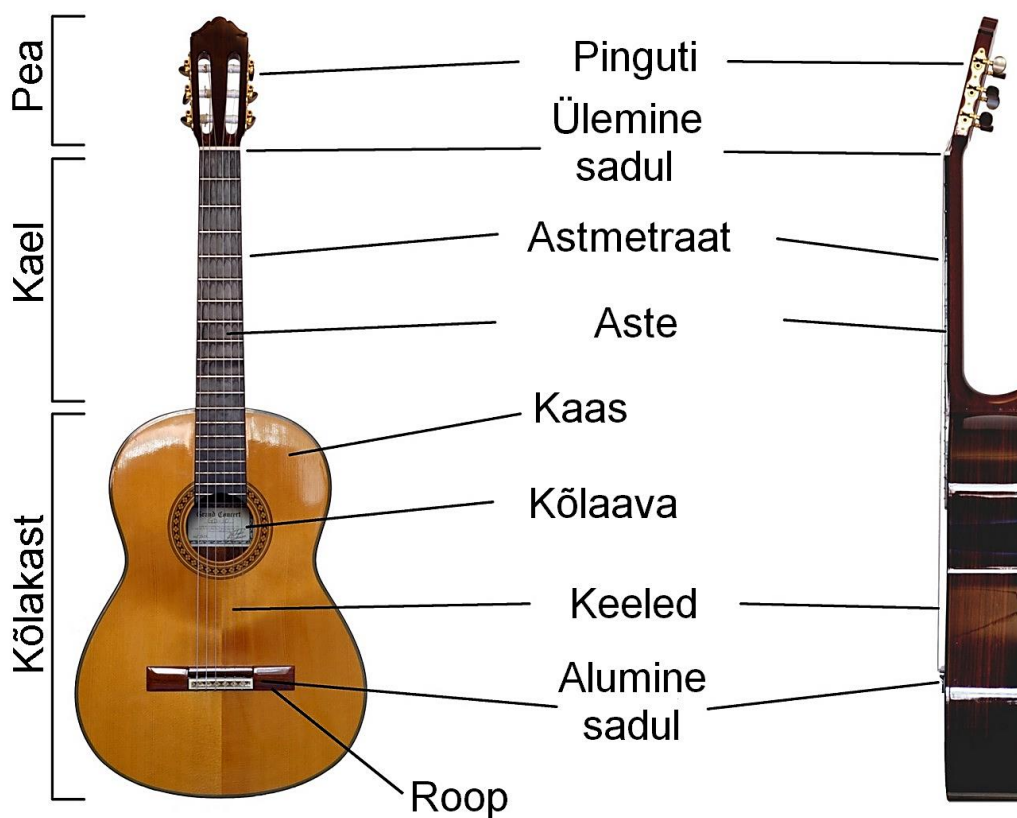
Instrumendi häälestusprotsessi veatuks ja tõhusaks toimimiseks oli arendustöö käigus plaanis valmistada ülevaatlik ja selgesti mõistetav kasutajaliides stendi näol. Stendil on kõik häälestamiseks vajalikud komponendid ja protsess on kasutajale visualiseeritav valgusdiiodindikaatorite (*LED, light emitting diodes*) ning vedelkristallkuvari (*LCD, liquid crystal display*) abil.

Pilli häälestamisel kasutatakse stendis esialgu vaid ühte servomootorit, millele on integreeritud kitarril häälestamiseks sobilik mehhaaniline liides ehk otsik, mis ühildub enamike kitarride häälestusnuppudega. Häälestusprotsessi lülitamisel automaatrežiimile tagavad programm ja servomootor kasutajale kiiresti häälestuva pillikeele. Kasutaja ei pea seejuures tegema muud, kui tõmbama pillikeelt ja hoidma servomootoril olevat ühendusotsikut instrumendi häälestusnupul. Selline automatiseeritud (poolautomaatne) häälestusviis tagab kasutajale väiksema ajakuluga täpsemini häälestatud pilli võrreldes enamikel juhtudel käsihäälestamiseks kuluva ajaga.

3. MUUSIKAINSTRUMENT

Enne häälestusprotsessi kirjeldamist on vaja mõista kõnealuse muusikainstrumendi – kitarrri ehitust ja selle omapära kuuldavate helilainete tekitamises. Lisaks helisignaale transponeeritakse pillikeelte mehhaanilised võnkumised omakorda kitarrri helipea vahendusel elektriliseks signaaliks.

Instrumendi konstruktsioonil pikemalt peatumata koosneb kitarr üldiselt pilli kerest ja selle külge kinnituvast pilli kaelast (vt joonis 3.1.). Pilli kerele on asetatud omakorda roop, millele kinnitatakse edaspidi kitarrrikeeled. Roobist instrumendi kaela suunas või hoopis roobil asub sadul, millele toetuvad kitarrrikeeled asetuvad selliselt, et need on kasutajale parajal vahekaugusel pilli kaelal olevatest astmetraatidest ehk kriffidest neid puutumata. Kaelal olev sõrmlaud on aga reeglina jaotatud kriffide abil astmeteks, mille täpne arv sõltub juba kitarrri mudelist. Pillikaelaga on omakorda ühendatud kitarrri pea, millel asuvad kitarrri häälestamiseks tarvilikud pingutid.



Joonis 3.1. Akustilise kitarrri ehitus [3]

Kitarrid jagunevad kahte peamisse rühma pilli konstruktsiooni ja heli tekitamise viisi järgi – akustilisteks kitarrideks (sh. elektroakustilised kitarrideks) ja elektrikitarrideks.

3.1. Akustiline kitarr

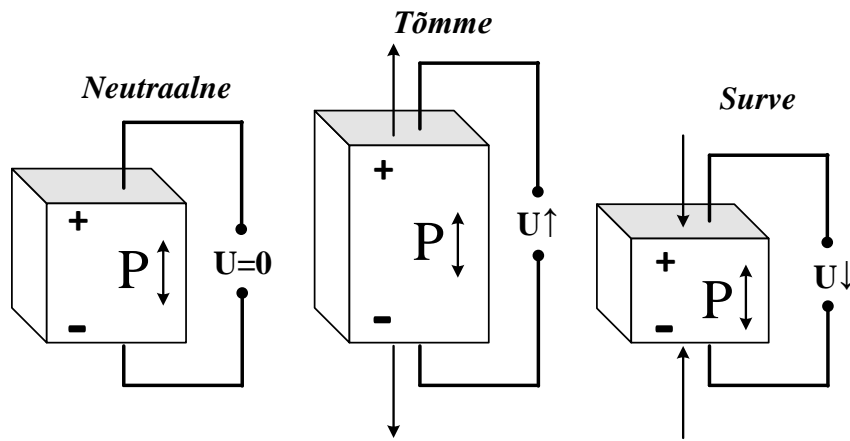
Akustilistel ja elektroakustilistel kitarridel täidab pilli kere ka kõlakasti funktsiooni. Heli tekib pillikeelte ja kõlakasti resoneerivatest võnkumistest. Elektroakustilised kitarrid erinevad akustilistest kitarridest aga selle poolest et nendes kasutatakse piesoelektrilisi helipäid (vt joonis 3.2.).



Joonis 3.2. Piesoelektriline helipea ehituse ülevaade [4]

Piesoelektrilises helipeas toimub kitarrimängimisel piesoelektriline efekt ehk piesoefekt (kreeka keeles *piezo* on tõlkes 'väänama', 'välja pigistama'), mis põhineb kvartskristalli omadustel. Mehhaaniline võnkumine põhjustab kvartsikristalli pidevaid kokkutõmbumisi, sest helipea asub vahetult kitarrimängimise sadula all, millele toetuvad pillikeeled. Selle tulemusel tekib kvartskristalli kokkusurutavate tahkude vahel elektripinge tingituna dielektrilisest polarisatsioonist ja elektrilaengu suunatud nihkumisest.

Järgneval joonisel on piltlikult selgitatud laengu jagunemist kvartskristallile surve- või tõmbejõu rakendamisel (vt joonis 3.3.).



Joonis 3.3. Kvartsikristalli mõjutamine

Piesoelektrilise helipea poolt genereeritav signaal on sõltuvalt helipeast väga nõrk, seepärast võimendatakse see reeglina kitarris paikneva eelvõimendiga kitarril 1/4'' heliväljundisse ± 200 mV pingeni vooga signaaliks. Eelvõimendit toidetakse kitarris paikneva 9 V liitiumpatareiga. Saadavat elektrisignaali on edaspidi võimalik kasutada juba varjestatud kaabli vahendusel nii kitarrivõimendis kui pilli häälestussüsteemis.

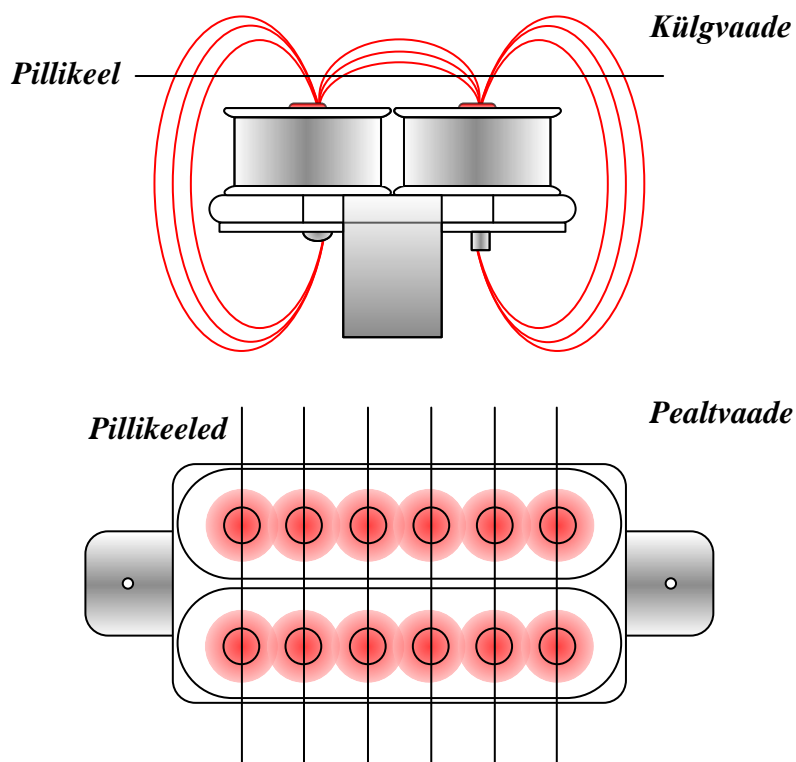
3.2. Elektrikitarr

Elektrikitarril kõlakast reeglina puudub ning pillikeelte resoneerimine muudetakse otse elektrisignaali pilli helipeade vahendusel, mis paiknevad kitarril kere pilli sadula ja sõrmlaua vahel (vt joonis 3.4.).



Joonis 3.4. Elektrikitarril helipead

Elektrikitarridel kasutatakse püsिमagneteid sisaldavaid helipäid, kus magnetsüdamike ümber keritud mähistesse indutseeritakse pillimängul elektrivool (vt joonis 3.5.). Helipea tööpõhimõtet võib kirjeldada *Faraday*' seaduse abil, sest metallist pillikeelte mehhaaniline võnkumine helipea magnetite vahetuses läheduses tähendab helipea kohal oleva magnetvälja mõjutamist metallist (raud-süsinik) elektrijuhtide (pillikeelte) poolt. Pillikeelte vibreerimisel lõikavad need helipeade kohal olevaid magnetvälja jõujooni. Sellega tekitatakse pillikeele võnkumise tulemusel helipeade kohale muutuv magnetväli, mis omakorda indutseerib magnetsüdamike ümber keritud mähistesse elektrivoolu. Magnetsüdamike ümber keritud mähised on aga kõik ühendatud omavahel jadamisi ja selliselt koguneb väljundisse piisava pingeniivoo helisignaali. Püsिमagnetsüdamikega helipeade kasutamisel eelvõimendi enamasti puudub. Mähistesse indutseeritud vool jälgendab küllaltki täpselt pillikeelte mehhaanilist võnkesagedust ja võimaldab seega kitarril 1/4'' heliväljundis tuvastada ligilähedaselt ± 200 mV helisignaali.



Joonis 3.5. Helipea magnetvälja jõujooned (tähistatud punasega)

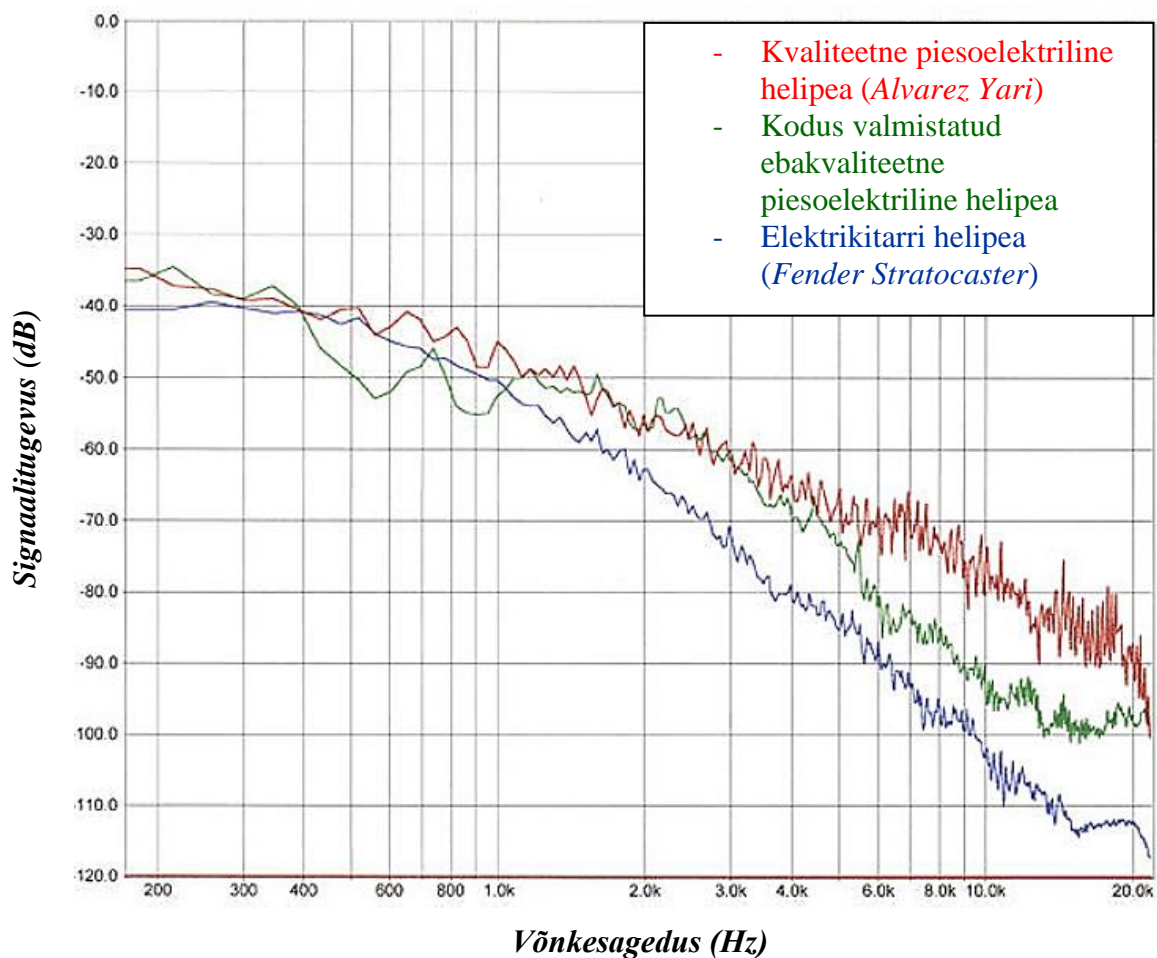
Püsिमagnetitest on elektrikitarride helipeades kasutusel nii alumiinium-nikkel-koobalt, samaarium-koobalt kui ka neodüüm-boor-raud magnetid. Helipead varieeruvad nii oma väljatugevustelt kui ka hinnalt. Tugevamate magnetite kasutamisel on väiksema

mähiskeerdude arvu juures võimalik saavutada pilli signaaliväljundisse samaväärsed pingepulsid kui nõrgemate magnetite ja suuremate mähiskeerdude arvu korral.

3.3. Helipeade võrdlus

Lähtuvalt instrumendi helipeade kvaliteedist, reageerivad need pilli kasutamisel hoopis erinevalt. Nii elektroakustilistel kitarridel kasutatavate piesolektriliste helipeade kui elektrikitarridel kasutatavate magnetiliste helipeade puhul kehtib põhimõte, et mida kvaliteetsem on helipea, seda ühtlasem on signaalitugevus instrumendi väljundis erinevatel signaali võnkesagedustel (*frequency response*).

Vähem arendustööd näinud helipeade puhul kipub kitarril väljundisse saadava signaali amplituud teatavates sagedusvahemikes sumbuma ja teistes vahemikes liigselt võimendumise. See viitab üldjuhul kitarril väljuva helisignaali madalale kvaliteedile (vt joonis 3.6).



Joonis 3.6. Helipeade võrdlus sagedusvahemikus 0 Hz...20 kHz [5]

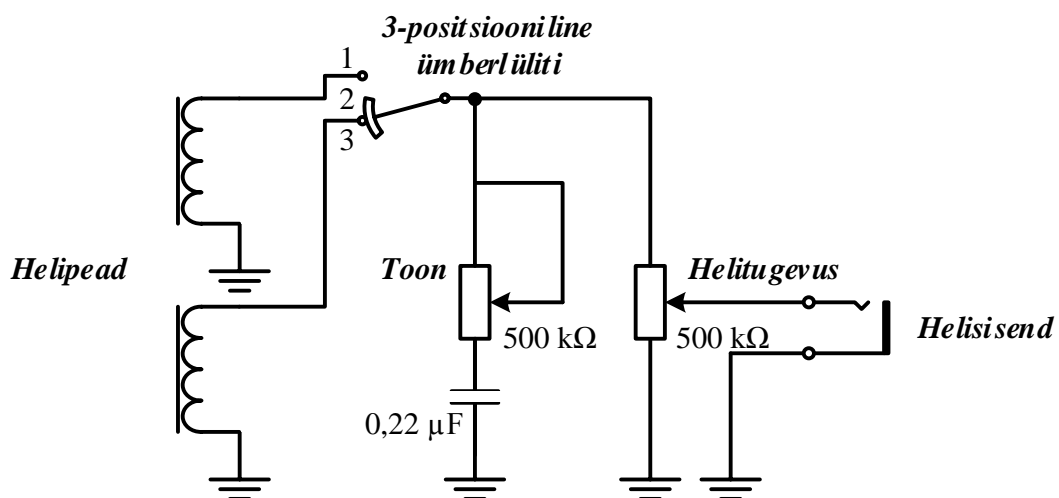
Eelnevalt jooniselt nähtub, et piezoelektrilise helipea poolt edastatava elektrignaali amplituudi langus on kõrgematel sagedustel tagasihoidlikum kui elektrikitarril helipea elektrignaali. Seega edastavad piezoelektrilised helipead kogu vaadeldavas sagedusspektris (0...20 kHz) 1 kHz-st kõrgemaid võnkesagedusi tugevama elektrisignaalina, kui seda on võimelised tegema elektrikitarril helipead. Madalamatel võnkesagedustel puuduvad helipeadel suuremad erisused elektrisignaali tugevuses.

Täielikult ühtlast väljundsignaali sageduskarakteristikut ei võimalda kumbki helipea, küll aga väljastab elektrikitarril helipea kitarrikeelte põhivõnke-sagedusvahemikes 82,4 Hz kuni 329,6 Hz ühtlasema amplituudiga elektrisignaali, kui seda on võimelised tegema piezoelektrilised helipead. See tagab omakorda kasutajale kvaliteetsema helisignaali kitarrivõimendis või mõnes muus signaaliahelas, kus olenemata pillikeelte võnkesagedusest on pilli väljundis võrdlemisi ühtlane elektrisignaali.

Lisaks eelpoolöeldule mõjutavad helipeade poolt edastatava helisignaali tugevust ja kvaliteeti kitarris peituvad elektriahela komponendid, milleks võivad olla varieeruva kvaliteediga varjestatud juhtmed ja potentsiomeetrid pilli helitugevuse või tooni keeramiseks. Kusjuures pilli tooni keeramisel on elektriahelasse sisse lülitatud ka kondensaatorid.

3.4. Katsealune pill

Järgneval joonisel on välja toodud üks võimalikke elektrikitarril elektriahelaid, kus on kasutusel kaks ümberlülitusvõimalusega helipead.

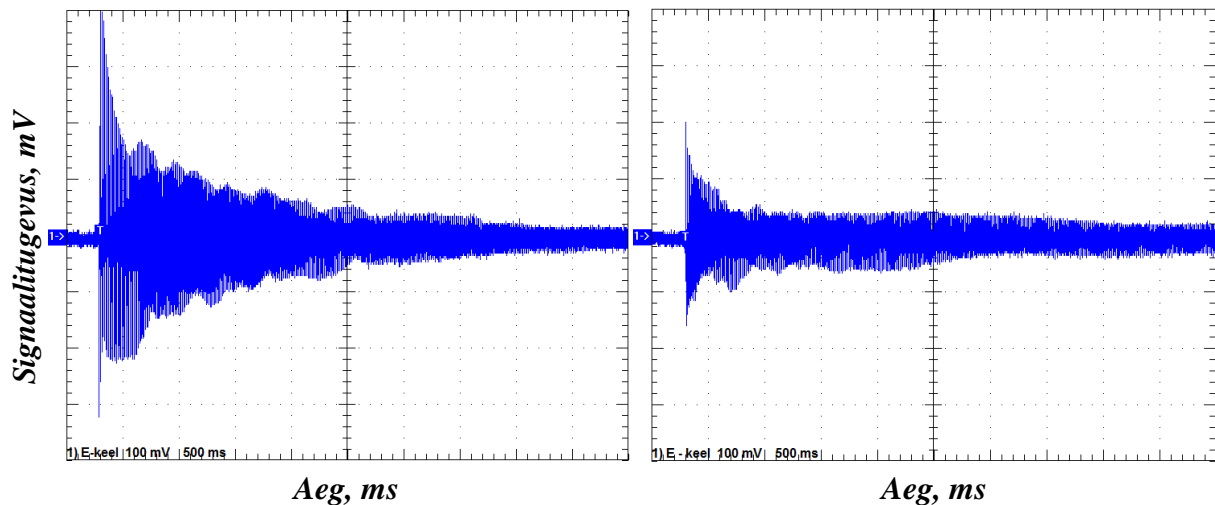


Joonis 3.7. Näide elektrikitarril elektriahelist

Käesoleva magistritöö raames on häälestusprotsessi arendamisel kasutatud *Fender'i telecaster*-tüüpi elektrikitarril *Classic Series '72 Telecaster® Thinline*, millel kasutatakse nn *humbucker*- tüüpi (79 mm x 44 mm) topeltmähistega helipäid (vt joonis 3.4. ja 3.8.).

Antud instrumendi elektriskeem vastab eelmisel lehel joonisel 3.7. kujutatule. Kasutataval kitarril on kaks helipead ning üks pöördnupp helitugevuse ja üks tooni keeramise tarvis. 3-positiooniline helipeade ümberlüüti võimaldab kasutajal valida pilli sadulapoolse (kõrgemaid sagedusi püüdva) või kaelapoolse helipea vahel. Kaelapoolne helipea paikneb võnkuvate keelte lähimast kinnituspunktist kaugemal ja püüab seega paremini madalamaid võnkesagedusi. Mõlemat helipead on võimalik kasutada samaaegselt.

Kitarril häälestamisel on aga kasutatud sadulapoolset helipead. Põhjus selleks peitub elektrisignaali tugevuses, kus sadulapoolne helipea tagab instrumendi väljundis tunduvalt kõrgema pingeniivooga signaali, kui see on võimalik teise helipeaga (vt joonis 3.8.). Signaalist parema ülevaate saamiseks kasutati ostsilloskoopi *Tektronix TDS 220*. Järgnevatel graafikutel on elektrikitarril heliväljundist mõõdetud madala E-keele sumbuvus ajas.

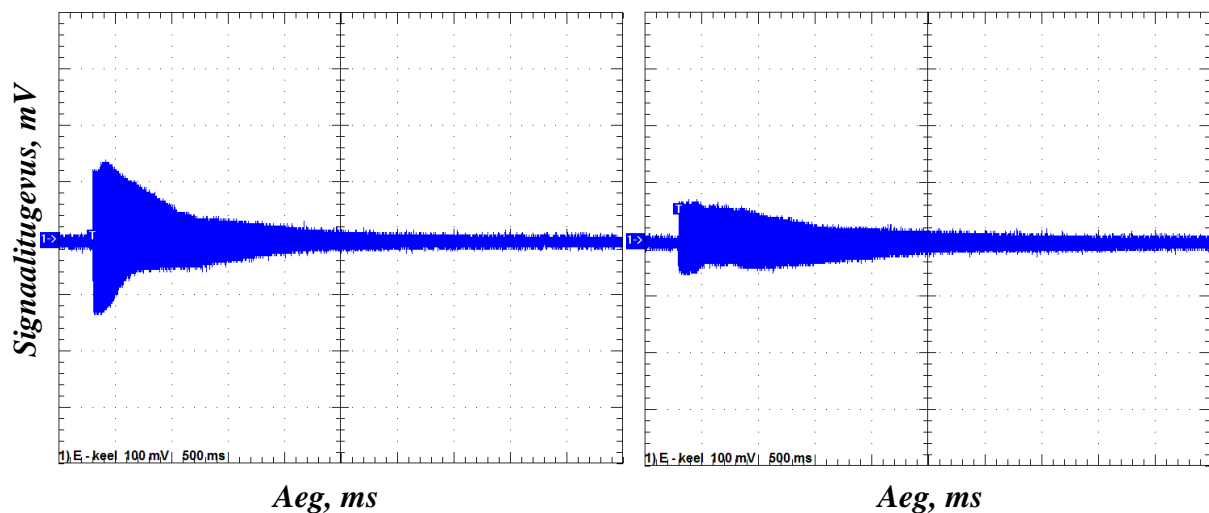


Joonis 3.8. Sadula- ja kaelapoolse helipea signaalitugevuse võrdlus E-keele (82,4 Hz) puhul

Vasakpoolsel graafikul on kasutusel sadulapoolne helipea, kus 400 mV amplituudiga elektrisignaali sumbuvus 5 s jooksul 20 mV-le. Parempoolsel graafikul tagab aga instrumendi kaelapoolne helipea pilli väljundisse 200 mV signaali, mis sumbuvus võrdlemisi kiiresti püsiva pingeniivoni 25 mV. Teisisõnu võimaldab mõõteperioodi esimesel poolel sadulapoolne

helipea instrumendi madalaima keele puhul pilli väljundis ligi kaks korda tugevamat signaali võrreldes teise helipeaga.

Et saada kitarril kasutatavatest helipeadest võimalikult terviklikku pilti, on mõõdetud lisaks instrumendi madalaimale E-keelele ka selle kõrgeimat keelt, mis lähtuvalt standardhäälestusele on samuti E-keel põhivõnkesagedusega 329,6 Hz (vt joonis 3.9.).



Joonis 3.9. Sadula- ja kaelapoolse helipea signaalitugevuse võrdlus E-keele (329,6 Hz) puhul

Lähtuvalt eelnevatest graafikutest võib järeldada, et ka käesoleval juhul võimaldab sadulapoolne helipea instrumendi väljundis tuvastada tugevamat elektrisignaali. Kui mõõteperioodi lõppedes on mõlemad signaalid sumbunud ligilähedaselt 20 mV-le, siis mõõteperioodi esimeses pooles tagab sadulapoolne helipea sekundi vältel taas kahekordse signaalitugevuse (140 mV) võrreldes teise helipea signaaliga (70 mV).

Et kitarril häälestamisprotsess oleks võimalikult kiire, ongi oluline, et instrumendi väljundist tulev helisignaali oleks juba signaali alguspunktis võimalikult kõrge pingeniivooga, et seda oleks edaspidi võimalik kasutada signaalitöötles. Ühtlasi selgus, et kaelapoolse helipea kasutamisel ei anna pillikeele suurema amplituudiga võnkumine helipea väljundisse suurema amplituudiga elektrisignaali.

4. VÖNKESAGEDUSED

4.1. Instrumendi häälestus

Olenemata sellest, kas tegemist on elektroakustilise või elektrikitarriga, on mõlemat tüüpi kitarrid reeglina kuuekeelsed kromaatilised keelpillid, millede standardhäälestus alates madalaimast pillikeelest on E, A, D, G, B, E (vt joonis 4.1.).



Joonis 4.1. Standardhäälestusega kitarr

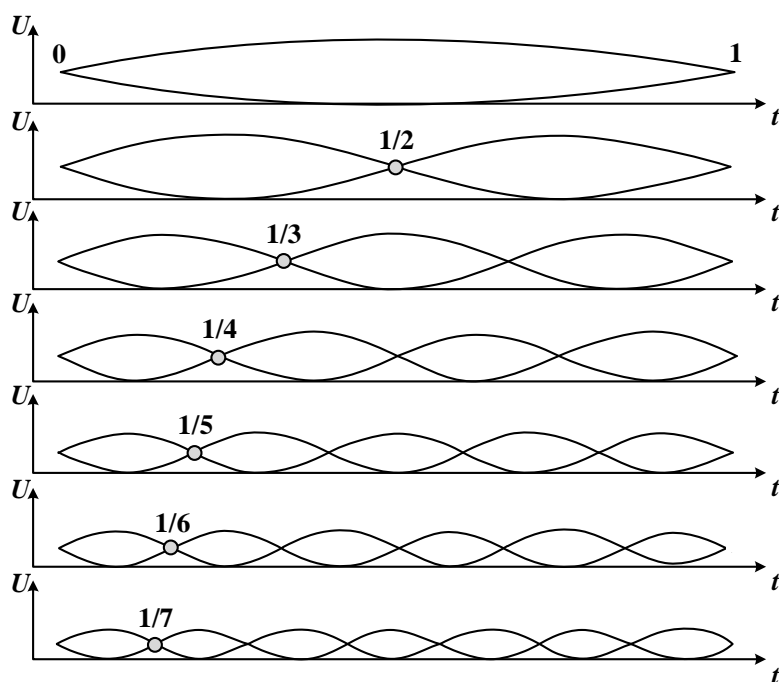
Lisaks standardhäälestusele on laialdaselt levinud ka kõikvõimalikud alternatiivsed pilli häälestused, mis toovad esile instrumendis uut laadi kõlapildi, kuid käesoleva magistritöö raames nendele ei keskenduta. Kogu instrumendi häälestusprotsessi arendamisel on aluseks võetud kitarril standardhäälestus. Alternatiivsete häälestuste realiseerimine juhtimisprogrammis on käesoleva töö üheks võimalikuks edasiarendamise suunaks.

Pillikeelte põhivõnkesagedused moodustavad kitarril heliväljundisse transponeeritud elektrisignaali põhiharmonilised komponendid. Neid põhiharmonilisi iseloomustavad kindel võnkesagedus, lainepikkus ja võnkeamplituud (vt tabel 4.1.). Lisaks põhiharmonilisele komponendile sisalduvad signaalis mitmesugused kõrgemad harmoonilised komponendid.

Tabel 4.1. Pillikeelte võnkesagedused

<i>Pillikeel</i>	<i>Põhi - võnkesagedus (Hz)</i>	<i>Pillikeele kõrgeim harmooniline (Hz)</i>
E	82,4	1236,0
A	110,0	1320,0
D	146,8	1614,8
G	196,0	2940,0
B	246,9	3209,7
E	329,6	3625,6

Nagu ka eelnevast tabelist näha võib, ei koosne ühe pillikeele sagedusspekter vaid põhiharmoonilisest helisignaalist, vaid sellele lisanduvad ka põhivõnkesageduse kordsed kõrgemad harmoonilised helilained ja lisaks mõjutab tekkivaid sageduskomponente ka resonantsinähtused (vt joonis 4.2.). See tähendab, et kitarrikeele võnkumisel ja selle võngete sumbumisel ajas võivad tekkida kuni 17-ndat järku kõrgemad harmoonilised, kus isegi kõige madalama võnkesagedusega E-keel (82,4 Hz) on võimeline võnkuma kitarrikaelal sagedusega kuni 1236,0 Hz. Põhivõnkesagedusi eristab teistest võnkuvatest signaalikomponentidest nende kõrgem amplituud signaali alguses.

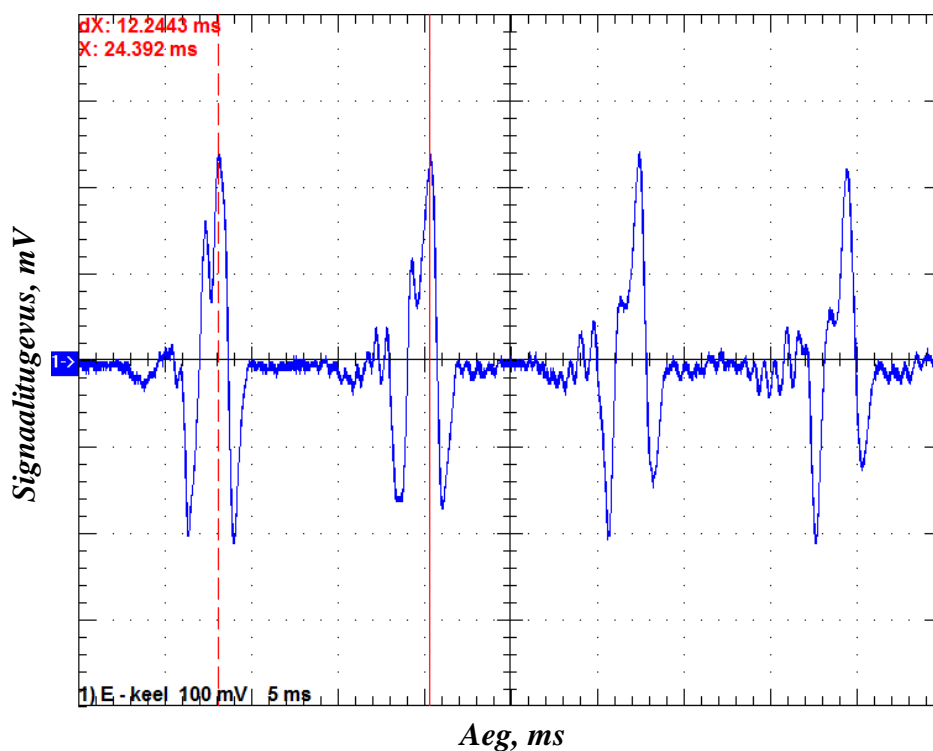


Joonis 4.2. Kuni 7-ndat järku harmoonilised põhivõnkesageduse kõrval

Vastavate pillikeelte sagedusspektrid annavadki instrumendile selle omapärase kõla ja eristavad odava kitarri kvaliteetsest. Lisaks sellele tekib mõõdetavasse signaali tihtilugu ka muud müra ja kõikvõimalikke sagedusi, mis on tingitud pillikeelte juhuslikest kokkupuudetest kitarri kriffidega, kui pillikeeli üleliia intensiivselt tõmmatakse.

4.2. Pillikeelte võnkesageduse mõõtmine ostsiloskoobiga

Järgnevalt ongi põhjalikumalt analüüsitud ostsiloskoobiga (*Tektronix TDS 220*) elektrikitarri heliväljundist mõõdetud pillikeelte põhivõnkesagedusi, kus on konkreetsemalt välja toodud ka iga pillikeele poolt genereeritav helisignaali kuju (vt joonis 4.3.). Vektorgraafikas piltide laadimiseks arvutisse kasutati programmi *Tektronix WaveStar*. Seejuures on vaadeldud ka pillikeelte kaupa helisignaali sumbuvalt ajas.



Joonis 4.3. Pillikeele helisignaali kuju (madal E-keel)

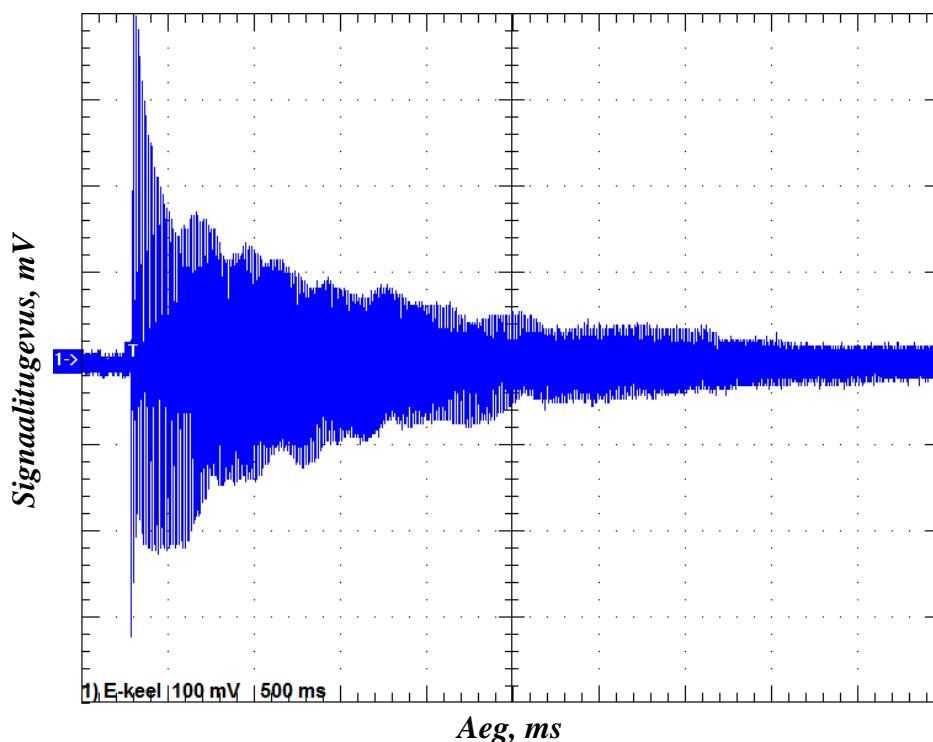
Eelneval graafikul on välja toodud kitarri madalaima keele poolt genereeritava signaali kuju 50 ms lõikes, kus eristuvad selgesti signaali kõrgeima amplituudiga põhiharmoonilised helilained madalama amplituudiga kõrgematest harmoonilistest.

Madala E-keele põhivõnkesageduse f saab antud juhul graafikult võrdluse mõttes välja arvutada lähtuvalt põhiharmoonilise signaali amplituudide vahelisest ajast – signaali perioodist T . Ostsilloskoobiga mõõdetud graafikul on aga kõnealune amplituudide vahekaugus visualiseeritud punaste joontega ning väljendatud arvulise suurusena dX kaudu.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{12,2443 \text{ ms}} = \frac{1}{0,0122443 \text{ s}} = 81,67 \text{ Hz} \quad (4.1.)$$

Saadud tulemusest järeldub, et pillikeele helisignaali mõõtmise hetkel ei olnud kasutatav instrument ideaalselt hääles ja madal E-keel oli oma standardhäälestusest (82,4 Hz) 0,73 Hz nihkes.

Madala E-keele sumbumist on vaadeldud järgmisel graafikul viie sekundi jooksul, kus võib näha, et sekundi murdosa vältel indutseeritud ligi 400 mV amplituudiga elektrisignaal sumbub juba kahe sekundi jooksul 50 mV amplituudiga signaaliks ning sealt edasi kahaneb amplituud 20 mV-le.



Joonis 4.4. Pillikeele helisignaali sumbumus (madal E-keel)

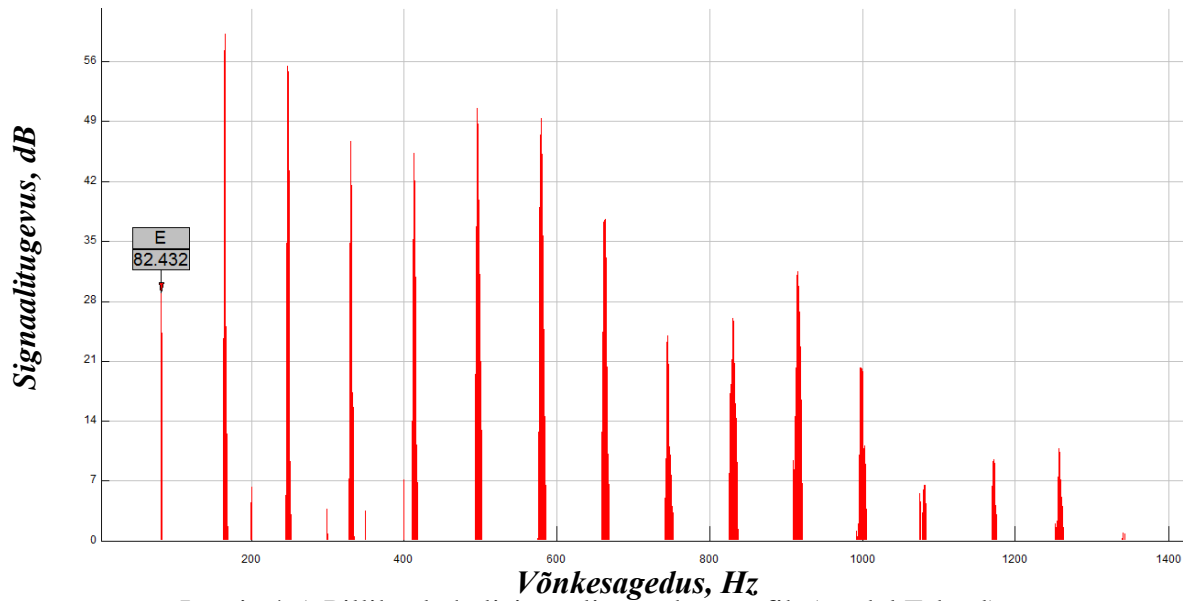
Instrumendi kõigi keelte signaalide sagedusspektrid standardhäälestuse korral on visualiseeritud programmiga *Sigview32 (Version 2.6.1)*. Sagedusspektri analüüs toob välja signaalis esinevate põhivõnkesageduste kõrval ka kõrgema sagedusega komponendid.

Lisaks ostilloskoobile kasutati signaalide muundamiseks digitaalsele kujule ka sülearvuti helisisendit. Seejuures on helisignaali salvestatud kitarri väljundi ühendamisel helikaabliga sülearvuti helisisendisse. Selle tulemusel läbib tuvastatav analoogsignaali sülearvuti helikaarti, mille heli diskreetimissagedus on vähemalt 44,1 kHz juures ning tagab sellega antud juhul sobiliku CD-kvaliteediga helisignaali tuvastuse.

Signaalitöötlusprogramm kasutab omakorda sagedusspektri tuvastamiseks FFT (*Fast Fourier Transform*) meetodit. FFT on nimelt kiirem viis *Fourier'* teisendusest kui pööratavast funktsioonist avaldada aegses helisignaalis selle sagedusesitus. Antud operatsiooni kiirus saavutatakse just vajalike arvutuste mahu vähendamise ja korduvate tulemuste ära kasutamise teel. [6]

Fourier' teisendus ja selle üldvalem kehtivad pideva ajaga signaalidele. *Fourier'* kiirteisendusalgoritmi (FFT) puhul kasutatakse aja kokkuhoiu ja süsteemi lihtsuse mõttes hoopis aias ja nivoos sãmplitud signaalide analüüsimist. Signaali diskreetimine tehakse seejuures diskreetse *Fourier'* teisenduse DFT (*Discrete Fourier Transform*) abil. [7]

Järgnevalt ongi kasutatud programmi *SigView* abil eristatud kõik madala E-keele poolt genereeritavast elektrisignaalist leiduvad harmoonilised, kus leiab kinnitust taas madalaima pillikeele põhivõnkesagedus – 82,4 Hz. Antud graafikul erineb eraldi tähistatud põhisagedus minimaalselt standardsest häälestusest osaliselt seetõttu, et instrument pole olnud ideaalselt hääles ning teisalt on indikatsioon programmis graafikule käsitsi seatud (vt joonis 4.5.).

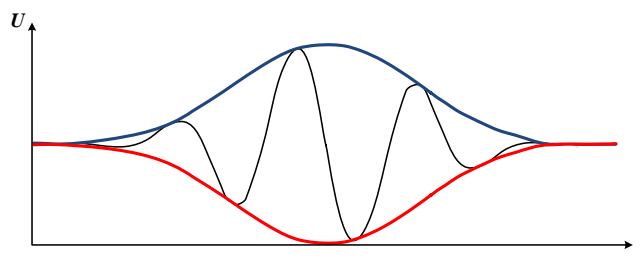


Joonis 4.5. Pillikeele helisignaali sagedusgraafik (madal E-keel)

Lisaks eelpool öeldule võib E-keele sagedusgraafikult välja lugeda, et selles esineb kuni 15-ndat järku arvestatavaid kõrgemaid harmoonilisi, mis tähendab, et madala E-keele võnkumisel tekib kuni 1236,0 Hz võnkesagedusega helilained.

Nii eelneval graafikul (vt joonis 4.5.) kui kõikide järgnevate helisignaali sagedusspektrit tuvastavate graafikute puhul on rakendatud *Hanning*-filtrit, millel on antud otstarbeks piisav sageduse eraldusvõime ja mis aitab kasutajal selgemalt eristada elektrisignaali põhised signaalikomponente.[8] Lisaks *Hanning*'ule on võimalik signaalitöötlusprogrammides kasutada veel järgnevaid filtreid: ristkülik, kolmnurk, *Parzen*, *Hamming*, *Blackman*, *Nuttall*, *Gauss*, *Tukey* jne.

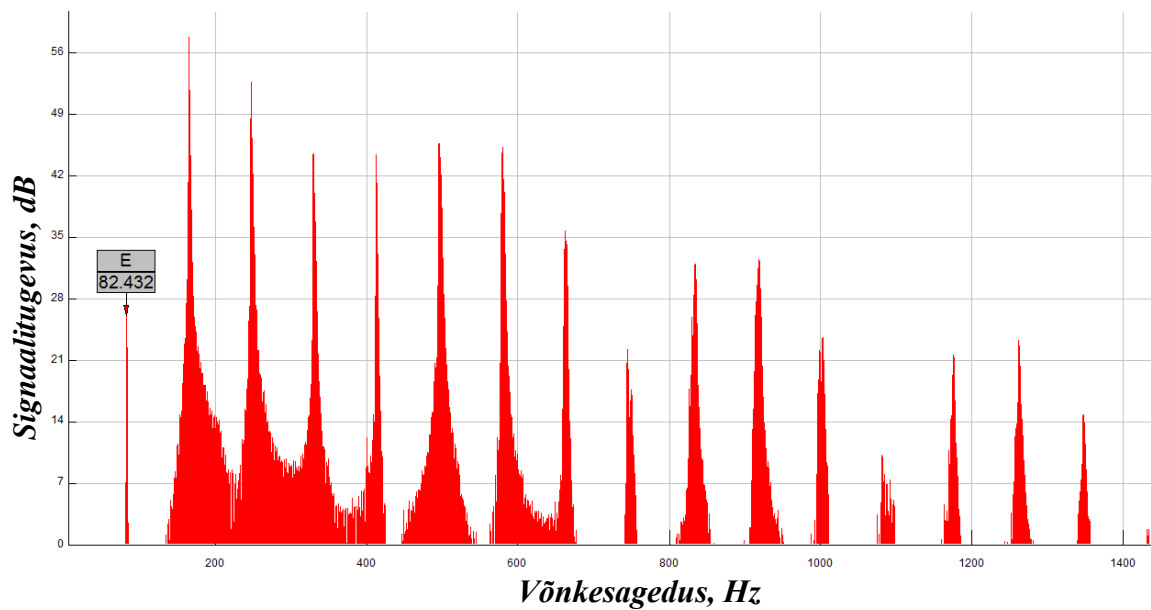
Hanning 'u aken tagab seejuures kasutajale vastavalt etteantud koefitsiendile üleliigse müra eemaldamise signaalist, kus näiteks ports üleliigseid siinusvõnkeid asendatakse signaalilõigus kahelt poolt 0-nivood vaid ühe koossiinusfunktsioonist tuleneva võnkeamplituudiga (vt joonis 4.6.). [9]



Joonis 4.6. *Hanning* 'u filtri rakendamine siinussignaali puhul

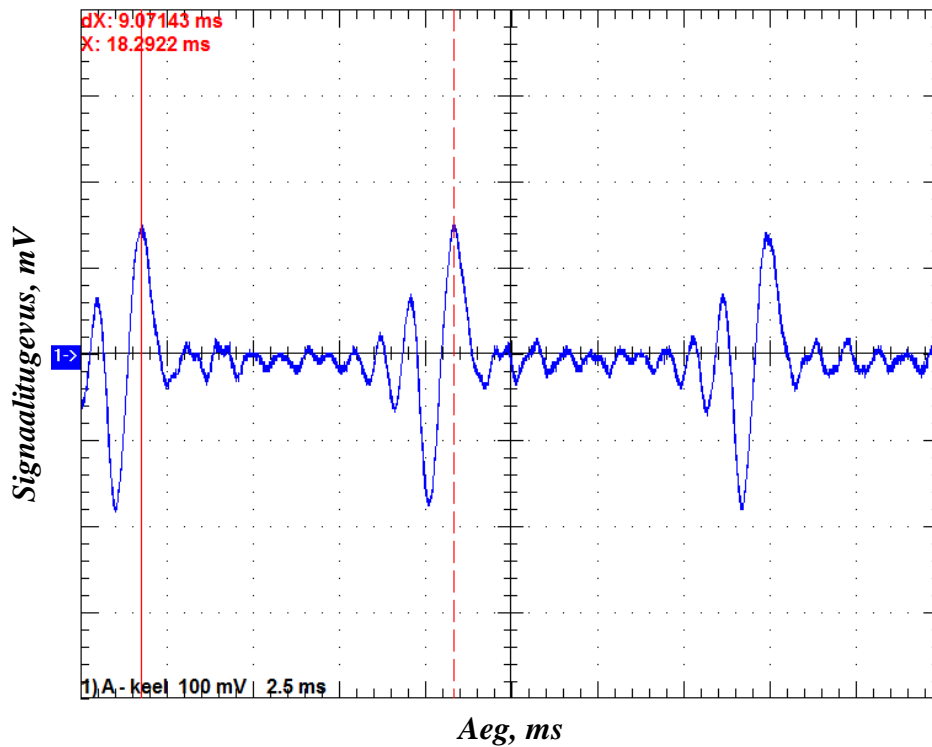
Uue signaalilõigu otspunktid läbivad alati 0-nivood olenemata sisendsignaali väärtustest antud kohtades ning need ühendatakse selliselt ka järgmiste lõikudega. Tulemuseks on üleliigsest müra puhastatud signaal harvemate võnkeamplituudidega, mida on võimalik juba edasi analüüsida. [9]

Järgneval graafikul on näitlikult välja toodud madala E-keele sagedusspekter ilma vahefiltrita, kus võib näha tunduvalt mürarikamat sagedusspektrit, kui see oli joonisel 4.5. (vt joonis 4.7.).



Joonis 4.7. Pillikeele helisignaali sagedusgraafik ilma *Hanning*’ filtrita (madal E-keel)

Järgmine pillikeel on kitarris standardhäälestuse kohaselt A-keel, mis võngub 110 Hz põhivõnkesagedusega. Ostsilloskoobiga mõõdetud signaalis on esmalt vaadeldud 25 ms lõiku, kuhu mahub antud pillikeele võnkesageduse korral selle kolm põhiharmoonilist amplituudi (vt joonis 4.6.).

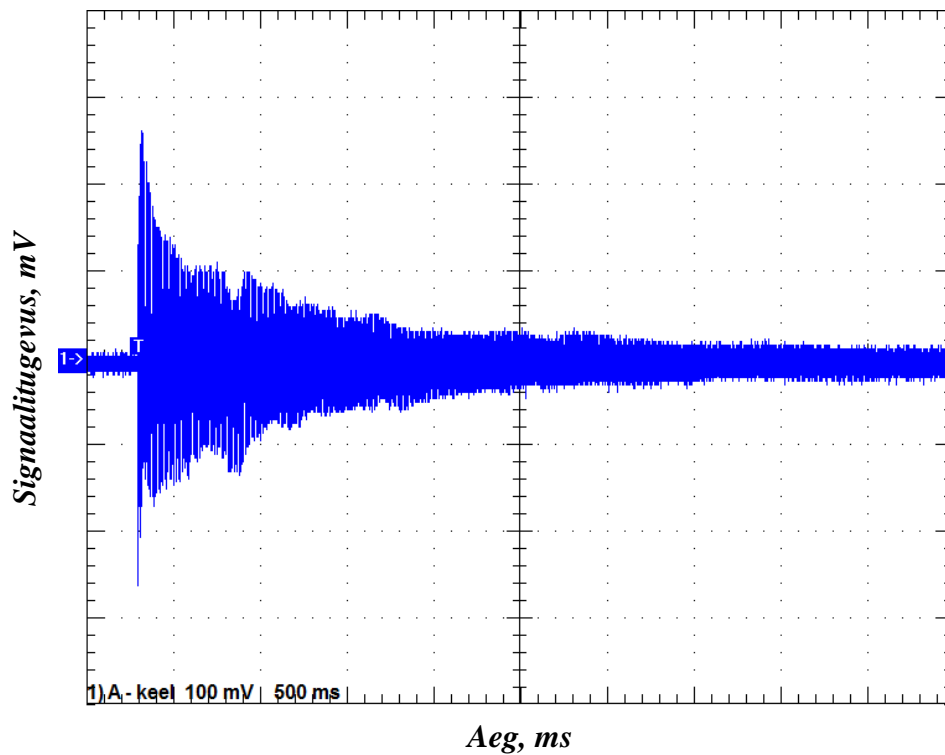


Joonis 4.6. Pillikeele helisignaali kuju (A-keel)

Nende põhjal saab omakorda visuaalse mõõtmise teel välja arvutada pillikeele häälestuse (Hz) lähtuvalt kitarr standardhäälestusest, kus A-keele põhivõnkesagedus on teoreetiliselt täpselt 110,0 Hz.

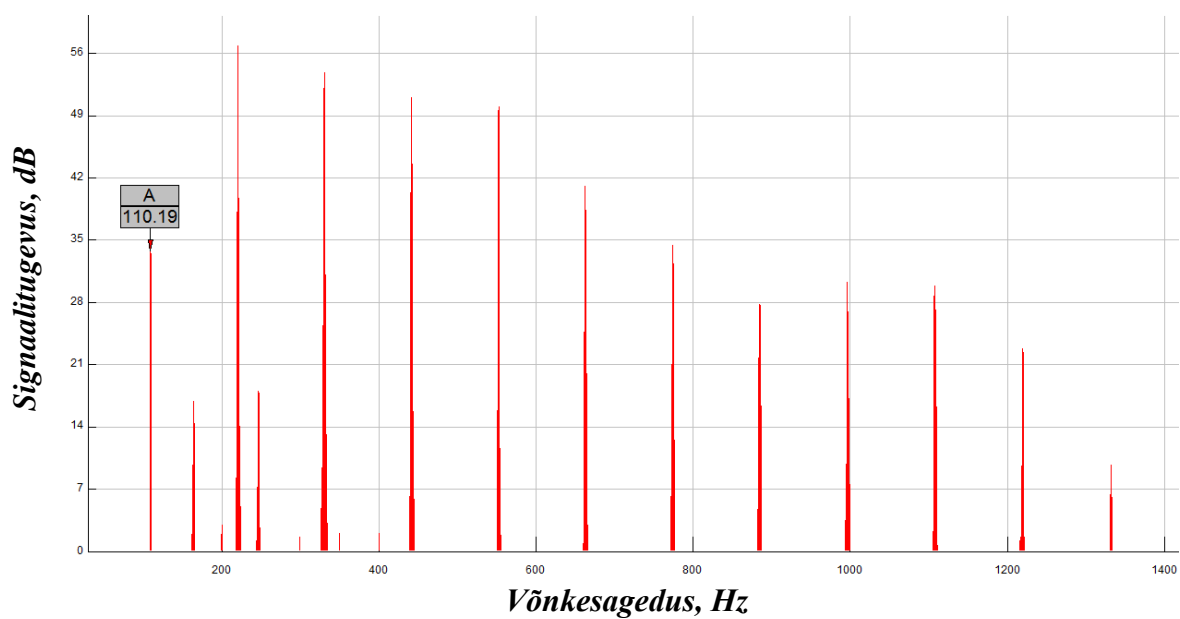
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{9,07143 \text{ ms}} = \frac{1}{0,00907143 \text{ s}} = 110,23 \text{ Hz} \quad (4.2.)$$

Kitarr A-keele sumbuvus on sarnaselt madala E-keele analüüsimisele vaadeldud 5 sekundi jooksul, kus võib täheldada erinevalt E-keelest tunduvalt madalama pingeniivoo helisignaali (vt joonis 4.7.). A-keele elektrisignaali ligi 260 mV võnkeimpulss sumbub juba sekundi vältel 40 mV võnkeamplituudiga signaaliks, mis taandub edaspidi püsivamalt 20 mV pingeniivoni. Erinevalt madalast E-keelest toimub antud juhul sumbumine kiiremini ja 20mV pingeniivoo saavutatakse ligikaudu 1 s varem kui see toimus E-keelel.



Joonis 4.7. Pillikeele helisignaali sumbuvus (A-keel)

Järgnevalt on instrumendi A-keele puhul eristatud kõik helisignaalis esinevad harmoonilised. Pillikeele põhivõnkesagedusena võib allolevalt graafikult välja lugeda 110,02 Hz, mis kattub ühtlasi ka pilli teoreetilise standardhäälestusega (vt joonis 4.8.).



Joonis 4.8. Pillikeele helisignaali sagedusgraafik (A-keel)

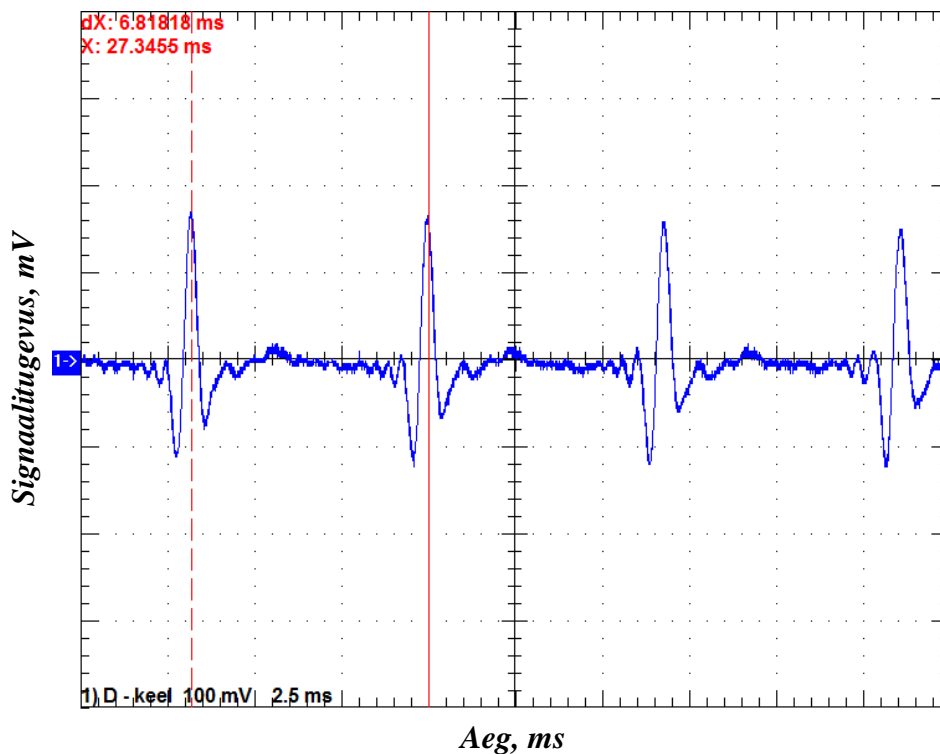
Võrreldes eelmise analüüsitud pillikeelega, leidub A-keele helisignaalis 12 ja seega kolme võrra vähem harmoonilist signaalikomponenti, kus kõrgeim harmooniline signaal võngub sagedusega 1320 Hz. Lisaks sellele võib käesoleva signaali puhul märgata sagedusspektris kindlatel sagedustel esinevaid müraallikaid, mis ei kuulu käesoleva lõputöö raames analüüsimisele.

Kitarri kolmas ja ühtlasi D-keel võngub ideaalis standardhäälestuse kohaselt 146,8 Hz. Helisignaali põhiharmoonilise analüüsimiseks on ostsilloskoobiga graafikule reguleeritud 25 ms lõikes neli perioodi, kus punased kursorid näitavad taas põhiharmoonilise signaali vönkeperioodi (vt joonis 4.9.).

Lähtuvalt graafikul kujutatust, saab D-keele põhivõnkesagedus arvutada järgnevalt :

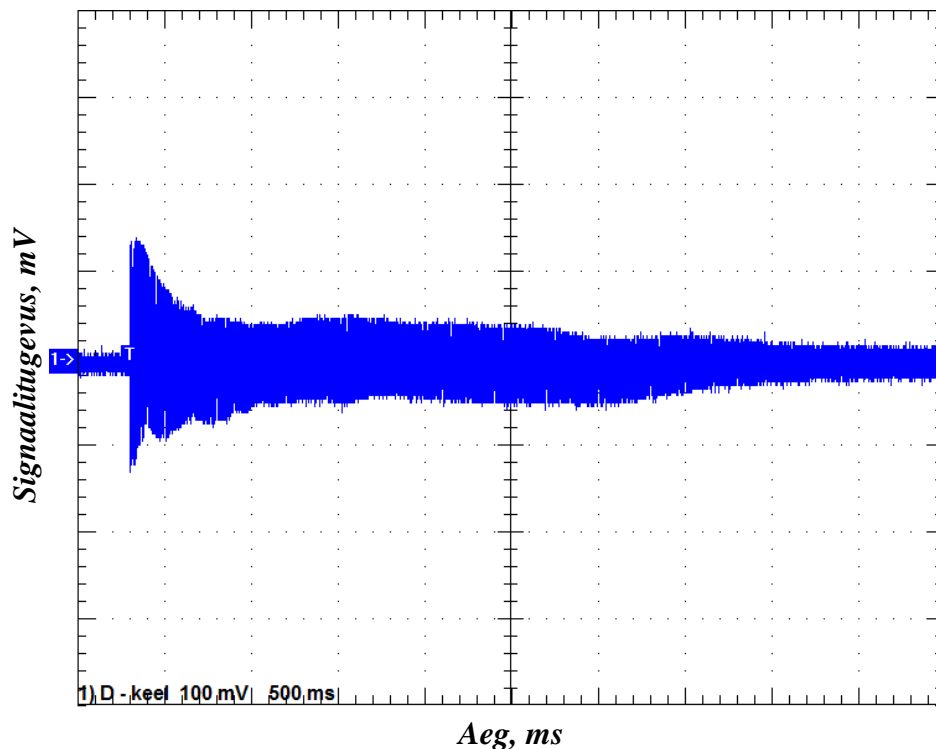
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{6,81818 \text{ ms}} = \frac{1}{0,00681818 \text{ s}} = 146,67 \text{ Hz} \quad (4.3.)$$

Saadud tulemuse võib lugeda ideaalilähedaseks ja pillikeele häälestatud olevaks.



Joonis 4.9. Pillikeele helisignaali kuju (D-keel)

Ka D-keele sumbuvus on uuritud 5 sekundi vältel, kus saadud tulemus erineb varem mõõdetud pillikeelte sumbuvusest (vt joonis 4.10.).

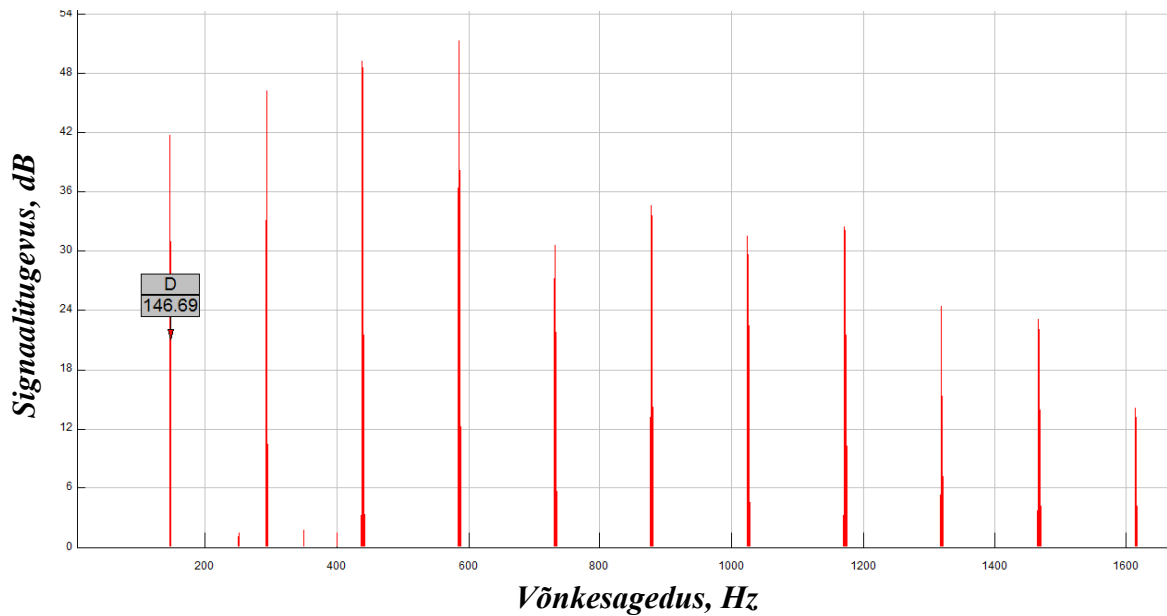


Joonis 4.10. Pillikeele helisignaali sumbuvus (D-keel)

Nimelt on D-keele võnkeimpulss elektrisignaali alguspunktis ligikaudu poole madalam (140 mV) kui A-keele võnkeimpulss, mis tähendab kitarril heliväljundis ühtlasi ka nõrgemat signaali. Samas on edaspidiselt D-keele elektrisignaali puhul palju ühtlasem ja püsivam pingeniivoo 40 mV, mis alles viiendal sekundil kahaneb 20 mV peale.

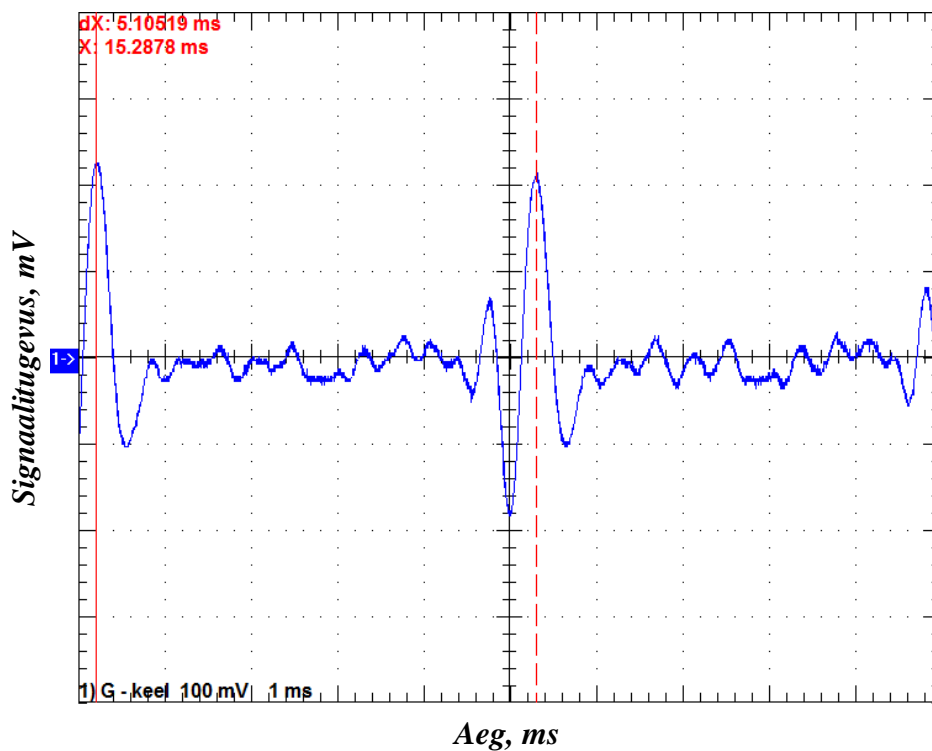
Analüüsis D-keele sagedusspektrit, selgub, et selles leidub kuni 11 arvestatavat kõrgemat harmoonilist signaalikomponenti, kus kõrgeim harmooniline võngub sagedusel 1614,8 Hz (vt. joonis 4.11.).

Seejuures on D-keele põhivõnkesagedus käesolevas näites korrektne ja pillikeel võngub ka praktikas ligilähedaselt 146,8 Hz sagedusega. Võrreldes varasemate tulemustega, on D-keelel vähem kõrgemaid harmoonilisi kui A- või E-keelel.



Joonis 4.11. Pillikeele helisignaali sagedusgraafik (D-keel)

Instrumenti G-keele poolt genereeritud elektrisignaali analüüsimisel on aluseks võetud selle standardhäälestusega paika pandud põhivõnkesagedus 196,0 Hz (vt joonis 4.12.). Selleks, et helisignaalis esinevad põhiharmoonilised signaalikomponendid graafikule mahuks, on kõnealust signaali vaadeldud ajavahemikus kuni 10 ms.



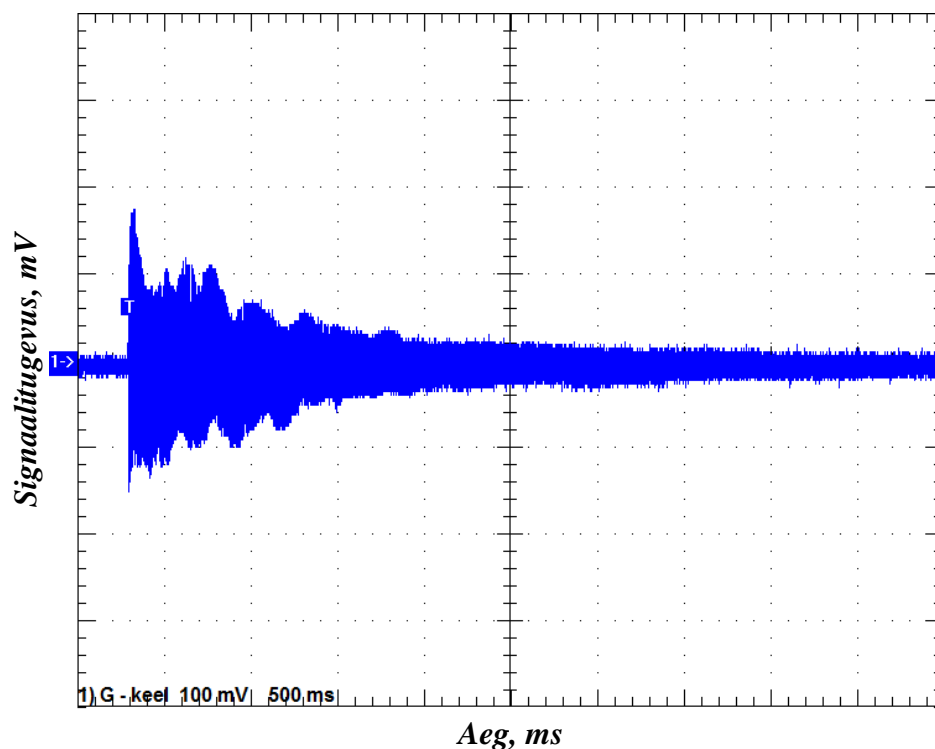
Joonis 4.12. Pillikeele helisignaali kuju (G-keel)

Pillikeele häälestuse kontrollimisel eelneva graafiku alusel saab selle põhivõnkesageduse arvutada järgmiselt:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{5,10519 \text{ ms}} = \frac{1}{0,00510519 \text{ s}} = 195,88 \text{ Hz} \quad (4.4.)$$

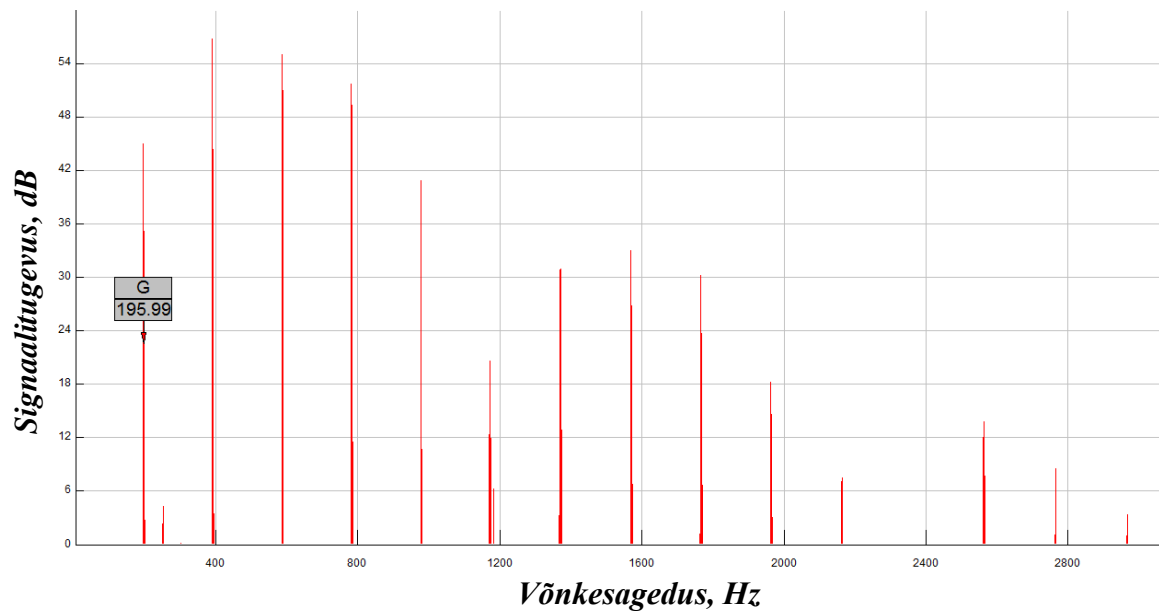
Lähtudes standardhäälestuses oleva pillikeele teoreetilisest võnkesagedusest (196,0 Hz), võib graafikult arvatud tulemusega rahule jääda ja pillikeele häälestatuks lugeda.

Võrreldes G-keele võnkeimpulssi (180 mV) elektrisignaali alguspunktis eelnevate tulemustega, on selle amplituud suurem kui D-keelel, kuid jääb tunduvalt alla A-keele võnkeamplituudile (vt joonis 4.13.). Võrdlemisi kiiresti indutseerib pillikeel püsiva pingeniivoo (20 mV) helisignaali pilli väljundisse. Vaadeldes pillikeele elektrisignaali sumbumist 5 s vältel, kujuneb signaali amplituudiks viimasel sekundil isegi 10 mV.



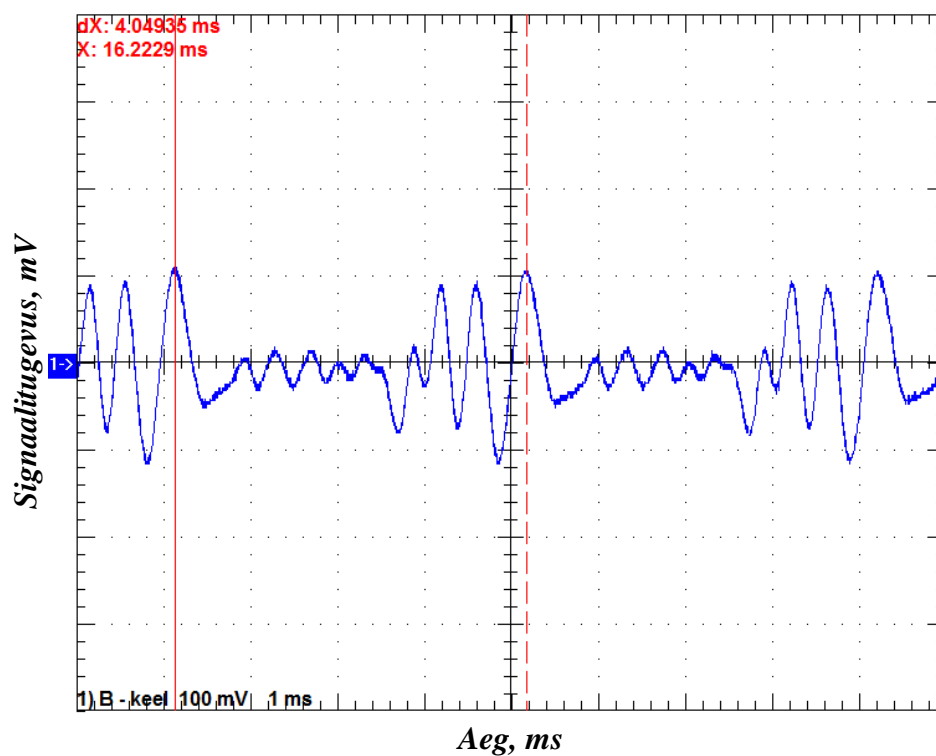
Joonis 4.13. Pillikeele helisignaali sumbuvus (G-keel)

G-keele sagedusspektrit analüüsides tunnistab aga järgnev graafik kuni 15 järku kõrgemate harmooniliste olemasolu helisignaalis (vt joonis 4.14.). Käesolev tulemus on tunduvalt erinev seni analüüsitud pillikeelte sagedusspektritest selle arvestatavate kõrgemate harmooniliste esinemise poolest ning tähendab, et G-keel on võimeline võnkuma sagedusel kuni 2940 Hz.



Joonis 4.14. Pillikeele helisignaali sagedusgraafik (G-keel)

Analüüsisdes B-keele poolt genereeritud elektrisignaali võnkeamplituude, on selles vaevu eristatavad põhisagedusliku signaalikomponendi amplituudid. Seda põhjusel, et paar kõrgema harmoonilisega signaalikomponenti võnguvad põhisageduslikule signaaliosale ligilähedase amplituudiga (vt joonis 4.15.).



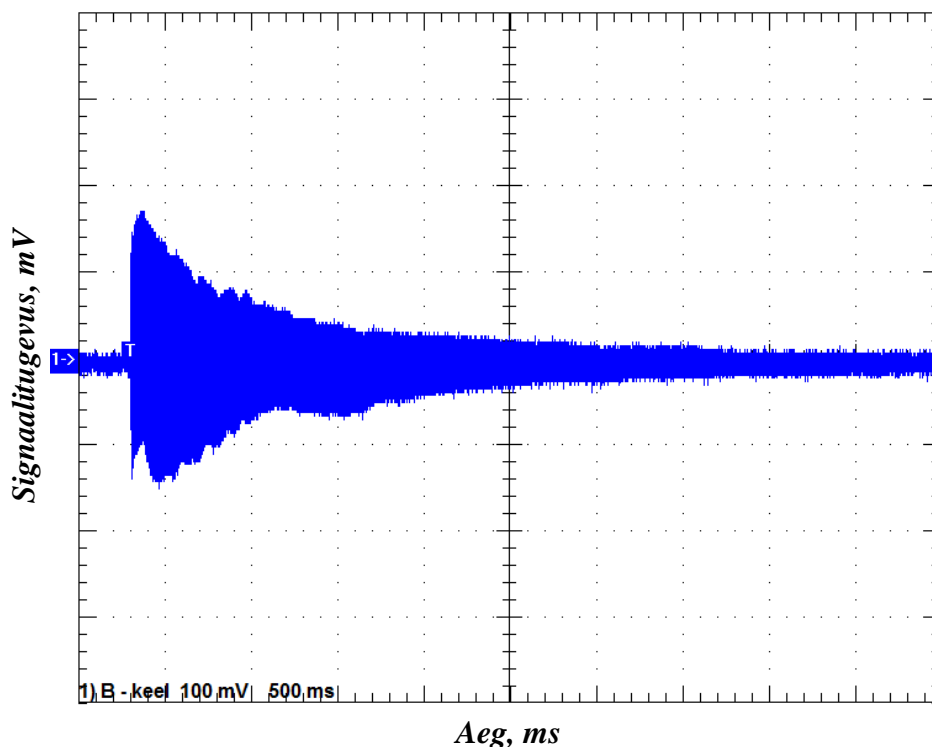
Joonis 4.15. Pillikeele helisignaali kuju (B-keel)

Olenemata helisignaalist raskesti eristuvatest põhisageduslikest harmoonilistest, on võimalik käesoleva graafiku põhjal välja arvutada B-keele võnkesagedus :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4,04935 \text{ ms}} = \frac{1}{0,00404935 \text{ s}} = 246,95 \text{ Hz} \quad (4.5.)$$

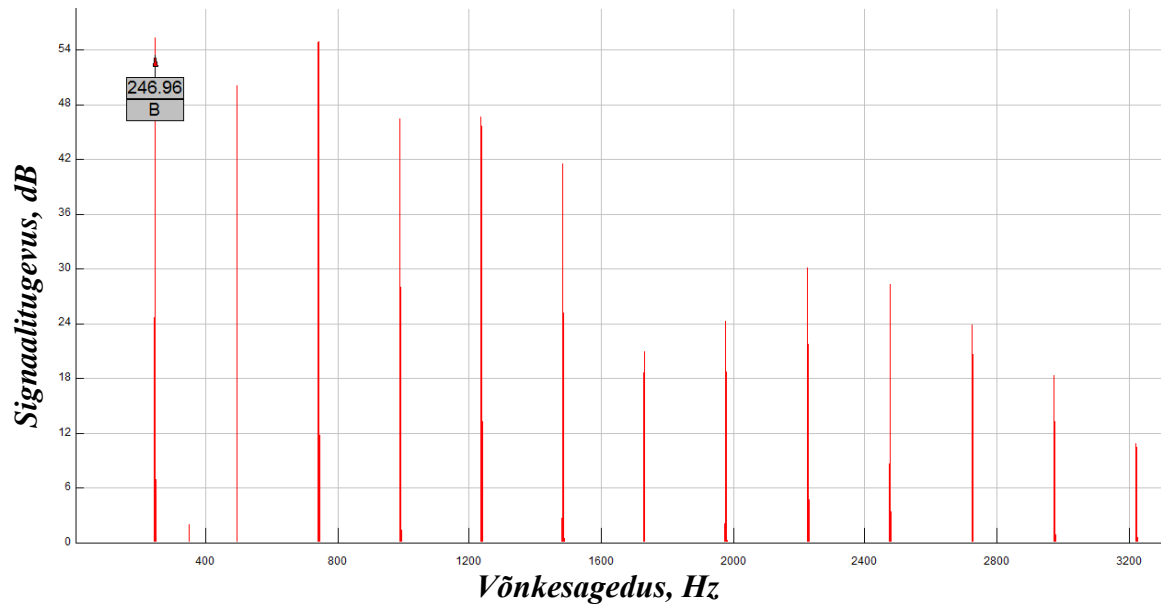
Saadud tulemus ühtib väga väikese varieeruvusega standardhäälestuses oleva B-keelega (246,9 Hz), mille põhjal võib lugeda eelneval graafikul analüüsitud kitarr B-keele häälestatuks.

Järgneval joonisel on välja toodud B-keele sumbuvus 5 s jooksul, kus võib sarnaselt eelnenud G-keelele märgata, et helisignaali võnkeimpulss signaali alguspunktis ei ületa 180 mV (vt joonis 4.16.). Sarnane on ka käesoleva signaali sumbumiskiirus G-keelega võrreldes. Nimelt saavutab signaal juba 2,5 s möödudes 20 mV võnkeamplituudi, mis alles mõõteperioodi viimasel sekundil 10 mV peale kahaneb. Seega on B- ja G-keel sumbuvuse parameetrite põhjal peaaegu eristamatud.



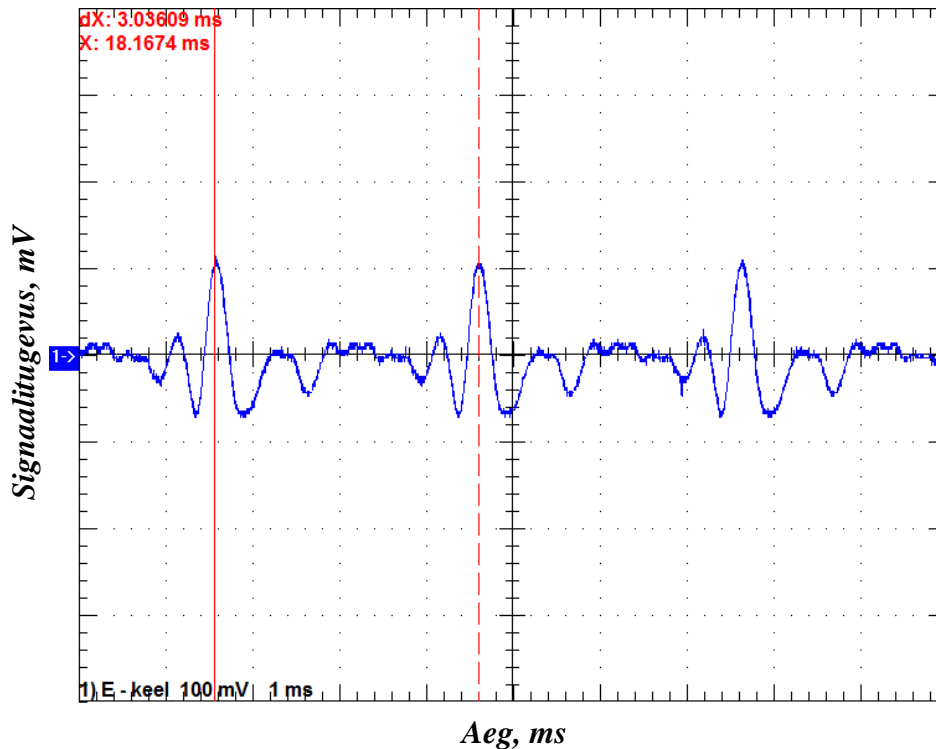
Joonis 4.16. Pillikeele helisignaali sumbuvus (B-keel)

B-keele sagedusspektril võib aga tuvastada kuni 13. järku kõrgema harmoonilise signaalikomponenti, mis võngub sagedusega 3209,7 Hz (vt joonis 4.17.). Jällegi näitab põhisagedusliku signaali komponent sagedusspektril pillikeele ligilähedast häälestatust (246,96 Hz).



Joonis 4.17. Pillikeele helisignaali sagedusgraafik (B-keel)

Vaadeldes järgnevat graafikut, millel kuvatakse E-keele helisignaali 10 ms lõikes, on selgesti eristuvad põhiaharmoonilised signaalikomponendid, millel on oluliselt suurem amplituud kui ülejäänud signaalikomponentidel (vt joonis 4.18.). Saadud tulemus erineb seetõttu suuresti B-keele signaalikujust ja lihtsustab signaali põhivõnkesageduse tuvastamist.

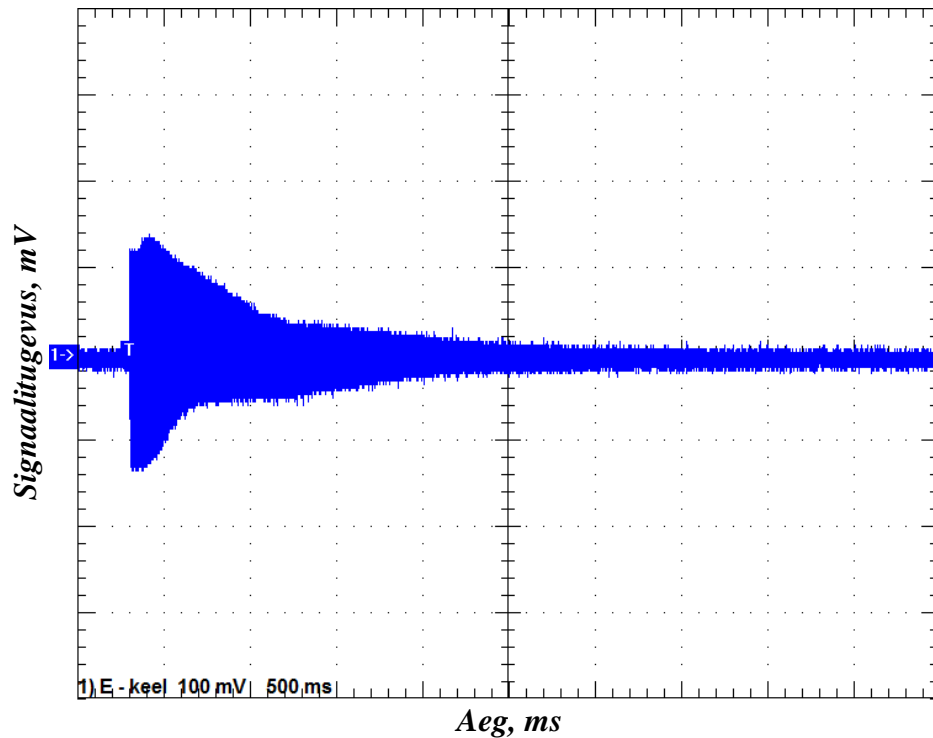


Joonis 4.18. Pillikeele helisignaali kuju (kõrge E-keel)

Kitarri viimane ja ühtlasi kõrge E-keel peab võnkuma standardhäälestuse kohaselt 329,6 Hz sagedusega. Eelneva graafiku põhjal saab lugeda pillikeele võnkesageduse ligilähedaseks standardhäälestuse väärtusele ning kõrge E-keele võib lugeda häälestatuks:

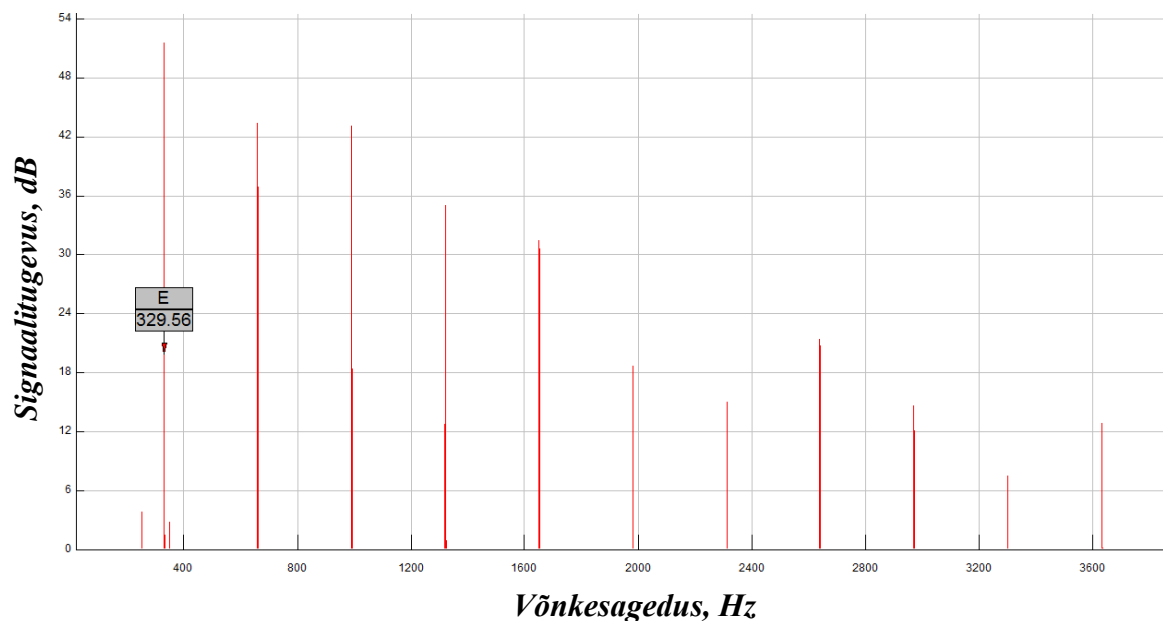
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3,03609 \text{ ms}} = \frac{1}{0,00303609 \text{ s}} = 329,37 \text{ Hz} \quad (4.6.)$$

Kõrge E-keele sumbuvist iseloomustav graafik erineb aga kõigi eelnevate pillikeelte graafikutest (vt joonis 4.19.). Esiteks on senisest madalaima väärtusega elektrisignaali võnkeimpulss signaali alguspunktis (140 mV) ning mis peamine – kitarri väljundisse indutseeritud helisignaali sumbub juba 2,5 s jooksul 10 mV pingeniivooga signaaliks ning püsib sellisena mõõteperioodi lõpuni.



Joonis 4.19. Pillikeele helisignaali sumbuvus (kõrge E-keel)

Kõrgeima pillikeele sagedusspektrit vaadates selgub, et kõrge E-keele poolt indutseeritud helisignalis esineb kuni 11. järku kõrgemaid harmoonilisi (vt joonis 4.20.). Seega, kui pillikeele põhivõnkesagedus on sagedusspektri kohaselt 329,56 Hz, siis helisignaali 11. harmooniline signaalikomponent võngub sagedusel 3625,6 Hz. Antud mõõtmiste puhul on tegemist kõrgeima võnkesagedusega, mida tuvastati katsealusel kitarril.



Joonis 4.20. Pillikeele helisignaali sagedusgraafik (kõrge E-keel)

4.3. Järeldused mõõtmistulemuste põhjal

Võrreldes kõikide pillikeelte võnkesagedusi, võib järeldada, et kuigi alates madalast kuni kõrge E-keeleni eksisteerivad lähtuvalt kitarristandardhäälestusest põhivõnkesagedused vahemikus 82,4...329,6 Hz, siis võttes arvesse ka instrumendi kõrgemaid harmoonilisi, eksisteerivad keeleti 11...15 kõrgeimat harmoonilist. Kõrgemad sageduskomponendid jagunevad sagedusvahemikku 1236,0...3625,6 Hz. Seega olenevalt eesmärgist, tuleb kitarrist väljuva helisignaali töötlemisel maksimaalselt arvestada signaali sagedusvahemikuga 82,4...3625,6 Hz.

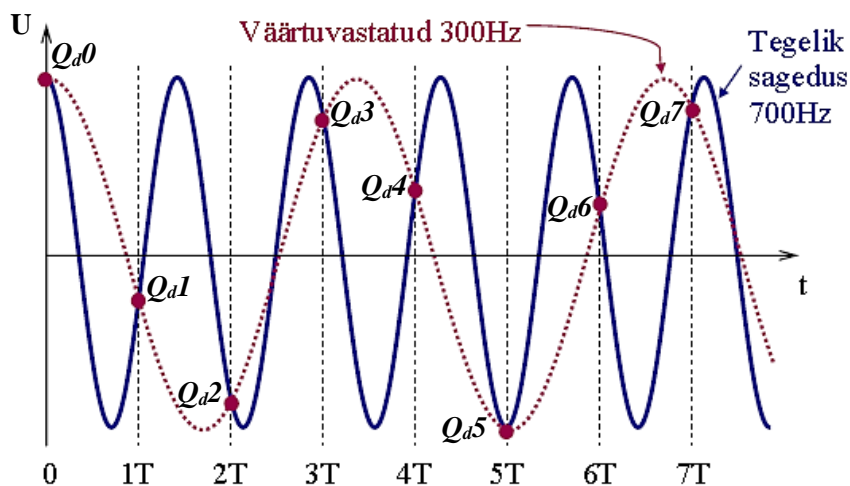
Põhjus, miks enamike pillikeelte sagedusspektrilt võib välja lugeda, et nende põhisagedusliku signaalikomponendi keskmine amplituud 5 s löikes on madalam kui signaalis esinevate kõrgemate harmooniliste amplituudid, peitub pillikeelte võnkumise omapäras pillikaelal. Kui võnkeperioodi esimesel poolel on veel ülekaalus põhivõnkesagedusliku signaalikomponendi amplituudid, siis pillikeele sumbumisel võnkeperioodi teisel poolel sumbub keele põhivõnkesageduslik komponent kiiremini kui selle kõrgemad harmoonilised komponendid ning harmooniliste amplituudid erinevatel võnkesagedustel saavutavad ülekaalu põhisagedusliku signaaliosa amplituudide üle.

Järgmine oluline järeldus puudutab pillikeelte helisignaali võnkeamplituudide võrdlust omavahel, mis võimaldab edaspidi arvestada, kas ja kui palju tuleb kitarrist väljuvat elektrisignaali võimendada, et see oleks kasutajale piisavalt tugev signaal, et seda edasi töödelda. Antud mõõtmistulemuste põhjal tuleb tähelepanu pöörata just pillikeelte sumbuvalt iseloomustavatele graafikutele, kust selgub, et helisignaalist kõrgeim pingeniivoo signaali alguspunktis on olnud madalal E-keelel (400 mV). Samas jäi kõige nõrgemaks kõrge E-keele elektrisignaali võnkeimpulss signaali alguspunktis (140 mV). Olenevalt kasutaja pillikäsitlusest signaalitugevus pilli väljundis varieerub ning keskmiseks pillikeelte poolt indutseeritud elektrisignaali võnkeimpulsiks signaali alguspunktis võiks lugeda 200 mV.

Sämplimisteoreem loob diskreetmissageduse valikuks alustingimuse, mis ütleb, et signaali ideaalne rekonstruktsioon on võimalik vaid sel juhul, kui sämplimissagedus f on suurem kui kahekordne algses signaalis esinev maksimumsagedus f_{max} või vastavalt, kui *Nyquisti* sagedus ehk pool sämplimissagedusest ületab sämplitava signaali suurima sageduse. [10]

$$\tau \leq \frac{1}{2 * f_{max}} \quad \text{või} \quad f \geq \frac{1}{\tau} \geq 2 * f_{max} \quad (5.1.)$$

Madalama diskreetmissageduse kasutamisel, kui seda on signaali spektri kõrgeima harmoonilise komponendi kahekordne sagedus, osutub võimatuks signaalist algse signaali taastamine (vt joonis 5.1.). Joonisel olevad löikepunktid (Q_d) tähistavad edaspidi kvanditud signaali teekonda punktist punktini.

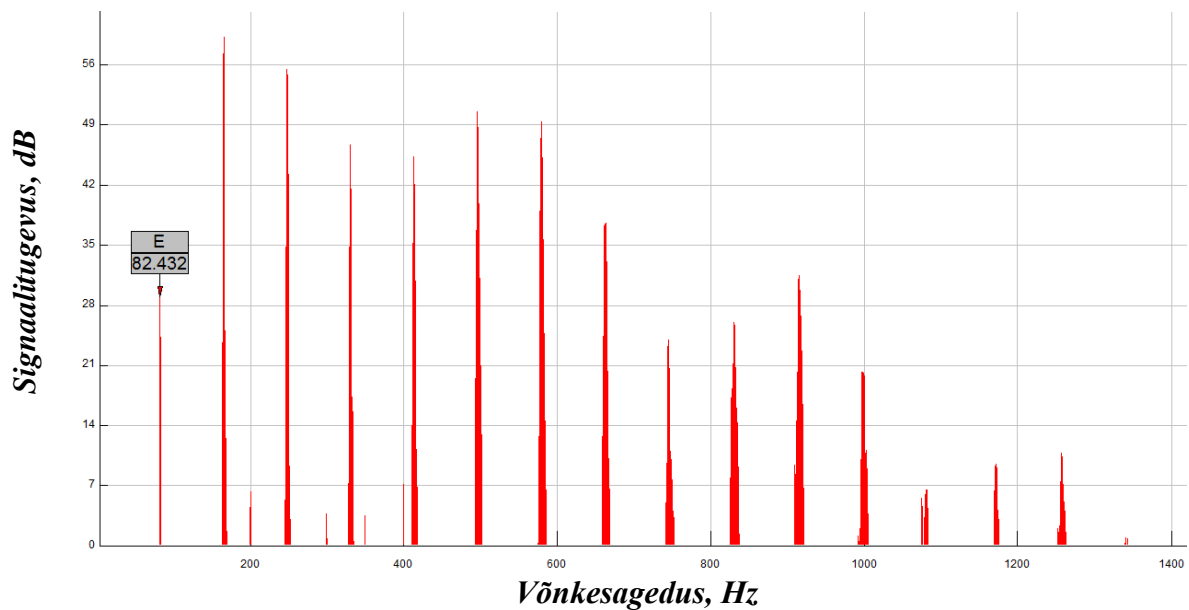


Joonis 5.1. Vale viis algse signaali taastamiseks [12]

Käesolevas töös peab häälestusstend olema võimeline veatult tuvastama kitarrikeelte põhiharmooniliste võnkesagedusi sagedusvahemikus 0...329,6 Hz ja pisut rohkemgi (vt tabel 4.1.).

Teisisõnu tuleb sämplimisteoreemist lähtudes arvestada, et kui kitarrist tuleva helisignaali põhivõnkesagedus ulatub ligikaudu 330 Hz-ni, siis antud signaali on võimalik hakata alles rekonstrueerima hetkest, kus diskreetimissagedus on suurem kui kahekordne kõige peenema pillikeele võnkesagedus (kõrgeim võnkesagedus), ehk siis suurem kui 660 Hz.

Küll aga vajab uuesti mainimist, et pillikeele võnkumisel eksisteerivad lisaks põhisedusele ka selle põhiseduse kordsed kõrgemad harmoonilised, kus kitarrikeele võngete sumbumisel võivad tekkida kuni 22. kordsed harmoonilised (vt tabel 4.1.). Näitena on välja toodud madalaima põhivõnkesagedusega E-keele (82,4 Hz) sagedusspekter, kus võib näha kuni 15-ne kordseid kõrgemaid harmoonilisi signaalikomponente (vt joonis 5.2.). Lisaks sellele tekib mõõdetavasse signaali ka muud müra ja kõikvõimalikke sagedusi, mis on tingitud pillikeelte juhuslikest kokkupuudetest kitarril kriffidega pilli lohakal häälestamisel.



Joonis 5.2. Pillikeele helisignaali sagedusgraafik (madal E-keel)

Kuigi sãmplimisteoreem annab olulise tingimuse, mis on helisignaali diskreetimise aluseks, on see vaid osaline lahendus, mis aitab mõista põhitõdesid helisignaali veatul rekonstrueerimisel. Ideaalseks helisignaali ülesvõtmiseks tuleb arvestada selle kõrgeima võnkesagedusega signaalikomponendi perioodi peale kümme või enam mõõtepunkti, mis tähendab sisuliselt kümnekordset sãmplimissagedust võrreldes signaali võnkesagedusega. Eelmises peatükis avaldatud mõõtmistulemuste põhjal eksisteerib kitarril kõrgeima võnkesagedusega harmooniline kõrge E-keele sagedusspektris (6945,3 Hz), mis vajaks sellisel juhul sãmplimissagedust kuni 70 kHz.

Sellegipoolest, olenemata põhisedusele lisanduvatest kõrgematest harmoonilistest, ei ole pillikeele võnkesageduse tuvastamisel nendest otseselt kasu ja häälestusstendi veatuks tööks piisab juba varem viidatud sagedusvahemikust (0...330 Hz). Seda põhjusel, et kitarril

häälestamisel peab programm suutma eristada üldisest helisignaalist just pillikeelte põhivõnkesagedusega signaalikomponendid. Küll aga tuleks arvestada sagedusvahemiku väikese juurdekasvuga kuni 400 Hz-ni, sest kõrge E-keel võib olla standardhäälestusest nihkes ja võnkuda kõrgema põhivõnkesagedusega, kui seda on 329,6 Hz.

Seejuures on põhisagedusest oluliselt madalamate sageduste tuvastamine vajalik olukorras, kus kitarrile on paigaldatud uued keeled, mis vajavad 0-st häälede keeramist. Selliselt mõistab häälestusstend ka madalamaid sagedusi ning kuvab neid ekraanil, samas viidates valgusdiodindikaatoritega, et pillikeel on oluliselt nihkes etteantud võnkesagedusest.

Kokkuvõtvalt, lähtudes põhimõttest, et inimkõrvale kuuldav sagedusvahemik jääb 16 Hz ja 20 kHz vahele, on siiski käesolevas töös kasutatavas signaalitöötluses valitud diskreetimissageduseks 40 kHz, mis on üldiselt laialt kasutatav sagedus kõikvõimalike helisignaali diskreetimisel ja võimaldab ühtlasi kitarril häälestamisel programmisel tuvastada kogu pillikeele sagedusspektrit.

Seejuures on arvesse võetud kõikide häälestusprotsessis olevate seadmete füüsilisi sageduspiiranguid, mis on võimalised töötama kindlaksmääratud sagedusvahemikus ning põhjustavad signaalimoonutusi väljaspool neid piire (vt tabel 5.1.).

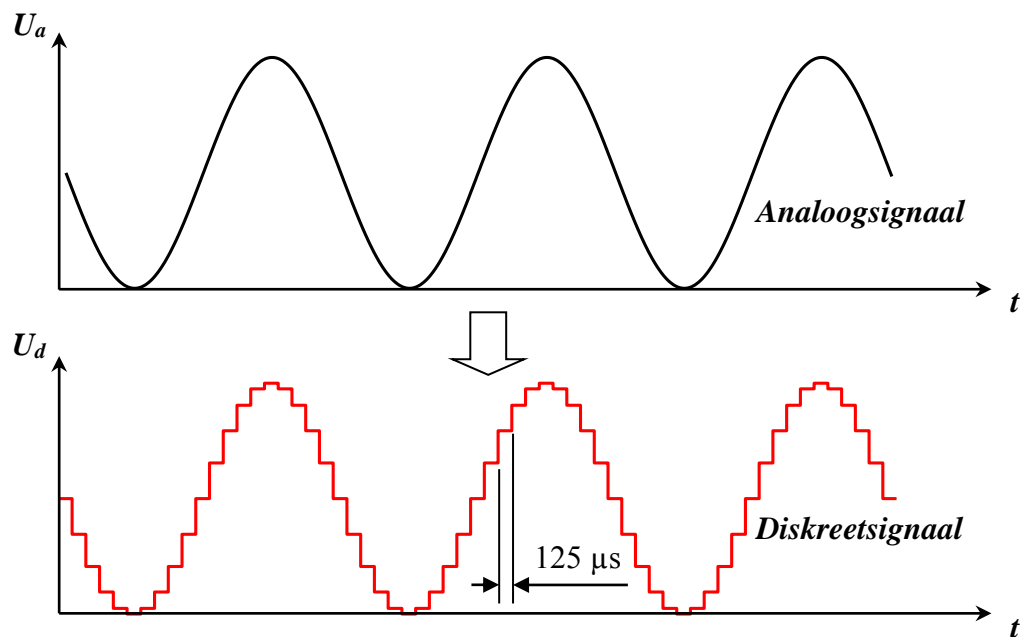
Tabel 5.1. Helisignaali töötlevad seadmed

<i>Seade</i>	<i>Sagedusvahemik</i>
Kitarril helipea	28...20 000 Hz
Signaali võimendusahel	0...55 950 Hz
Operatsioonivõimendi	0...1 000 000 Hz

5.2. Mikrokontrolleri A/D muunduri töösageduse seadistamine

Praktikas ja ka käesolevas töös toimub pidevsignaali diskreetimine mikrokontrolleri analoog-digitaalmuunduri (*analog-to-digital converter, ADC*) abil, mis on tavaliselt paljude füüsiliste piirangutega ideaalikaugese aparaat ja mille töö tulemused lahknevad tublisti teoreetilisest ideaalsest rekonstruktsioonist, väljendudes helimoonutustes. [13]

Antud töös saabub elektrisignaali võimendusahelast juhtarendusplaadi analoogsisendis A0 (vt lisa 1). Teadagi on Arduino programmeerimiskeskkonnas *Arduino IDE 1.5.5-r2* kõige käepärasem viis lugeda analoogsignaali käsuga *analogRead()*, mis konverteerib analoog-digitaalmuunduris *ADC* analoogsignaali 10-bitiliseks digitaalsignaali. Selliselt mõistab arendusplaadil olev mikrokontroller 0...5 V sisenevat analoogsignaali kui digitaalsignaali arvvaheemikus 0...1023 (vt joonis 5.3.). Joonisel olevad tähised U_a ja U_d tähistavad vastavalt analoogsignaali ja digitaliseeritud signaali pinget.



Joonis 5.3. Analogsignaali diskreetimine sagedusel 8 kHz

Paraku saab aga selle meetodi kasutamisel piiravaks teguriks analoogsignaali madal diskreetimissagedus. Nagu eelnevalt jooniselt näha võib, jäljendab mikrokontrollerplaat iga 125 μ s järel sisendsignaali kuju. Selliselt arvutub signaali diskreetimissageduseks (f_d) 8 kHz :

$$\text{Diskreetimissagedus } f_d = \frac{1}{T} = \frac{1}{125 * 10^{-6} \text{ s}} = 8 \text{ kHz} \quad (5.2.)$$

Et tuvastada kitarril häälestamisel kogu pillikeele sagedusspektrit ning helisignaalis esineda võivaid alternatiivseid signaali kujusid, mis ei pruugi kaugelki sarnaneda tüüpilisele siinussignaali kujule, on helisignaali kvaliteetseks muundamiseks valitud sageduseks juba varem mainitud 40 kHz.

Selleks, et käesoleval mikrokontrolleril saavutada selline kiirus, tuleb loobuda alamprogrammi *analogRead()* kasutamisest ning A/D-(analoog-/digitaal-)muundur oma programmiga seadistada ühele mõõtekanalile. Selline seadistus välistab edaspidi teiste analoogsisendite kasutamise võimaluse.

Mikrokontrolleri sisendisse A0 saabuva analoogsignaali iga uue punkti muundamine võtab aega 13 tsüklit. Käesolevas töös on A/D-muunduri taktsagedus on seadistatud sagedusele 500 kHz (taktsageduse jagur 32). A/D-muunduri töötsükli maksimumsagedus on seega:

$$\text{Diskreetimissagedus } f_d = \frac{f}{\text{tsükliid}} = \frac{500 * 10^3 \text{ Hz}}{13} = 38,5 \text{ kHz} \quad (5.3.)$$

Selliselt on signaali diskreetimise sageduseks ligilähedaselt 40 kHz ja signaali jäljendamine toimub iga 26 μ s tagant.

Lisaks eelpool öeldule loetakse mikrokontrollerplaadi sisendist A0 10-bitiliste arvude asemel hoopis 8-bitilisi arve 8-bitilisest registrist, sest tegemist on 8-bitilise mikrokontrolleriga. Sellega saavutatakse väiksem ajakulu (vähem protsessori töötakte) programmi tsükli täitmisel ning jäetakse lugemata kasutajale kaks ebavajalikku bitti, kus edaspidi on sisendi A0 väärtused ka sellevõrra väiksemas arv väärtusvahemikus 0...255.

Kogu analoogsignaali analüüs toimub omaette katkestuse abil käitatavas alamprogrammis *ISR(ADC_vect)*, mida käivitatakse mikrokontrolleri taimeriga segamatult iga 26 μ s tagant. Mõõtetulemuse suurima kohakaaluga osa loetakse registrist *ADCH* ja selle põhjal arvutatakse tõus ajaühikus kasutades eelneva tsükliga salvestatud väärtust. Tuvastatud perioodide põhjal arvutatakse juba programmi tsükli *loop()* nende võnkesagedusi (Hz).

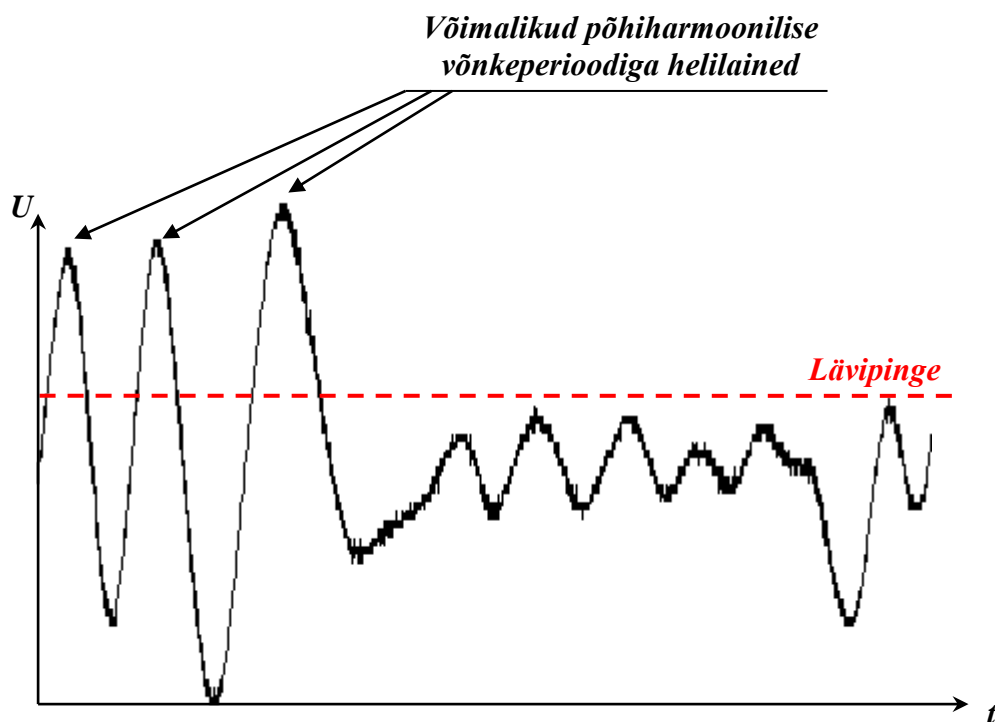
5.3. Pillikeele põhiharmoonilise sageduse tuvastamisalgoritm

Analoogsignaali analüüsimisel katkestussignaaliga käitatavas alamprogrammis arvestatakse sellega, et signaali võimendusahelast analoogsisendisse A0 saabuv elektrisignaali võngub pingevahemikus 0...5 V.

Esimese tingimusega sorteeritakse sisenevast analoogsignaalist välja helilained, mis lõikavad etteantud lävipinget 2,5 V. A/D-muundurist 8-bitiste arvude lugemisel kasutab programm seega sisendväärtusi vahemikus 0...255. Sisendsignaali läviväärtuseks on seega arv väärtus 127, mis on nullnivoost veidi kõrgem.

Sellisel viisil välditakse mikrokontrollerplaadi sisendis A0 ka üleliigse müra arvestamist, kus programm jätab kõrvale kõik need helilained ja võnkumised, mis jäävad allapoole etteantud lävipinget.

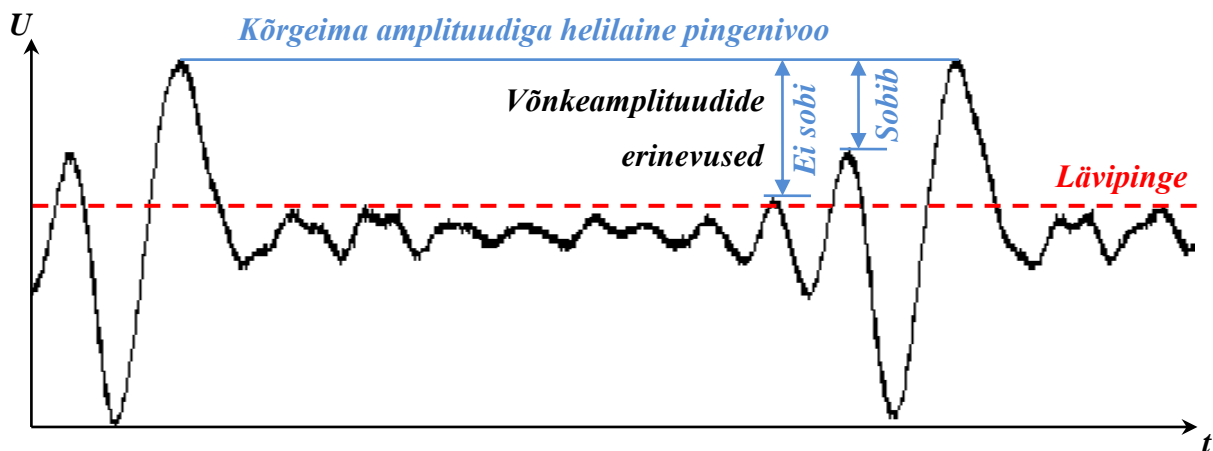
Teades, et helisignaalis esinevad põhiharmoonilise sagedusega helilained on signaali alguses alati suurema amplituudiga kui selle kordsed kõrgemad harmoonilised ning ülearune müra, mis on tingitud häälestussüsteemi ebatäiuslikkusest, ongi saavutatud juba piisav filter, mis lihtsustab oluliselt edaspidist tööd põhiharmooniliste sageduse leidmisel (vt joonis 5.4.).



Joonis 5.4. Põhiharmooniliste helilainete filtreerimine B-keele helisignaali põhjal

Järgmine oluline kriteerium helisignaalist põhiharmooniliste leidmisel on seotud signaalis esinevate võnkeamplituudidega. Nimelt võrdleb programm pidevalt lävipinge (2,5 V) ületanud helilainete võnkeamplituude senise suurima helilaine (*maxSlope*) amplituudiga, mis on programmis esinenud.

Lähtuvalt põhimõttest, et mikrokontrollerplaadi analoogsisendist loetav elektrisignaal on teisendatud arvvaartuseks vahemikus 0...255, on meelevaldselt antud muutujale *slopeTol* väärtus 3, mis tagab, et uut helilainet arvestatakse kui põhiharmoonilist signaalikomponenti juhul, kui käesoleva ja eelneva maksimaalse amplituudiga helilaine (*maxSlope*) amplituudide erinevus ei ületa 3 ühikut (vt joonis 5.5.). See tähendab, et vaadeldavate helilainete amplituudid ei tohi elektrisignaalis teineteisest erineda rohkem kui 0,06 V. Vastasel korral unustab programm vaadeldava helilaine ja asub järgmist võnkeamplituudi võrdlema eelnenud maksimaalse helilainega.



Joonis 5.5. Põhiharmooniliste helilainete filtreerimine A-keele helisignaali põhjal

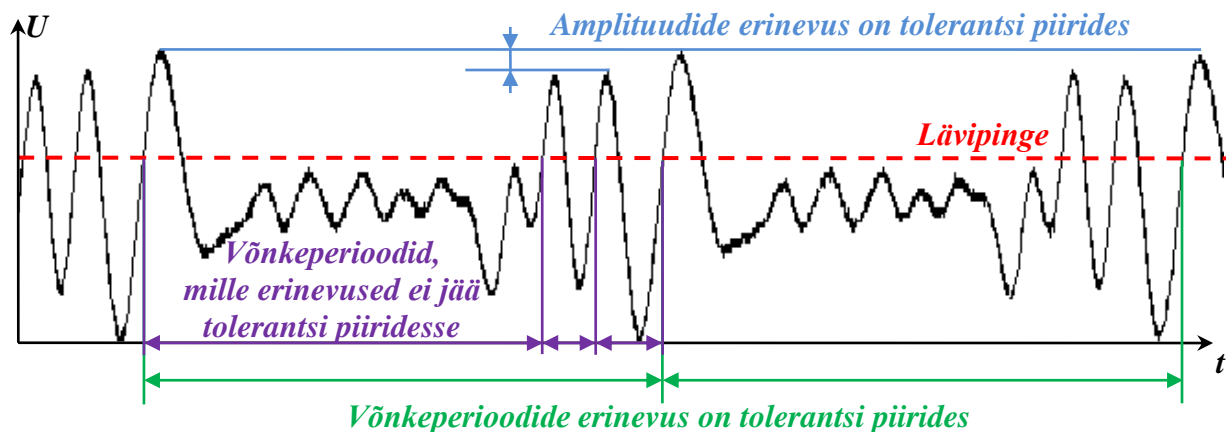
Selline elektrisignaali filtreerimine võimaldab kasutajal eemaldada põhisageduslikule signaalile ka kõige ligilähedasemad helivõnked, mis tagab väga täpse põhiharmooniliste järgimise kogu signaalitöötlusprotsessi vältel.

Kasutajal on ka võimalus tõsta oluliselt muutuja *slopeTol* väärtust juhul, kui signaalitöötluses tuleb eristada omavahel väga järskude amplituudidega helilaineid. Selliselt on programm vastuvõtlikum helivõngete suurematele erinevustele ja signaalist on endiselt võimalik eristada põhisageduslikke helilaineid. Käesoleval juhul on aga mõõdetavas elektrisignaalis signaali võnkeamplituudid maksimaalselt 1 V ning kitarril häälestamisprotsessis ei esine järsked ja suure varieeruvusega helivõnkeid. See lubabki hoida muutuja *slopeTol* väärtuse madalana.

Lisaks elektrisignaalis esinevate võnkeamplituudide võrdlemisele kontrollib programm paralleelselt lävipinget ületanud helilainete võnkeperioode. Põhjus selleks peitub idees, et

lävipinget võivad ületada ka mitte põhiharmoonilise sagedusega helilained, mille võnkeamplituudide erinevused võivad jääda põhisagedusliku helilaine võnkeamplituudiga võrreldes tolerantsi piiridesse (amplituudide erinevus $< slopeTol$).

Juhul kui tekib selline olukord, võrreldakse programmisiseselt vaadeldava helilaine võnkeperioodi senise suurima amplituudiga helilaine ($maxSlope$) võnkeperioodiga (vt joonis 5.6.). Nimelt peab jääma mõõdetava helilaine võnkeperiood võrreldes maksimaalse amplituudiga helilaine perioodiga tolerantsi piiridesse. Vastav tolerants on aga meelevaldselt ette antud muutuja $timerTol$ väärtusena, milleks on käesolevas programmis 10 ühikut.



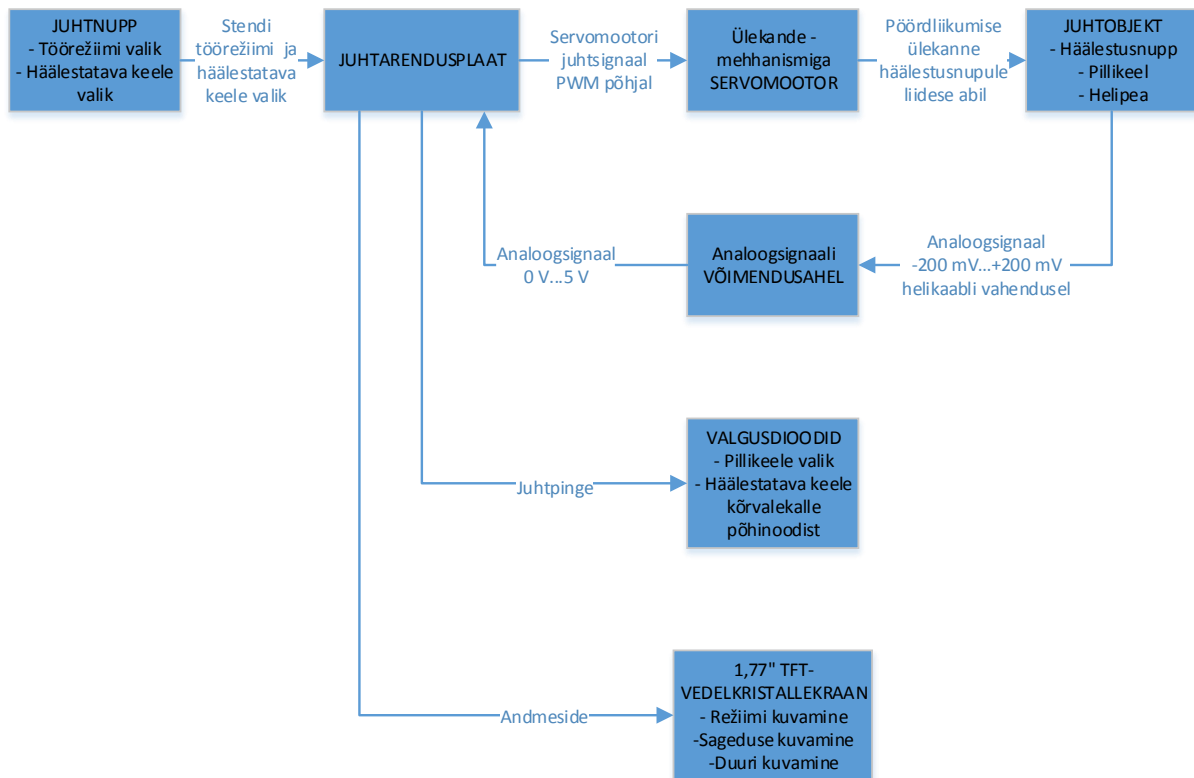
Joonis 5.6. Põhiharmooniliste helilainete filtreerimine B-keele helisignaali põhjal

Tingimusel, kus põhisageduslike helilainete vahetus läheduses paiknevad võrdväärse võnkeamplituudiga helilained, mida programm peab välistama, on soovitatav muutuja $timerTol$ väärtust langetada kuni kolm korda. Selliselt on programm võimeline eristama ka kõige raskemini monitooritavast elektrisignaalist põhisageduslikke helilaineid.

Eelpool kirjeldatud kolm põhikriteeriumit tagavadki kasutajale veatu instrumendi häälestusprotsessi, kus häälestusstendil kasutatavale mikrokontrollerplaadile laetud programm filtreerib kitarrist tulnud helisignaalist põhiharmoonilisi ja arvutab nende põhjal välja põhisagedusliku heli sageduse.

6. HÄÄLESTUSSÜSTEEMI TÖÖPÕHIMÕTE

Käesolev osa kirjeldab lühidalt häälestusstendil arendatavat häälestusprotsessi, kus on pööratud tähelepanu just süsteemi tööpõhimõttele ning ülesehitusele (vt joonis 6.1.).



Joonis 6.1. Häälestussüsteemi ülesehitus

Välja on toodud süsteemi juhtsignaali teekond läbi peamiste töös kasutatavate komponentide, milleks on arendusplaadil olev mikrokontroller, pidevpöörlev servomootor, analoogvõimendi ning juhtareendusplaadi analoogsisend.

Töö visualiseerimiseks kasutajale (tegemist on poolautomaatse juhtimissüsteemiga) on seadmel valgusdiiodindikaatorid, vedelkristallkuvar, pealüliti toiteahela sulgemiseks ja juhtnupp programmis valikute tegemiseks.

Üldiselt rakendatakse kogu häälestusstend tööle stendil olevast pealülitist S1, misjärel on võimalik juba edaspidine stendi kasutamine (täpsem kirjeldus peatükis 8.2.). Käesoleval juhul

ei ole aga häälestussüsteemi tööpõhimõtte kirjeldamisel oluline süsteemi toitelahendus ning selle juurde tullakse hiljem (vt ptk 7.4.).

Järgmine tegevus häälestusstendi käsitlemisel on juhtnupuga S2 välja valida stendi töörežiim - vastavalt siis manuaal- või automaatrežiim, misjärel on võimalik hakata instrumenti häälestama. Režiimivalik tagab juhtarendusplaadil režiimile kohaste alamprogrammide tööle rakendumise, kus peamine erinevus kahe režiimi vahel põhineb käsitsi või servomootoriga häälestamises. Automaathäälestuse korral on kasutaja kohustatud valima juhtnupu abil ka selle, millist pillikeelt hakatakse edaspidi häälestama.

Instrumenti häälestamisel tõmbab kasutaja pillil vastavat keelt, misjärel kitarril helipea keele võnkesageduse magnetvälja muutusel kinni püüab ning seejärel ± 200 mV analoogsignaali mööda helikaablit juba signaali võimendusahelasse saadab.

Analoogsignaali võimendusahel võimendab sissetuleva signaali juhtarendusplaadile piisava amplituudiga signaaliks 0...5 V, millest arendusplaadi mikrokontrollerisse laetud C++-keelne programmikood eristab juba põhiharmonilised ja nende sageduse.

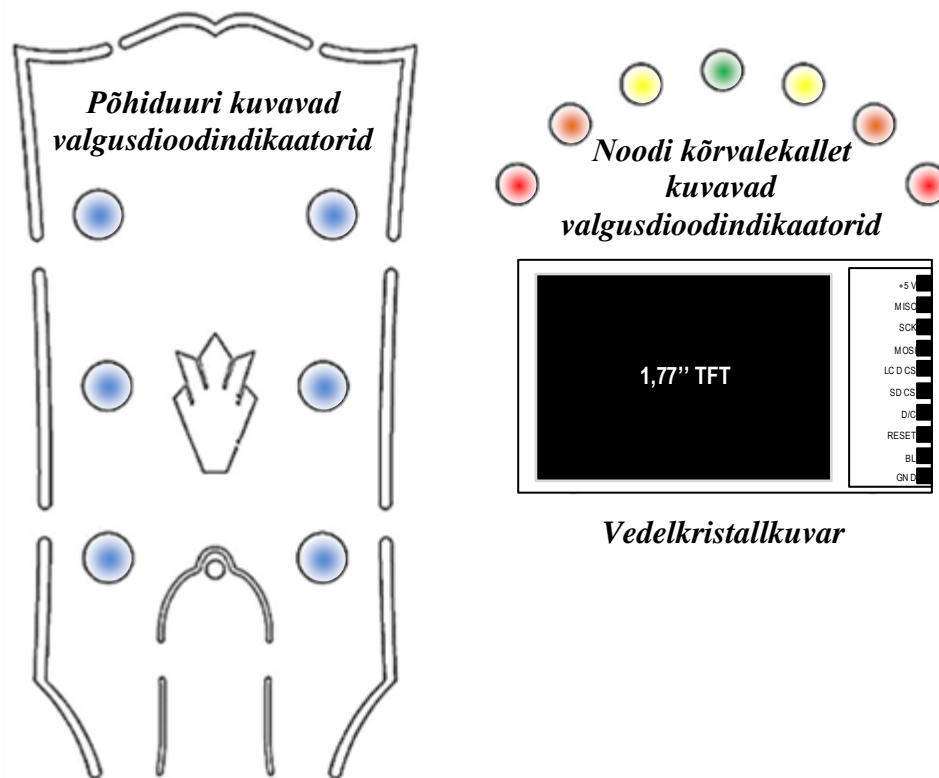
Vastavalt pillikeele põhivõnkesagedusele reageerib juhtarendusplaat, millises suunas ja kui kiiresti peab servoajam pöörama, et pillikeel korrektselt häälede keerata. Seejuures pöörab servoajam ülekandeliidese abil kitarril häälestusnuppu seni, kuni vastav pillikeel võngub vajalikus sagedusvahemikus. Kui pillikeel on hääles, lõpetab servomootor oma töö ja häälestusstend ootab automaatrežiimis kasutaja poolt, millist keelt järgmisena häälestama hakatakse.

Servoajami juhtimine toimub aga pulsilaiusmodulatsiooni teel (*pulse width modulation, PWM*), kus 1...2 ms impulsid rakendavad servoajami vastavas suunas tööle.

Manuaalrežiimi korral puudub kasutajal vajadus juhtnupuga valida, millist pillikeelt häälestama hakatakse ning stend on konstantselt valmis erinevaid pillikeeli häälestama.

Häälestusstendile integreeritud sinised valgusdiodindikaatorid näitavad kasutajale kogu häälestusprotsessi jooksul nii manuaal- kui automaatrežiimil, millist pillikeelt parajasti

häälestatakse ning seitse värvilist valgusdiodi kuvavad kasutajale häälestatava pillikeele võnkesageduse kõrvalekallet vastava duuri põhisagedusest. Seejuures on häälestusstendi visuaalne pool paigutatud stendi esipaneelile viisil, mis teeb häälestusprotsessi võimalikult ülevaatlikuks (vt joonis 6.2.).



Joonis 6.2. Häälestusstendi esipaneeli kujundus

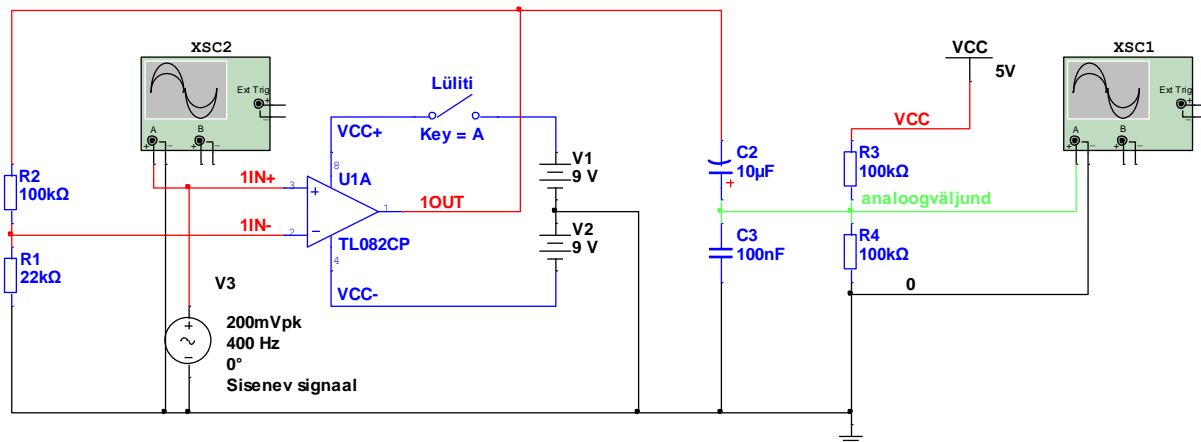
Lisaks valgusdiodindikaatoritele on häälestusprotsessi ilmestamiseks ühendatud juhtarendusplaadile vedelkristallkuvar, millel kajastatakse stendi töörežiim, pillikeele võnkesagedus hertsides ning vastava keele põhiduur. Kogu häälestusprotsessi lõpetab pealüliti ümberlülitus, mis katkestab kogu süsteemi toiteahela.

7. KOMPONENTIDE VALIK JA PÕHJENDUS

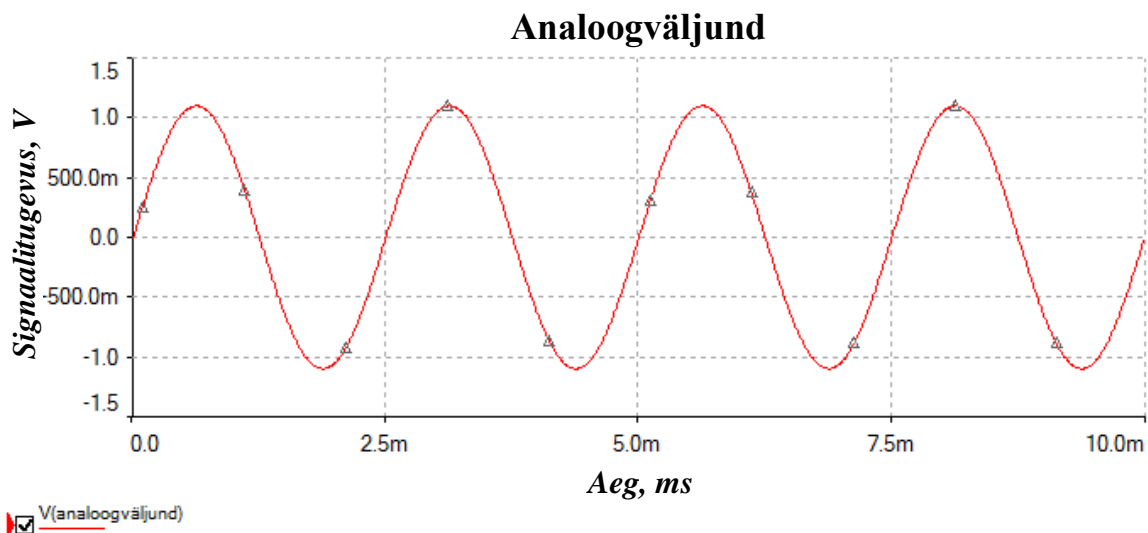
7.1. Analoojahela komponentide valik

Häälestusprotsessis kasutatava signaalivõimendi eesmärk on võimendada kitarrist tulevat signaali, mis jääb reeglina pingevahemikku (± 200 mV) selliselt, et see oleks signaali vastu võtvale mikrokontrollerplaadile piisava amplituudiga analoogsignaali (0...5 V).

Analoojahela peamiseks elemendiks on valitud operatsioonivõimendi *TL082CP Dual JFET* (*Junction Field-Effect Transistor*), mida toidetakse kahe 9V E-block liitiumpatareiga (vt joonis 7.1.) Sisenevat elektrisignaali (*IIN+*) võimendatakse esialgu operatsioonivõimendi väljundisse (*IOOUT*) selliselt, et ümber 0-i pulseeriv signaal (± 200 mV) hakkaks väljundis ümber 0-i võnkuma amplituudiga 1 V (vt joonis 7.2.). Signaali võimendusahela katsetamisel on kasutatud elektrialhela simuleerimiskeskonda *Multisim*. Ahelas toimuvate protsesside analüüs on tehtud joonisel tähistatud ostsilloskoopide *XSC1* ja *XSC2* abil.

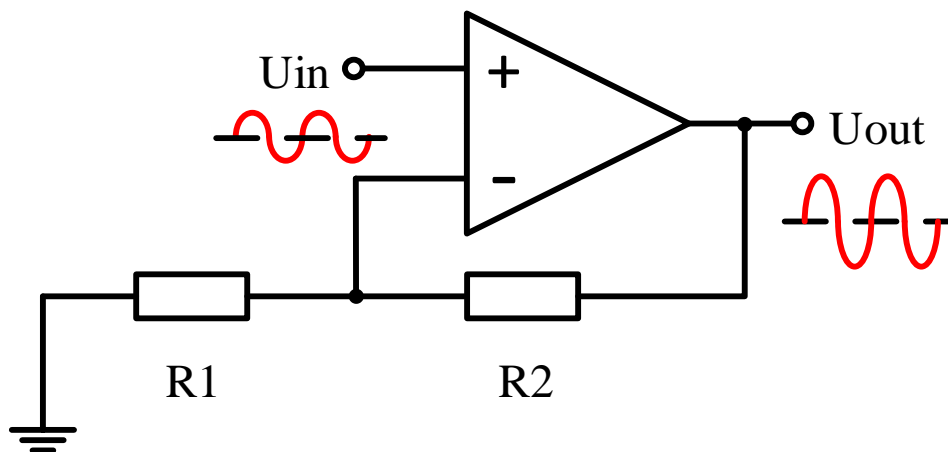


Joonis 7.1. Analoojsignaali võimendusahel



Joonis 7.2. Võimendusahela esialgne analoogväljund ± 200 mV korral

Et väljundisignaali võnguks samas faasis operatsioonivõimendisse siseneva signaaliga, on tarvis ühendada võimendi mitteinverteeriva konfiguratsiooni alusel. Nimelt eksisteerivad operatsioonivõimenditel nii invertseerisend (-) kui mitteinvertseerisend (+). Seejuures pööratakse invertseerisendis pingepiir 180° võrra ja pingemuutus on väljundis vastassuunaline, kuid mitteinvertseeriv sisend tagab väljundis antud juhul vajaliku samasuunalise pingemuutuse (vt joonis 7.3.).



Joonis 7.3. Mitteinvertseeriva operatsioonivõimendi konfiguratsioon

Vastus, kuidas saada väljuv analoogsignaali just 1 V amplituudiga võnkuma, peitub hetkel takisti valimises võimendi kanalite $IIN+$ ja $IIN-$ vahel ehk siis analoogsignaali sisendi ja 0-i vahel.

Järgnevad arvutused on omased just mitteinverteerivale operatsioonivõimendi konfiguratsioonile ning väljendavad selgelt takisti valiku põhjust:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad \text{või} \quad (7.1.)$$

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (7.2.)$$

kus siis R_2 on tagasiside takistus, mis on antud juhul $100 \text{ k}\Omega$ ja R_1 takistusega $22 \text{ k}\Omega$ suundub maandusesse ning reguleerib ühtlasi väljundsignaali amplituudi. Seejuures U_{in} on sisendsignaali amplituud, mis on signaali simuleerimisel seatud 200 mV ja U_{out} on väljundsignaali amplituud, mis reaalsuses jääb ligilähedane joonisel 7.2. kujutatuga ehk siis 1 V .

Lähtuvalt tingimustest, et $R_1=22 \text{ k}\Omega$, $R_2=100 \text{ k}\Omega$ ja $U_{in}=200 \text{ mV}$, on võimalik leida sisendsignaali võimendava operatsioonivõimendi TL082CP võimendustegur:

$$k = 1 + \frac{100}{22} = 4,55 \quad (7.3.)$$

Sellest järeldub omakorda väljundsignaali amplituud:

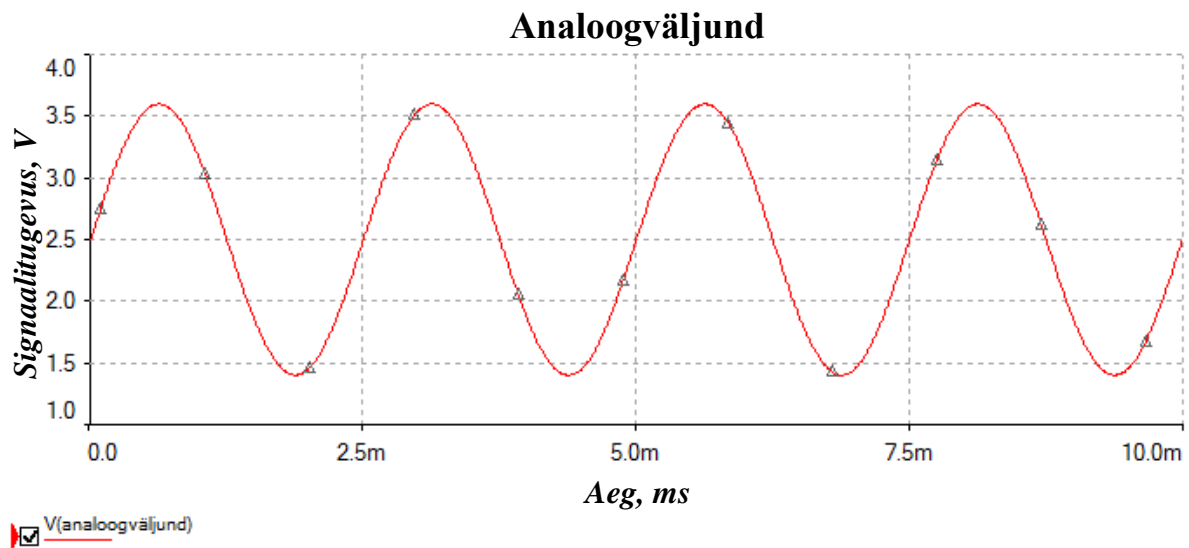
$$U_{out} = 200 \text{ mV} \cdot 4,55 = 910 \text{ mV} = 0,91 \text{ V} \approx 1 \text{ V} \quad (7.4.)$$

Käesolev lahendus sobib kenasti ka olukorras, kus võimendatava elektrisignaali pingeniivo peaks tõusma 400 mV -ni, mis on omane vaid madala E-keele poolt genereeritavale helisignaalile. Selliselt arvutub väljundsignaali amplituud järgmiselt :

$$U_{out} = 400 \text{ mV} \cdot 4,55 = 1820 \text{ mV} = 1,82 \text{ V} \quad (7.5.)$$

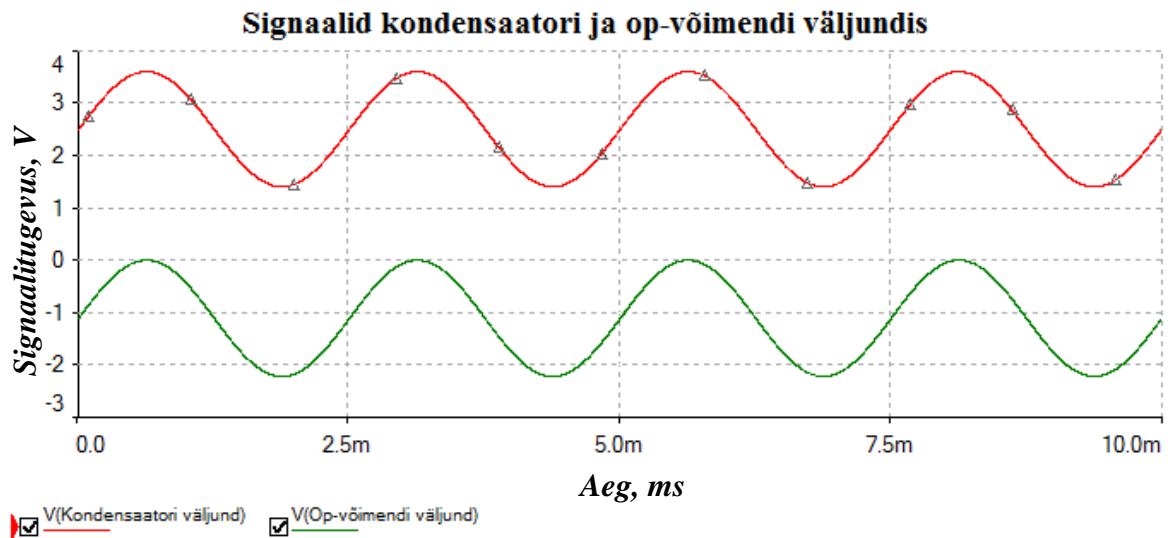
Nagu on näha ka joonisel 7.1. , on simuleeritud sisenev signaal 400 Hz sagedusega, mis kajastub ka ahela väljundis ning jääb ühtlasi kitarriga kaelal häälestatud keelte sagedusvahemikku, et ahela simuleerimine oleks võimalikult reaalne.

Selleks, et üles võimendatud analoogsignaali ei võnguks enam 0-i ümber ja oleks hiljem kasutatavale mikrokontrollerplaadile vastuvõetav signaal pingevahemikus (0...5 V), on tarvis tõsta analoogsignaali pinget (antud juhul on simulatsiooni käigus antud signaalile siinuspinge kuju) alaliskomponenti selliselt, et väljundsignaal hakkaks võnkuma 2,5 V ümber ca 1...2 V amplituudiga. See on saavutatud arendusplaadi 5 V väljundi ühendamise ahela analoogväljundisse läbi 100 kΩ takisti (vt joonis 7.1. ja 7.4.).



Joonis 7.4. Võimendusahela analoogväljund ± 200 mV korral

Nagu ka jooniselt 7.1. näha võib, moodustavad 5V sisendi juures 100 kΩ takisti ja 10 μ F kondensaator pingejaguri, kus kondensaatori võimendipoolses osas toimuvad signaalimuutused põhjustavad kondensaatori +klemmi ja ühtlasi 2,5 V osas pidevaid laenguid, mida kordamööda tarbitakse ja seejärel tõrjutakse. See omakorda tagabki vajaliku signaali ostsilleerumise 2,5 V juures. Mis peamine – kasutatava op-võimendi väljundis võngub analoogsignaali antud ahela puhul 1 V amplituudiga vahemikus -1...0 V. Siit järeldubki, et tänu ühepoolarsele kondensaatorile võib väljundis näha 0 V- nivoost kõrgemal võnkuvat impulsseerivat signaali (vt joonis 7.5.). Teisalt ei lase ühepoolarne elektrolüütiline kondensaator operatsioonivõimendi väljundahelasse *IOUT* vastupinget tekkida.



Joonis 7.5. Signaalid kondensaatori ja op-võimendi väljundis

Madala E-keele poolt genereeritava elektrisignaali puhul võimendatakse aga signaali maksimaalse amplituudiga komponendid kuni 1,82 V-ni, mis tingib ka helisignaali mõnevõrra kõrgema amplituudiga võnkumise. Siiski jääb üles võimendatud elektrisignaali pingeniivo võimendusahela väljundis mikrokontrollerplaadile sobivasse väärtusvahemikku 4,0...4,5 V.

Lisaks on võimalik antud kondensaatori väärtust vähendades vahemikus 1 nF...10 μ F muuta analoogsignaalis olevate impulsside võnkeamplituudi – täpsemalt selliselt amplituudi vähendada.

Nii joonisel 7.1. kui lisas 1 on näha, et (0...5 V) analoogväljundi ja analoogahela massi vahel 100 nF bipolaarne keraamiline kondensaator, mille eesmärk on tagada mikrokontrolleri analoogsisendis ühtlane pinge, mis ei oleks mõjutatud kõikvõimalikest kõrgsagedushäiringutest. Käesolevas ahelas on antud kondensaatori eesmärk eemaldada heli sagedusvahemikust üleliigne kõrgsagedusmüra, mis segab põhiharmooniliste tuvastamist häälestusprotsessis.

7.2. Servomootori valik

Kuna käesolevas lõputöös on kitarril häälestamisprotsessis servoajamil täita oluline roll, siis on järgnevalt põhjalikumalt kirjeldatud servomootori ehitust ja tööpõhimõtteid.

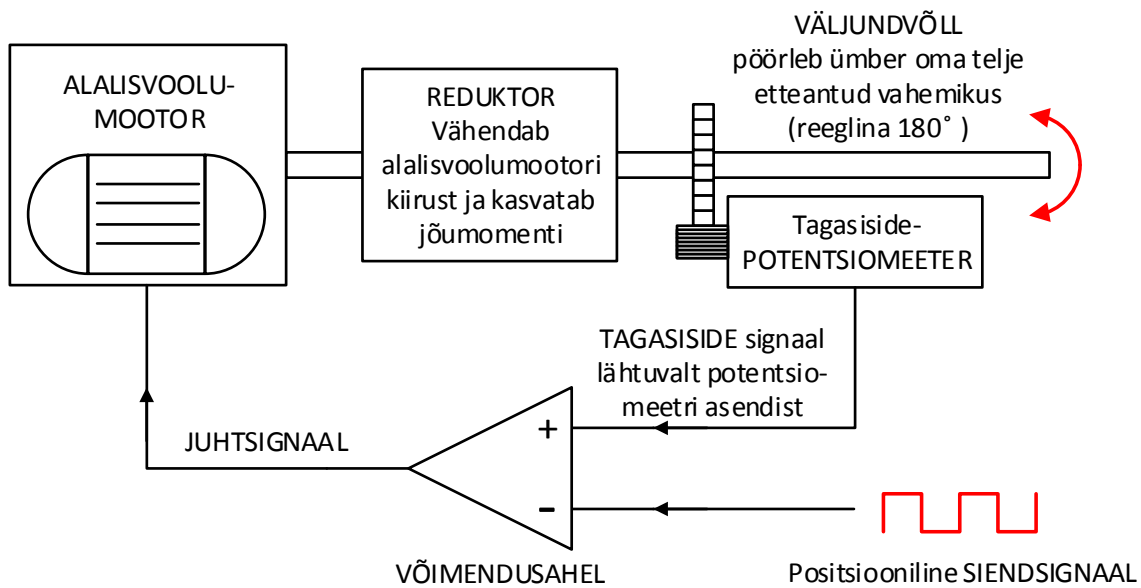
Servomootorite tööpõhimõte

Kokkuvõtvalt on servomootorite puhul tegu täpsete tagasisidestatud alalisvoolumootoritega, millele on lisatud ülekandemehhanism ja juhtelektroonika (vt joonis 7.6.).



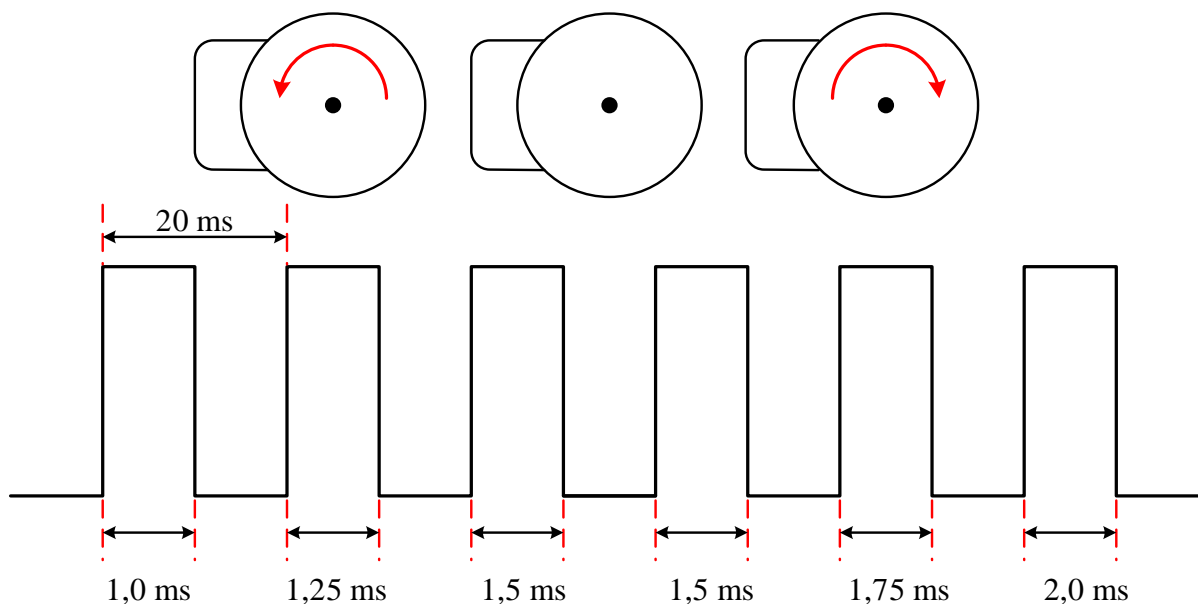
Joonis 7.6. Pidevpöörlemist võimaldav kiirusreguleerimisega servomootor lahtivõetult [14]

Tagasiside võimaldab servomootoreid juhtida signaalipõhiselt, kus pulsilaiusmodulatsiooni (*pulse width modulation, PWM*) teel antakse mootorile kätte positsioon, mida mootor end õigesse asendisse positsioneerides püüab hoida. Servomootori töö põhinebki printsiibil, kus tagasisidepotentsiomeetril olevat pinget võrreldakse juhtsignaali pingega ning nende erinevuse korral rakendub servomootor vastavas suunas pöörlema (vt joonis 7.7.). Mida suurem on hälve õigest positsioonist, seda suurem on ühtlasi pinge mootoril ning mootor pöörleb vastavalt suuremal kiirusel ja momendil. Pöörlemine kestab seni, kuni tagasisidepotentsiomeetri ja juhtsignaali pinged võrdsustuvad.



Joonis 7.7. Servomootori tööpõhimõte

Kirjeldatud põhimõtte järgi töötavad enim levinud asendipõhised servoajamid, mida juhitakse pingeimpulssidega iga 20 ms tagant. Impulsid pikkustega 1...2 ms määravad seejuures servoajami pöördenurga 180 kraadise nurga sees, kus servoajam ei ole võimeline konstantselt pöörlema (vt joonis 7.8.). Joonisel on tähistatud punaste nooltega servoajami pöörlemissuund.



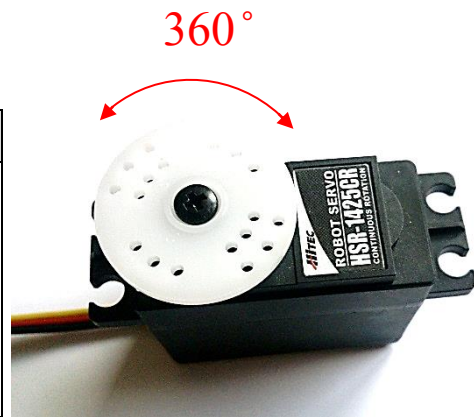
Joonis 7.8. Servoajami juhtimine impulss-signaalidega

Pidevpöörlev servomootor

Käesoleva lõputöö raames on aga häälestusstendil kasutusele võetud robotikas kasutatav konstantse pöörlemisega servoajam *Hitec HSR-1425CR* (vt tabel 7.1. ja joonis 7.9.). Antud ajam erineb tüüpilisest asendipõhisest servoajamist just sellepoolest, et suudab mootori võlli hoida konstantses pöörlemises.

Tabel 7.1. Servoajami parameetrid

<i>Servoajam</i>	<i>Parameetrid</i>
<i>Hitec HSR-1425CR</i> <i>Robot continuous rotation</i>	-Südamikuga ja harjastega -Kiirus (4.8 V/6.0 V): 43.4 rpm / 52 rpm -Moment kg./cm. (4.8 V/6.0 V): 2.8 / 3.37



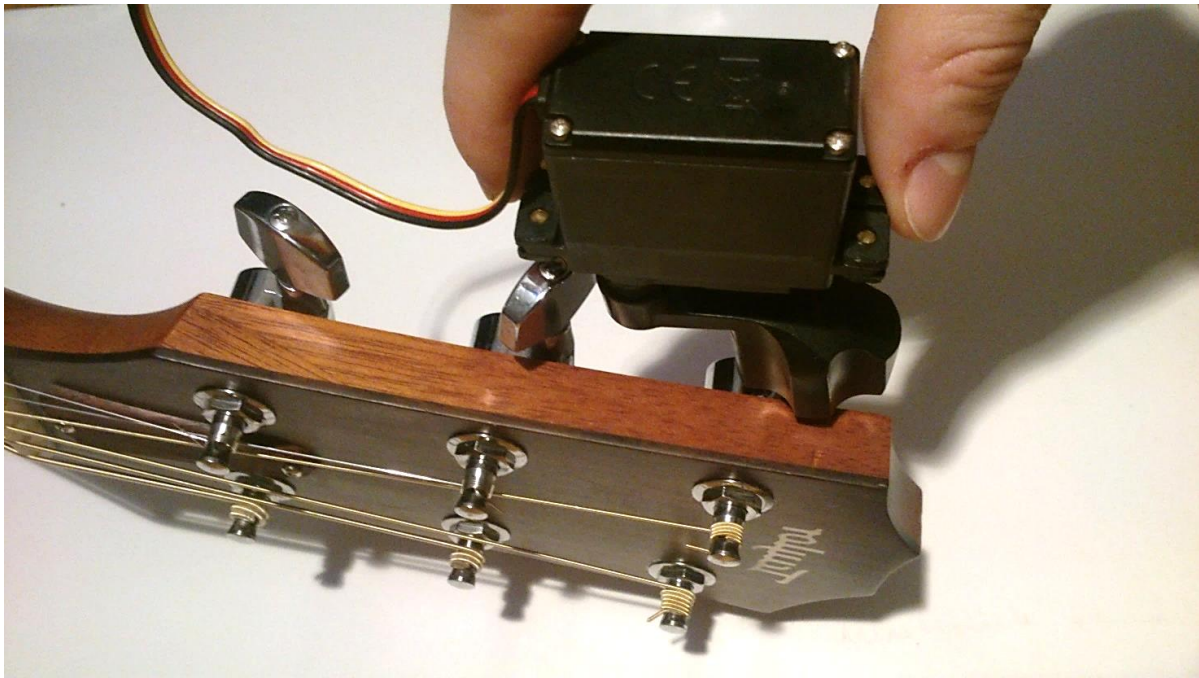
Joonis 7.9. *Hitec HSR-1425CR*

Seejuures on ajami konstruktsioonis reduktorist eemaldatud piirajad, mis takistavad mootoril tegemast täispöördeid ning potentsiomeeter on asendatud samaväärse takistiga. Tagasiside-takisti eesmärk on aga tagada ajami konstruktsioonis, et süsteem mõistaks justkui servoajam oleks pidevalt oma keskmises asendis ning juhtsignaali saabumisel on alalisvoolumootor võimeline pöörlema lakkamatult mõlemas suunas.

Servomootor pilli häälestusstendi osana

Just selline servomootori töö on vajalik häälestusprotsessis pillikeelte häälestamisel, kus mootor peab kitarril kaelal olevat häälestusnuppu keerama vajadusel ühes või teises suunas seni, kuni pillikeel on hääles ja võngub nõutud sagedusel (vt joonis 7.10.). Selleks on kinnitatud servomootorile vajalik otsik ühendumaks kitarril häälestusnuppudega. Käesolev lahendus leiab rakendamist häälestusstendil, kus kasutatakse vaid ühte servomootorit pilli häälestamiseks.

Konstantselt pöörleva servoajami juhtimine sarnaneb paljuski asendipõhise ajamiga, kus pingimpulssidega iga 20 ms tagant juhitakse ajami pöörlemist vastavas suunas. Erinevus seisneb vaid selles, et impulsid pikkusega 1...1,5 ms tagavad servomootori pideva pöörlemise vastupäeva ning 1,5...2 ms impulsid panevad mootori päripäeva pöörlema.



Joonis 7.10. Kitarri häälestamine servomootori abil

Kirjeldatud täpsus ja kiirus ajami juhtimisel võimaldavad antud juhul sujuvat häälestusprotsessi, kus servoajam on võimeline rakenduma loetud millisekundite vältel juhtloogikast tulevale signaalile.

Selliselt hakkab servomootor koheselt pillikeelt häälede keerama, kui häälestusstendi kasutaja on stendi rakendanud tööle automaatrežiimil ning tõmbab pillikeelt. Kasutajal ei ole tarvis muretseda selle pärast, et servoajami reageemiskiirus on liiga aeglane ja pilli häälestamine võtab liigselt aega.

Servomootori töö ülekanne häälestusnupule

Nagu eelnevalt sai öeldud, on häälestusstendil kasutatava servomootori võllile integreeritud kitarrri häälestusnuppudega ühilduv universaalne otsik. Pilli häälestamisel asetab kasutaja otsiku häälestusnupule ja ülejäänud töö teeb juba servomootor. Seega on servomootori võllil otsene ülekanne kitarrri häälestusnupule (vt joonis 7.10.).

Küll on aga häälestusnupu konstruktsiooni integreeritud reduktor, mis teeb ühelt poolt kitarrri keele pingutamise häälestusnupuga tunduvalt kergemaks ja teiselt poolt tagab pilli häälespüsimise ilma, et häälestussüsteemi mehhaaniline konstruktsioon kusagilt järgi annaks (vt joonis 7.11.).



Joonis 7.11. Tiguülekandega kitarril häälestusnupp

Kuna pilli häälestamisel ei ole tarvis häälestusnuppude pööramiseks rakendada suuri momente ja vahet piisab häälestusnupu minimaalsest asendimuutusest, et pill taas häälede keerata, sobiski selle töö jaoks mudelismis kasutatav ja juba varem mainitud 41,7 g kaaluv servoajam firmalt *Hitec HSR-1425CR*, mis on täpselt ja kiiresti juhitud ning oma minimaalsete gabariitide ja massi poolest hõlbus kasutada. Kasutatava servoajami kasuks räägivad ka pilli häälestamiseks piisav võlli pöörlemiskiirus ja moment vastavalt 52 p/min ja 3,37 kg/cm.

7.3. Mikrokontrollerplaadid

7.3.1. Mikrokontrollerplaatide valik

Mikrokontrollerplaatide valik ei põhjendu mitte nii väga selle jõudluses ja mälu mahus, kui selle viikude arvus. Kitarrihäälestussüsteemi komponendid paigutatakse pleksiklaasist stendile, mille eesmärk on kuvada kasutajale võimalikult palju informatsiooni süsteemi tööprotsessi kohta ning tagada samas protsessi kiire juhitavus. Informatiivsuse ja juhitavuse tagamiseks on stendile integreeritud 13 valgusdiodindikaatorit, vedelkristallkuvar, juhthoob ning toitelüliti.

Kasutajasõbraliku programmeerimiskeskonna ja arendusplaatide usaldatavuse tõttu sai just Arduino mikrokontrollerplaatidest välja valitud käesolevasse töösse sobilik *Arduino Mega 2560 Rev 3* (vt joonis 7.12.). Kogu põhiprogramm, mis juhib nii vedelkristallkuvarit, 13 LED-valgustit kui ka teist mikrokontrollerplaatit, paikneb *Arduino Mega*’l, mis tähendab, et koos kõikide eelpool mainitud komponentide kasutuselevõtuga on peakontrolleril kasutusel 33 viiku (vt Tabel 7.1.).

Arduino Mega'1 kasutusel olevate viikude loetelu asub allolevas tabelis:

Tabel 7.1. *Arduino Mega 2560 Rev3'l* kasutusel olevad viigud

Sisend	Komponent
A0	Analoogsignaali võimendusahela väljundsignaal
D2	Juhthoova x-teljeline liikumine
D3	Juhthoova y-teljeline liikumine
D23	Juhthoova lüliti SW
D4	1,77'' LCD TFT ekraani SD CS sisend
D5	Ülemist E-duuri kuvav sinine LED
D6	B-duuri kuvav sinine LED
D7	G-duuri kuvav sinine LED
D8	1,77'' LCD TFT ekraani RESET
D9	1,77'' LCD TFT ekraani D/C sisend
D10	1,77'' LCD TFT ekraani LCD CS sisend
Väljund	Komponent
D11	Alumist E-duuri kuvav sinine LED
D12	A-duuri kuvav sinine LED
D13	D-duuri kuvav sinine LED
D14	Punane LED, mis tähendab, et noot on vajatust rohkem kui 6 Hz kõrgemal
D15	Oranž LED, mis tähendab, et noot on vajatust rohkem kui 4 Hz kõrgemal
D16	Kollane LED, mis tähendab, et noot on vajatust rohkem kui 1 Hz kõrgemal
D17	Roheline LED, mis tähendab, et noot on sagedusvahemikus +/- 1 Hz
D18	Kollane LED, mis tähendab, et noot on vajatust rohkem kui 1 Hz madalamal
D19	Oranž LED, mis tähendab, et noot on vajatust rohkem kui 4 Hz madalamal
D22	Punane LED, mis tähendab, et noot on vajatust rohkem kui 6 Hz madalamal
D50	1,77'' LCD TFT ekraani MISO sisend
D51	1,77'' LCD TFT ekraani MOSI sisend
D52	1,77'' LCD TFT ekraani SCK sisend
Andmeside	Komponent
D20 (SDA)	Arduino UNO A4 (SDA) viik – tagab andmeside kontrollerite vahel
D21 (SCL)	Arduino UNO A5 (SCL) viik – tagab andmeside õigeaegse ajastuse
Toide	Komponent
5 V (väljund)	Analoogsignaali võimendusahelas alalispinge komponendi tõstmise signaalis
5 V (väljund)	Juhthoova toitepinge
5 V (väljund)	1,77'' LCD TFT ekraani toide
Maandus	Komponent
GND	Arduino UNO'ga ühine maandus GND
GND	Analoogsignaali võimendusahelaga ühine maandus GND
GND	Juhthoova maandus
GND	1,77'' LCD TFT ekraani maandus GND



Joonis 7.12. *Arduino Mega 2560 Rev 3* [15]

Järgnevas tabelis on välja toodud arendusplaadi mõned peamised parameetrid (vt tabel 7.2.).

Tabel 7.2. *Arduino Mega 2560 Rev 3* parameetrid

<i>Mikrokontrollerplaat</i>	<i>Parameetrid</i>
<i>Arduino Mega2560 Rev3</i>	-Operatsioonipinge: 5 V -Digitaal. Sisendid/väljundid: 54 -PWM digitaalsed Sis./Välj.: 14 -Analoogsisendid: 16 -Välkmälu: 256 kB -Muutmälu: 8 kB -Püsिमälu: 4 kB

Põhjus, miks käesolevas töös on kasutusele võetud kaks mikrokontrollerplaati ühe asemel, peitub servoajami segamatus juhtimises. Nimelt toimub servoajami juhtimine 1...2 ms impulssidega, kus servoajam ootab kontrollahelalt segamatult impulsse iga 20 ms tagant (vt joonis 7.8.). Teisiõnu peab arendusplaadi kontroller saama segamatult juhtida servoajamit, ilma et sellel tekiks tõrkeid töökäskude täitmisel.

Küll aga tekkisid antud töös probleemid servoajami juhtimisel pelgalt ühe mikrokontrollerplaadiga. Seda siis sellel lihtsal põhjusel, et töös on kasutusele võetud ka *Arduino 1,77'' LCD TFT* ekraan, mida juhib samuti *Arduino Mega 2560 Rev3*. Ekraani juhtimiseks compileeritud C++-kood on aga koostatud Arduino programmeerimiskeskkonnas *Arduino IDE 1.5.5-r2* ning seejuures on kasutatud ekraani tootja poolt valmis

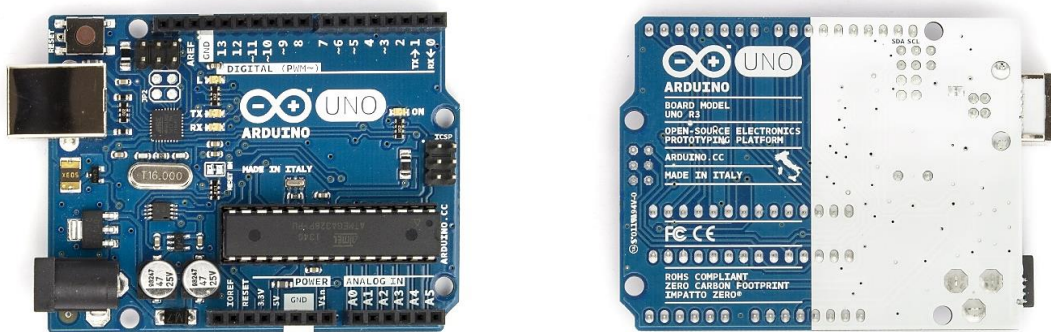
programmeeritud teeke, mis lihtsustavad oluliselt LCD-ekraani juhtimist C++-keelsete käskudega.

Paraku on aga kasutusel olevates teekides niivõrd massiliselt kasutatud programmi riistvaraliste katkestuste (*inerrupts*) asemel lihtsaid tarkvaralisi viivitusi (*delays*), mis programmis esinemise korral kogu programmi tsükli ja sellega arendusplaadi kontrolleri töö igal tasemel katkestavad ning enda järel ootama panevad.

Kõik katkestused kokku moodustavad aga ajaliselt niivõrd pikki viivitusi, et hakkavad sellega segama servoajami juhtsignaale (1...2 ms) ning põhjustavad realsuses servoajami värelemise prognoosimatul moel.

Kuna teekide ümberkirjutamine kujuneks väga keeruliseks ning LCD-ekraani juhtimine on äärmiselt kompleksne ülesanne ja teegid lihtsustavad seda pisut, on antud olukorras õigustatud kasutusele võtta täiendav mikrokontrollerplaat, millesse ei jõua ekraani juhtimisega seotud katkestused, mis segaksid servoajami juhtsignaale.

Täiendava mikrokontrollerplaadina sai kasutusele võetud *Arduino UNO Rev3*, sest see sisaldab tulevikuks vajaminevad 6 kanalit pulsilaiusmodulatsiooniks ning oli juba hetkel olemas ja ei nõudnud lisakulutusi (vt joonis 7.13.).



Joonis 7.13. *Arduino UNO Rev3* [15]

Järgnevas tabelis on välja toodud arendusplaadi mõned peamised parameetrid (vt tabel 7.3.).

Tabel 7.3. *Arduino UNO Rev 3* parameetrid

<i>Mikrokontrollerplaat</i>	<i>Parameetrid</i>
<i>Arduino UNO Rev3</i>	-Operatsioonipinge: 5 V
	-Digitaal. Sisendid/väljundid: 14
	-PWM digitaalsed Sis./Välj.: 6
	-Analoogsisendid: 6
	-Välkmälu: 32 kB
	-Muutmälu: 2 kB
	-Püsिमälu: 1 kB

Seega on *Arduino UNO* ainus ülesanne ses töös saada informatsiooni *Arduino Mega*'lt pillikeele häälestatuse kohta ja sellele vastavalt liigutada segamatult servoajamit. *Arduino UNO*'l kasutusel olevate viikude loetelu asub allolevas tabelis (vt tabel 7.4.).

Tabel 7.4. *Arduino UNO Rev3*'l kasutusel olevad viigud

<i>Väljund</i>	<i>Komponent</i>
D11 (PWM)	Servoajami juhtsignaal
<i>Toide</i>	<i>Komponent</i>
5 V	Servoajami toide
<i>Andmeside</i>	<i>Komponent</i>
A4 (SDA)	Arduino Mega D20 (SDA) viik – tagab andmeside kontrollerite vahel
A5 (SCL)	Arduino Mega D21 (SCL) viik – tagab andmeside õigeaegse ajastuse
<i>Maandus</i>	<i>Komponent</i>
GND	Arduino Mega'ga ühine maandus GND
GND	Servoajami maandus GND

7.3.2. Andmeside mikrokontrollerplaatide vahel

Arduino Mega ja *UNO* vahelisel suhtlusel on kasutusele võetud antud töösse sobivat andmeside kiirust lubav teek (*Wire-library*), mis tagab, et kontrollerite vahel toimuv andmeside vahetus on võimalik bait-haaval iga 10 µs järel. Antud teek võimaldab pidada andmeside ja suhelda seadmete vahel, mis toetavad *I2C* protokollid.

Arduino seadmetest võimaldavad *I2C* protokollile toetuvat seadmetevahelist kommunikatsiooni *Arduino UNO R3*, *Arduino Mega 2560*, *Arduino Leonardo* ja *Arduino Due*. Äsja nimetatud mikrokontrolerplaatidel asuvad vastavad andmesideviigud üksteisega võrreldes erinevalt ning paigutuvad järgnevalt (vt tabel 7.3.) :

Tabel 7.3. Andmesideviigud

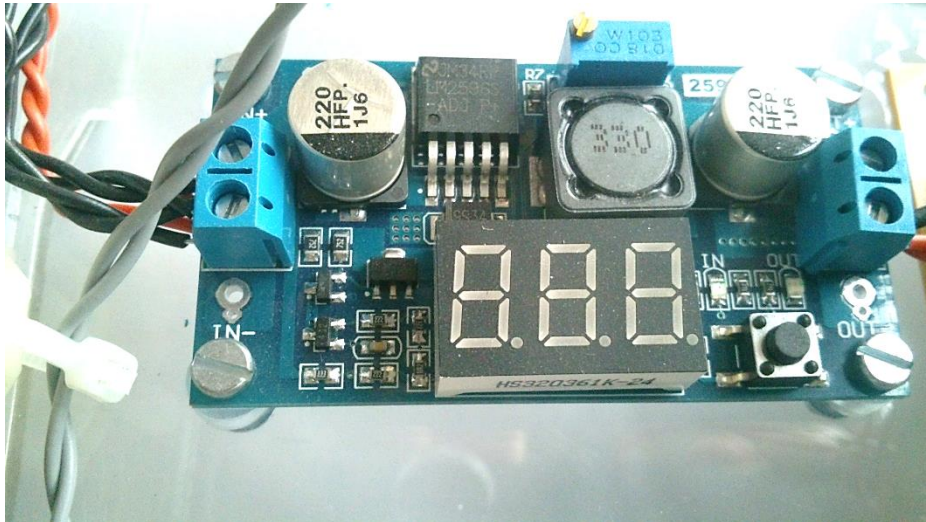
<i>Plaat</i>	<i>I2C / TWI viik</i>
<i>Uno, Ethernet</i>	A4 (SDA), A5 (SCL)
<i>Mega2560</i>	20 (SDA), 21 (SCL)
<i>Leonardo</i>	2 (SDA), 3 (SCL)
<i>Due</i>	20(SDA), 21 (SCL), SDA1, SCL1

Antud juhul tähendavad *SDA* andmeside viiku (*data line*), mida mööda saadetakse 7- või 8-bitiseid andmeid ning *SCL* (*clock line*) viitab andmeside õigeaegsele ajastamisele (vt joonis 7.13.).

Teegi peamised funktsioonid ongi *read()*, *available()* ja *write()*, mis võimaldavad juhtseadmel kontrollida andmeside saatmist või vastuvõtmist ja ühtlasi sellega kontrollida alamseadme (*slave*) tööd. Käesoleval juhul on juhtivseadme rollis *Arduino Mega*, mis saadab *UNO*'le mööda andmesidesiini numbreid 1...7, mis viitavad omakorda, kuhu suunas on pilli häälestamisel vajaminev noot nihkes. Andmeside kiiruseks on 100 kHz, kus kontrollid vahetavad antud kiirusel omavahel bait-haaval informatsiooni.

Käesolevas *I2C* protokollis eksisteerivad nii 7- kui 8-bitised aadressid. Sellisel juhul tuvastavad 7-bititi seadme ning 8. bitt tagab informatsiooni lugemise või kirjutamise. Kokkuvõtvalt kasutabki *Wire* – teek endas peamiselt 7-bitiseid andmeid.

servoajamile stabiilset 5 V toitepinget, on toiteahelasse ühendatud alalispingekonverter, mis baseerub firma *Texas Instruments LM2596S* impulss-stabilisaatoril (vt joonis 7.14.). Toitemoodulile on omakorda integreeritud LED-näidik, mis kuvab kasutajale sisend- ja väljundpinget. Selliselt on võimalik jälgida aku tühjenemist ja seda prognoosida.



Joonis 7.14. Alalispingemuundur

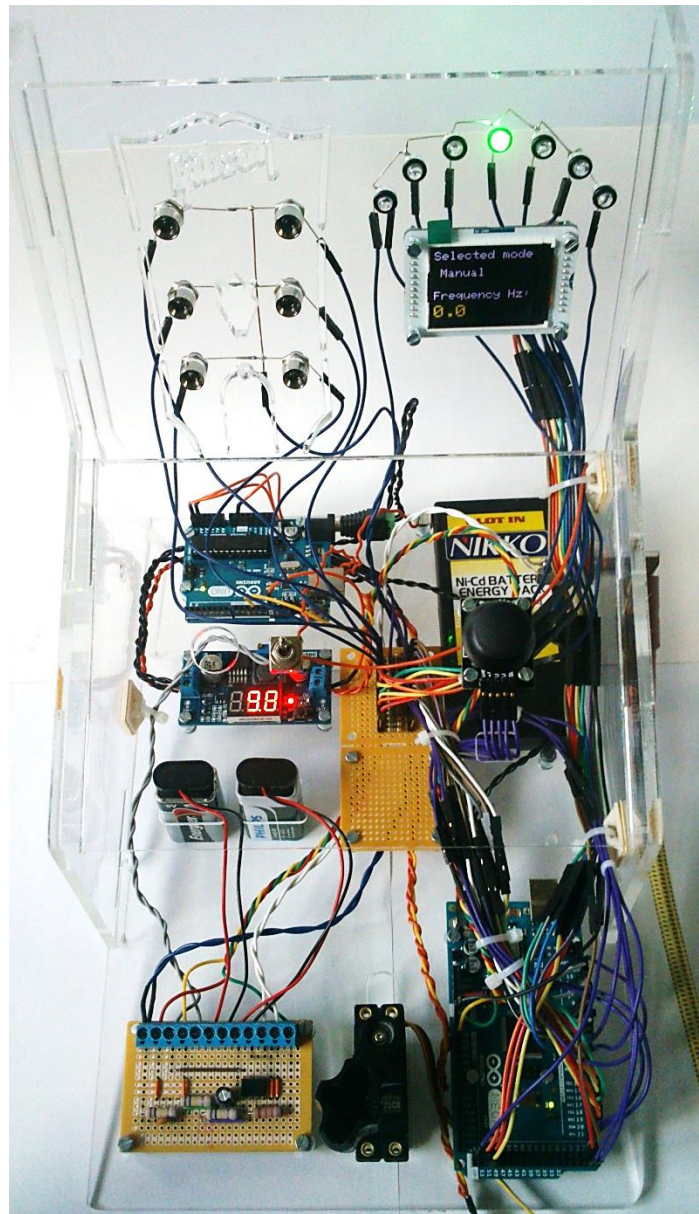
Erinevalt pingejagurist, ei tarbi alalispingemuundur selliselt energiat ja hoiab stabiilsemat väljundpinget. Antud 15W mooduli võimaldab kasutajale vastavalt vajadusele 1,3...37,0 V stabiilset väljundpinget, kus sisendpinge väärtus peab ületama väljundpinget vähemalt 1 V. Käesolev lahendus sobib kenasti antud töösse toitma kasutatavat firma *Hitec*'i servoajamit.

Analoogvõimendusahela toiteahel on üldisest toiteahelast isoleeritud ning saab seejuures toite 9V E-block liitiumpatareidelt. Kaks patareid on jadamisi ühendatud selliselt, et nad on üksteise vahelt maandatud. Taoline ühendusviis võimaldab toiteallikate otstel saavutada operatsioonivõimendile vajaliku potentsiaalide erinevuse +9 V ja -9 V (vt lisa 1).

8. HÄÄLESTUSSTEND

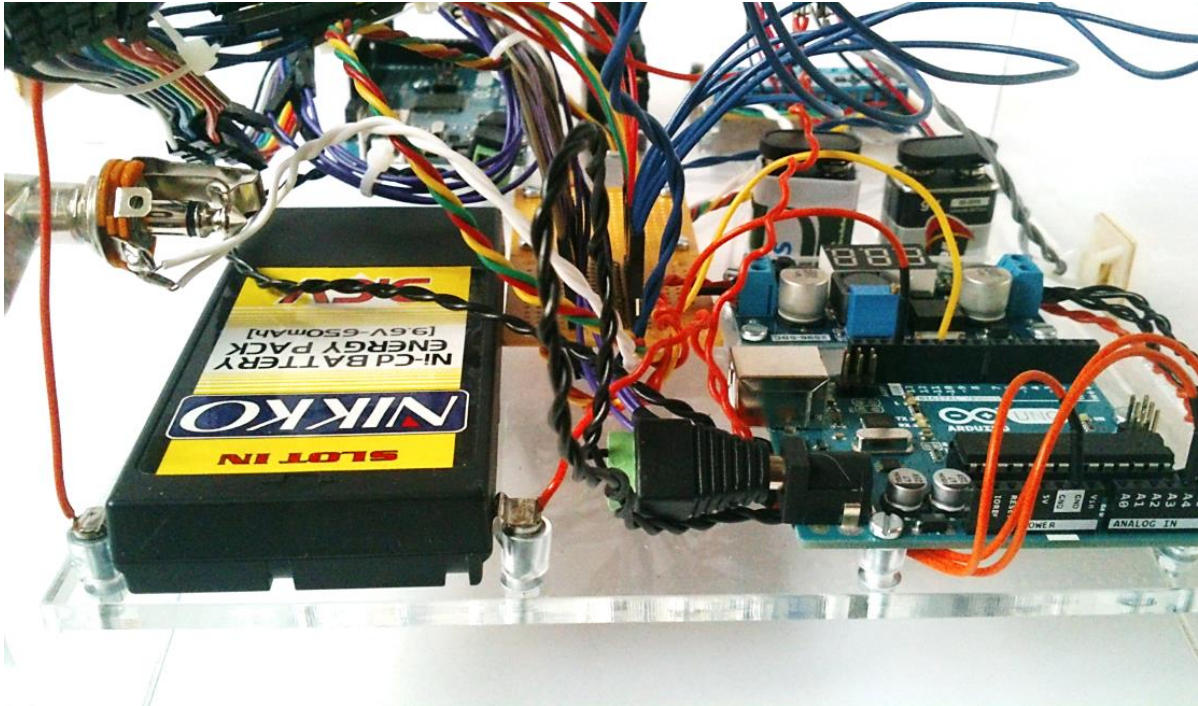
8.1. Stendi koostamine

Eesmärgil, et instrumendi häälestusprotsess võimalikult veatuks ja tõhusaks kujundada arendustöö käigus, on koostatud võimalikult ülevaatlik ja selgesti mõistetav kasutajaliides stendi näol, kus kõik häälestamiseks vajalikud komponendid on paigutatud stendile ja protsess on kasutajale visualiseeritav valgusdiodindikaatorite ning vedelkristallkuvari abil (vt joonis 8.1.).



Joonis 8.1. Häälestusstend pealtvaates

Selline viis arendada häälestusprotsessi tagab kasutajale vähese vaevaga ligipääsu kõikidele komponentidele ning võimaldab sellega kiiremini lahendada kõikvõimalikke probleeme, mis tekivad jooksvalt häälestusprotsessi arendamisel (vt joonis 8.2.).



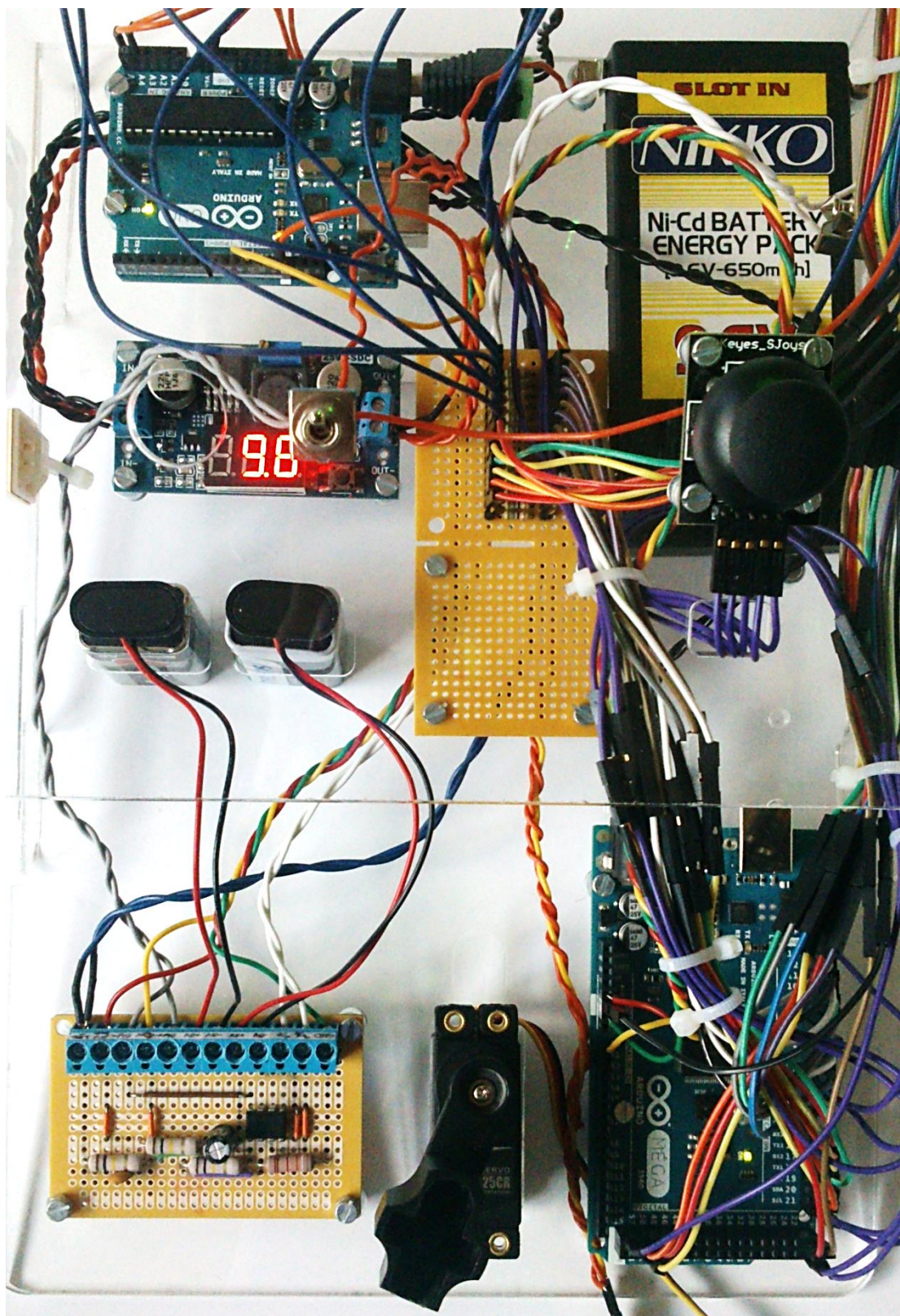
Joonis 8.2. Häälestusstend tagantvaates

Stendi konstruktsioonelemendid on projekteeritud programmis *AutoCAD 2014* (vt lisa 3). Antud jooniste põhjal lõigati KR Studios 5 mm paksusega läbipaistvast pleksiklaasist välja juba konkreetsed detailid, mis on kokku liimitud spetsiaalse *Acrifix 116* liimiga.

Kui eelnevas peatükis oli lahti seletatud, miks on käesolevas töös võetud kasutusele just sellised komponendid ja idee, miks vähemate komponentidega ei ole antud juhul võimalik automaatset pillihäälestussüsteemi ehitada, siis järgnevalt antakse visuaalne ettekujutus sellest, kus kõik komponendid häälestusstendil asetsevad.

Nimelt on kogu häälestussüsteemi signaalitöötlusahel paigutatud stendi alumisele plaadile, kuhu hulka kuuluvad analoogsignaali võimendusahel ja mikrokontrollerplaadid (vt joonis 8.3.). Ühtlasi on sinna lisatud süsteemi toitev 9,6 V nikkel-koobalt aku, servomootor ja 5 V alalispingemuundur servomootori tarvis. Lisaks öeldule on paigutatud stendi põhjaplaadile ka

valgusdiodindikaatorite elektrialhelas olevad takistid, mis kinnituvad omakorda (40 mm x 90 mm) makettplaadile.

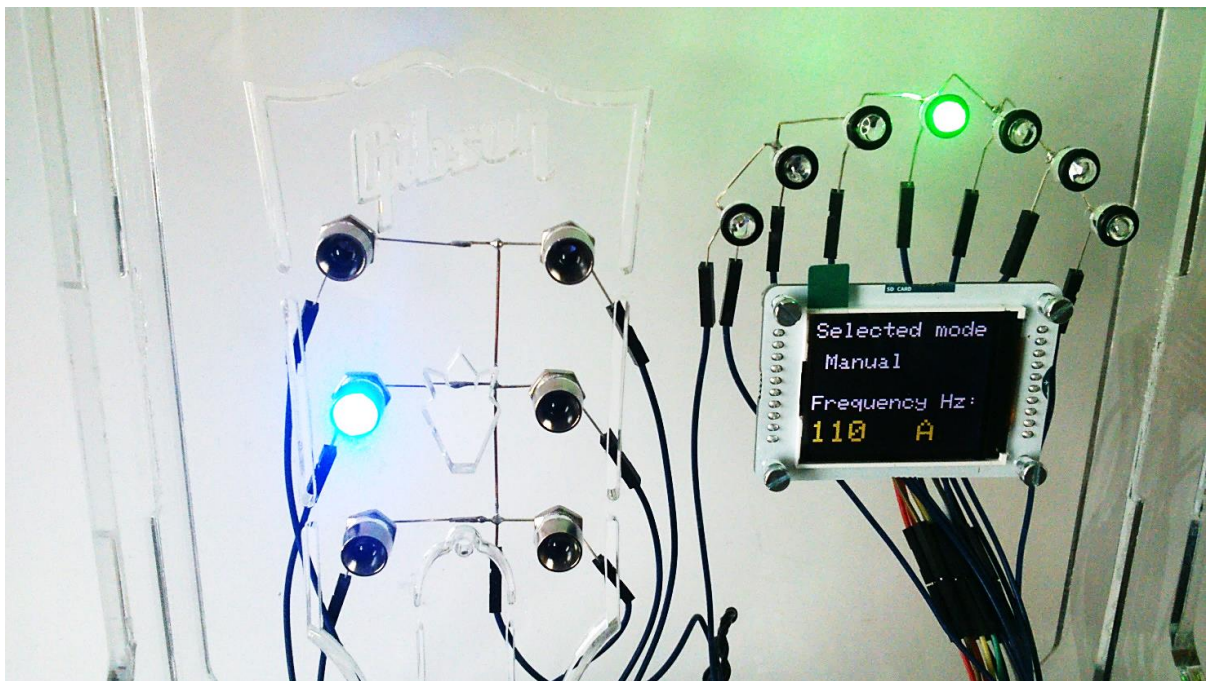


Joonis 8.3. Häälestusstend pealtvaates

Eelneval joonisel 8.3. võib häälestusstendi juhtpaneelil märgata alalispinge konverteri pingenäidiku kohal 3 A kaheasendilist (sees-väljas) stendi käivituslülitit (*tumbler*), mille tähis on elektriskeemis S1 (vt lisa 1).

Käivituslülitit kõrval asetseb aga stendi juhtpaneeli paremas ääres stendi režiimi ja häälestatava pillikeele valikut sooritav juhthoob (vt joonis 8.3.). Kahe vabadusastmega juhthoob on mõeldud töötama 5 V toitepingel ning see on tähistatud elektriskeemis tähisega S2 (vt isa 2).

Kogu häälestussüsteemi visuaalne pool on integreeritud stendi tagumisele vertikaalseinale, mille vasakpoolses osas on imiteeritud siniste valgusdiodindikaatoritega kitarrikaelal olevaid keelte kinnituskohti. Need annavad kasutajale tagasisidet, millist keelt parajasti pillikaelal häälestatakse (vt joonis 8.4.).



Joonis 8.4. Häälestusstendil instrumendi A-keele (110 Hz) häälestamine

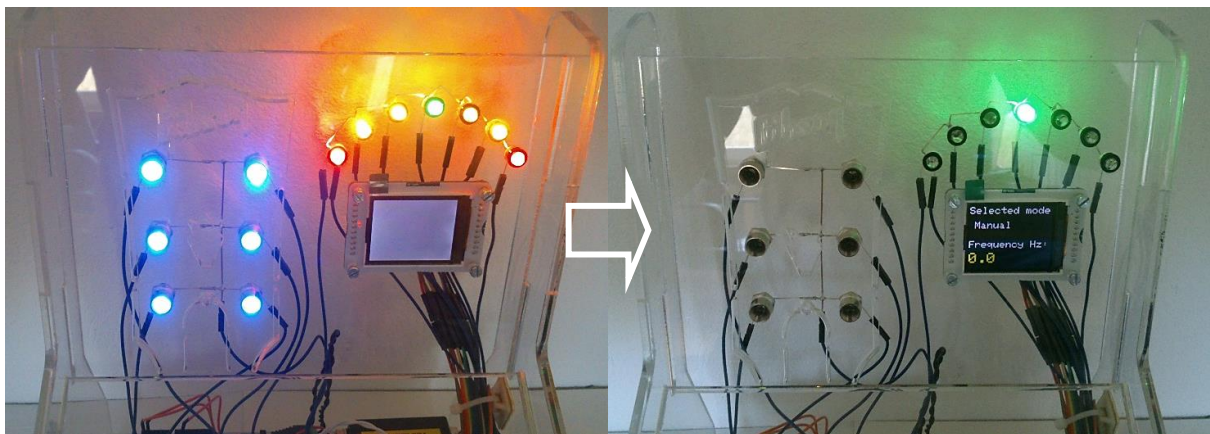
Stendi parempoolses osas paikneb aga *Arduino 1,77" TFT SPI* vedelkristallekraan (resolutsioon 160 x 128) ühes seitsme valgusdiodindikaatoriga. Ekraanil kuvatakse seejuures inglise keeles stendi režiimi (manuaalne / automaatne) ning ühtlasi häälestatava pillikeele põhinooti ja pillikeele põhivõnkesagedust (Hz) antud momendil. Seitse valgusdiodindikaatorit annavad kasutajale tagasisidet pillikeele põhivõnkesageduse kõrvalekaldest selle standardhäälestuse suhtes.

8.2. Häälestusprotsessi kirjeldus stendil

Et stendi tööõhimoitteid paremini tutvustada, on allolevas tekstis punktide kaupa välja toodud stendi tööprotsess erinevates režiimides. Tööprotsessi ilmestamiseks on koostatud lisadesse ka voogesitusdiagramm (vt lisa 2).

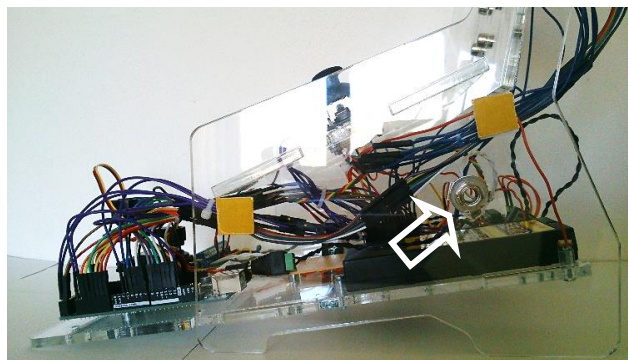
Järgnevalt on kirjeldatud stendi tööprotsessi manuaalrežiimil:

- Stend rakendatakse tööle lülitiga S1, mis tagab nii kontrollerite kui analoogvõimendusahela toite. *Arduino Mega* kindlustab seejuures vedelkristallkuvari ja juhthoova toite ning alalispinge konverter annab 5 V toite servoajamile. Kõik LED-tuled süttivad korraaks ning seejärel on stend töövalmis ja stendile jääb põlema vaid roheline tuli (vt joonis 8.5.).



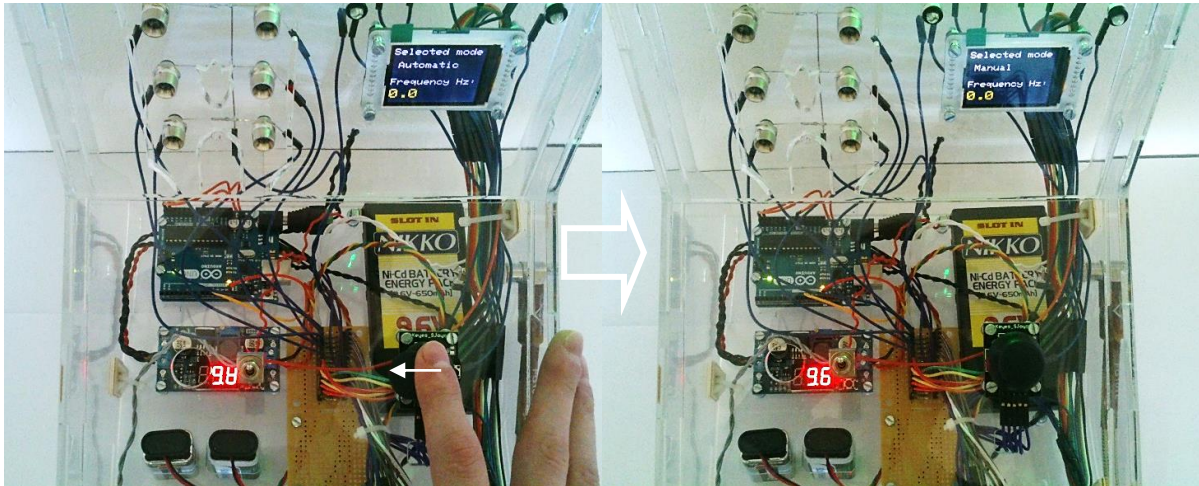
Joonis 8.5. Häälestusstendi tööle rakendamine

- Enne, kui häälestusprotsessiga edasi saab minna, tuleb stendi 1/4'' helikaabli sisend ühendada kitarrilise heliväljundiga vastava helikaabli vahendusel (vt joonis 8.6.).



Joonis 8.6. Häälestusstendi 1/4'' helikaabli sisend

- Edasi tuleb antud režiimi kasutamise korral ekraanilt kontrollida, kas režiimi valiku (inglise keeles: *selected mode*) järele on kirjutatud manuaalne (inglise keeles: *manual*). Vastasel korral peab juhthooba S2 vasakule nihutades vahetama häälestusstendi režiimi. Pärast režiimi valikut võib juhthoova vabastada (vt joonis 8.6.). Häälestusstendi käivitamisel on aga alati stendil vaikimisi manuaalrežiim ja seega puudub vajadus ümberlülituseks vahetult pärast stendi sisselülitamist.

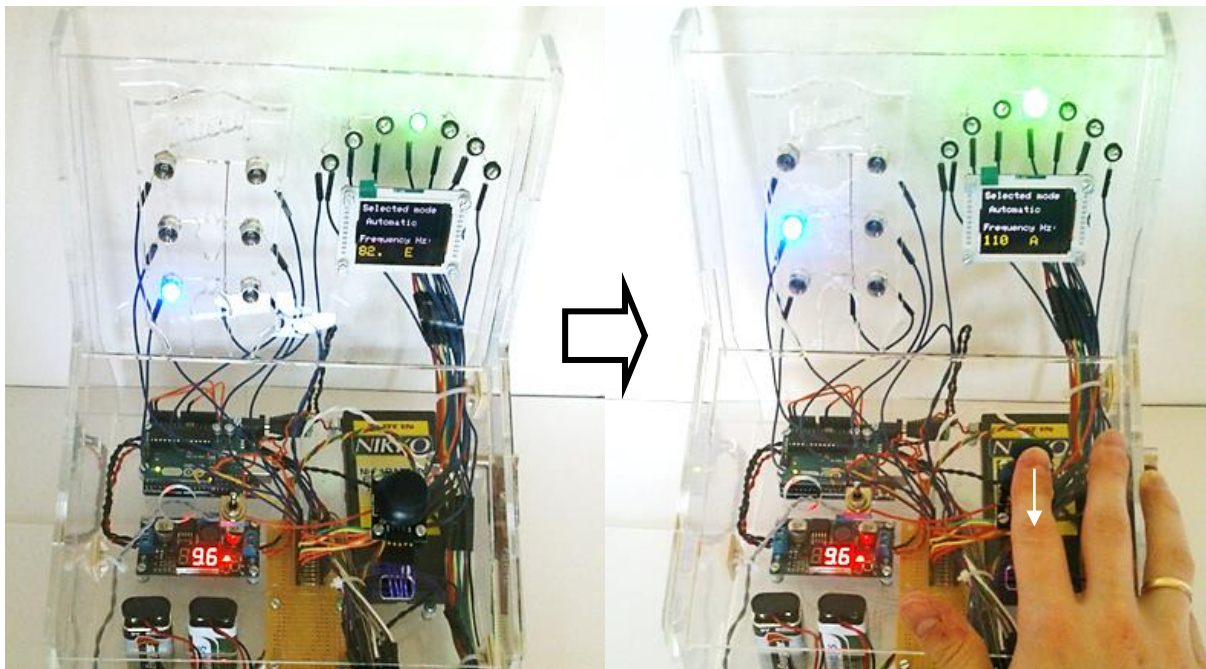


Joonis 8.6. Häälestusstendi režiimi vahetus juhthoova abil

- Kui stend töötab manuaalrežiimis, tähendab see, et servoajam ei rakendu antud režiimil tööle. Stend tunneb pillikeelt tõmmates pillikeele ära ja kuvab ekraanil keele põhivõnkesageduse ning antud noodi põhiduuri. Värvilised LED-id ekraani kohal näitavad keele häälestuse kõrvalekallet põhinoodist. Samas hakkab stendil põlema sinine LED vastavalt pillikaelal olevale keelte paigutusele ja kinnitab, et programm on üheselt aru saanud, millist keelt pillil häälestatakse (vt joonis 8.4.). Kõik see rakendub juhul, kui pillikeel eksib põhinoodist +/- 6 Hz. Vastasel korral kuvatakse ekraanil vaid keele põhivõnkesagedust ja noodi täpsust kuvavad värvilised LED-id näitavad äärmiste punaste LED-idega noodi kõrvalekallet.
- Kui pill on häälestatud, võib stendi lihtsalt välja lülitada selleks mõeldud lüliti S1 abil.

Seejärel on kirjeldatud stendi tööprotsessi automaatrežiimil:

- Stend rakendatakse tööle lülitiga S1, mis tagab nii mikrokontrollerplaatide kui analoogvõimendusahela toite. *Arduino Mega* kindlustab seejuures vedelkristallkuvari ja juhthoova toite ning alalispingemuundur annab 5 V toite omakorda servoajamile. Kõik LED-tuled süttivad korraks ning seejärel on stend töövalmis ja stendile jääb põlema vaid roheline tuli.
- Edasi tuleb antud režiimi korral juhthoova S2 abil ekraanilt valida automaatrežiim vastavalt juhthooba vasakule nihutades.
- Käesoleva režiimi korral tuleb järgnevalt ekraanil valida, millist pillikeelt häälestama hakatakse. Selleks tuleb juhthooba nihutada seni üles, kuni jõutakse soovitud pillikeeleni. Valikus ilmuvad järgnevad võimalused (E, A, D, G, B ja E). Soovitud pillikeeleni jõudmisel võib juhthoova S2 vabastada (vt joonis 8.7.).



Joonis 8.6. Häälestatava pillikeele valik juhthoovaga

- Seejärel süttib stendil sinine LED vastavat duuri näitama. Pillikeele häälestamisel kuvab ekraan keele võnkesageduse ning antud noodi põhiduuri. Kasutusele tuleb võtta servoajam ühes pillikeele häälestamiseks vajamineva otsikuga. Värvilised LED-id ekraani kohal visualiseerivad seejuures keele häälestatuse kõrvalekallet põhinoodist.

Kogu töö teeb kasutaja eest ära servoajam, mis on asetatud pilli häälestusnupule. Kasutajal tuleb tõmmata vaid pillikeelt iga sekundi/paari tagant. Kui pillikeel on hääles, süttib ekraani kohal roheline LED-tuli. Seejuures tuleb arvestada, et servomootor keerab läbi ülekande pillikeelt vaid seni, kuni pillikeele poolt indutseeritud elektrisignaali tugevus instrumendi väljundis on piisavalt tugev. Signaalitugevuse kahanedes lõpetab servomootor oma töö ning kasutaja on kohustatud pillikeelt uuesti tõmbama.

- See tehtud, on taas võimalus valida ekraanilt juhthooba üles nihutades talle sobiv häälestamist vajav pillikeel ja kogu eelnev protseduur kordub.
- Kui pill on häälestatud, võib stendi lihtsalt välja lülitada selleks mõeldud lüliti S1 abil.

9. KOKKUVÕTE

Magistritöös püstitatud peamine eesmärk oli rakendada elektriajamite, jõuelektroonika ja robotitehnika erialateadmisi automaatikasüsteemi arendusel. Töös arendati välja süsteem, mis lihtsustab muusikutel kitarride häälestamist. Lähtuvalt isiklikust kogemusest kitarridega ja nende häälestamisega on keskendunud just instrumendi servomootoriga häälestamisele, et vähendada pilli häälestamisele kuluvat aega.

Enne lõputöö põhiteemani jõudmist on tutvunud kahe peamise kitarritüübiga – akustiline ja elektrikitarr. Seejuures on välja toodud antud kitarride puhul nii piesoelektriliste kui ka elektromagnetiliste helipeade peamine erinevus lähtudes helisignaali sagedusspektrist ning analüüsitud mõlema helipea tüübi positiivseid ja negatiivseid külgi.

Järgnev alalõik lõputöös toob välja häälestusprotsessi arendamisel kasutatava elektrikitarriga *Fender Classic Series '72 Telecaster® Thinline* ning annab põhjaliku selgituse, miks on just kitarride sadulapoolse helipea kasutamine instrumendi häälestamisel eelistatum kui pilli kaelapoolne helipea. Järelduse aluseks on võetud ostsilloskoobiga *Tektronix TDS 220* salvestatud graafikud, kus on analüüsitud instrumendi heliväljundis mõõdetud ajas sumbuvaid helisignaale.

Olenemata sellest, kas tegemist on elektroakustilise või elektrikitarriga, on mõlemat tüüpi kitarrid reeglina kuuekeelsed kromaatilised keelpillid ning instrumendi häälestusprotsessi arendamisel on lähtutud kitarride standardhäälestusest (E, A, D, G, B, E).

Signaalitöötlusprotsessi teostamiseks on põhjalikult uuritud instrumendi iga keele poolt tekitatud elektrisignaale. Ostsilloskoobiga mõõdetud signaale on analüüsitud kitarride heliväljundis nii 10 ms kui 5 s lõikes. Seejuures võimaldab esimene graafik neist tuvastada kõikide keelte puhul signaalis esinevaid põhiharmoonilisi signaalikomponente, mis ongi keelpillide häälestamise aluseks ja mille põhjal toimib kogu häälestamisprotsess. Järgmine ja ühtlasi pillikeelte sumbuva iseloomustav graafik võimaldab tuvastada instrumendi heliväljundis tekkivat signaalitugevust. Käesolevas töös on katsealuse kitarride puhul võetud helisignaali keskmiseks signaalitugevuseks kitarride väljundis ± 200 mV.

Lisaks pillikeelte helisignaali tugevusele ja põhivõnkesagedusele on analüüsitud ka selles esinevaid kõrgemaid harmoonilisi komponente. Nimelt on signaalitöötlust võimaldava programmiga *Sigview32* (versioon 2.6.1) visualiseeritud instrumendi kõigi keelte sagedusspektrid standardhäälestuse korral, kust selgub, et keeleti eksisteerib kitarril 11...15 järku kõrgemaid harmoonilisi, mis jagunevad sagedusvahemikku 1236,0...3625,6 Hz. Seega olenevalt eesmärgist, tuleb kitarrist väljuva elektrisignaali töötlemisel arvestada maksimaalselt helisignaalis esineva sagedusvahemikuga 82,4...3625,6 Hz.

Mikrokontrolleri A/D-muunduri seadistamiseks on räägitud esmalt sãmplimisteoreemist, mis on aluseks helisignaali diskreetimissageduse valikul. Lãhtudes inimkõrvale kuuldavast sagedusvahemikust, mis jääb 16 Hz ja 20 kHz vahele, on käesolevas töös kasutatavas signaalitõõtluses valitud diskreetimissageduseks 40 kHz, mis on üldiselt laialt kasutatav sãmplimissagedus kõõikvõõimalike helisignaalide diskreetimisel ja võimaldab kitarri hããlestamisel programmisiseselt tuvastada kogu pillikeele sagedusspektrit. Seejuures on arvestatud hããlestussüsteemi konstrueerimisel kasutatavate komponentide füüsiliste piiridega.

Kui analüüsida pillikeele põõiharmoonilise sageduse tuvastamisalgoritmi, võõib nããha, et selles esineb kolm peamist filtrit, mis aitavad eristada üldiselt kõõrgema amplituudiga põõhisagedust ülejããnud helisignaalist. Esimene ja peamine tingimus vããlistab kõõik signaalis esinevad helivõõnked, mis ei ületa etteantud lããvipinget. Jããrgmine kriteerium võõrdleb kõõigi lããvipinget ületanud helivõõngete amplituudide erinevust senise maksimaalse amplituudiga helilainega. Seejuures peavad põõiharmoonilistel jããama võõnkeamplituudide erinevused tolerantsi piiridesse. Viimane tingimus võõrdleb juba sõõelale jããanud helilainete võõnkeperioode, kus lubatud tolerantsi piiridesse jããavad signaalikomponendid ongi otsitavad põõhisageduslikud helilained. Edasine tegevus on juba vããlja arvutada võõnkeperioodide põõhjal helisignaali põõhivõõnkesagedus ning selle baasil rakendada tõõle nii servomootor kui hããlestusstendi visuaalne pool.

Kogu signaalitõõtlus toimub arendusplaadil *Arduino Mega 2560 Rev3* (mikrokontroller *Atmega 2560*), milles kasutatakse *Arduino* programmeerimiskeskonnas *Arduino IDE* (versioon 1.5.5-r2) kompileeritud programmi keeles C++. Mikrokontrollerplaadi valik on seejuures seotud nii jõõudluse kui piisava viikude arvuga. Kõõikide hããlestusstendil kasutatavate komponentide kasutuselevõõtuks on peakontrolleril kasutusel 33 viiku.

Häälestussüsteemi signaaliahelas on kasutatud omakorda analoogsignaali võimendusahelat, mis on koostatud elektrikitarrist tulevat signaali (± 200 mV) võimendamiseks selliselt, et see oleks signaali vastu võtvale arendusplaadile piisava amplituudiga (0...5 V).

Kitarri häälestamiseks kasutatava servomootorina on aga käesoleva lõputöö raames kasutusele võetud robotikas kasutatav konstantse pöörlemisega servoajam firmalt *Hitec HSR-1425CR*, kus servoajami juhtimine toimub 1...2 ms impulssidega pulsilaiusmodulatsiooni teel. Antud ajam erineb tüüpilisest asendipõhisest servoajamist just selle poolest, et suudab mootori võlli hoida konstantses pöörlemises ja sobib seega siia töösse vaheliigendi abil kiiresti pillikeelt häälede keerama. Kasutatava servoajami kasuks räägivad ka pilli häälestamiseks piisav võlli pöörlemiskiirus ja moment vastavalt 52 p/min ja 3,37 kg/cm.

Põhjus, miks on käesolevas töös kasutusele võetud kaks mikrokontrollerplaati ühe asemel, peitub häälestusprotsessi visualiseerimisega (kasutajaliidesega) seonduvates ülesannetes. Nimelt kasutatakse *Arduino Mega* juhitud graafilise vedelkristallkuvari *Arduino 1,77" LCD TFT* tootja poolt pakutavates teekides hulgaliselt katkestussignaalidega juhitavaid kiireid alamprogramme mille kasutamine halvendab juhtimise kvaliteeti. Tarkvaraliste viivituste esinemisel kogu programmi tsükli töö peatub. Kõik katkestused kokku moodustasid aga ajaliselt niivõrd pikki viivitusi, et hakkasid sellega segama servoajami juhtimpulsse (1...2 ms) ning põhjustasid servoajami väljundi prognoosimatut värelemist. Kuna vedelkristallkuvari juhtimine on samuti äärmiselt kompleksne ülesanne, oli antud olukorras õigustatud kasutusele võtta täiendav arendusplaat, mis ei ole häiritud ekraani juhtimisega seotud ülesannetest.

Paraku eeldab servoajami juhtimine väga täpseid impulsse pikkusega 1...2 ms. Samuti peavad juhtimpulsid saabuma kontrollahelalt segamatult iga 20 ms tagant. Seega on kasutusel kahetasandiline ülem-alluv juhtimispõhimõte. Täiendava servoajami juhtimisele suunatud mikrokontrollerplaadina on kasutusele võetud *Arduino UNO Rev3*, sest see sisaldab tulevikuks vajaminevad 6 kanalit pulsilaiusmodulatsiooniks ning oli juba hetkel olemas ja ei nõudnud lisakulutusi. Mikrokontrollerplaadi 6 kanalit pulsilaiusmodulatsiooniks läheb tarvis tulevikus, kus kõnealust häälestussüsteemi tuleb edasi arendada, et süsteemile lisada iga pillikeele jaoks oma servomootor.

Kui süsteemi juhtplaadina kasutatav *Arduino Mega* tegeleb signaalitöötluse ja häälestusprotsessi visualiseerimisega, siis *Arduino UNO* ainus ülesanne on juhtida vastavalt seadesuurusele servomootorit. Seejuures on mikrokontrollerplaatide vahelisel suhtlusel kasutusele võetud antud töösse sobivat andmeside kiirust lubav teek (*Wire-library*), mis tagab kontrollerite vahel piisava kiirusega andmevahetuse iga 10 μ s järel. Antud teek võimaldab sidet *I2C* protokolliga seadmete vahel. Käesoleval juhul on andmeside vaid ühesuunaline ja 8-bitiste andmete saatmine toimub ülemseadmelt alluvseadmele (antud juhul *Arduino Mega*'lt *Arduino UNO*'le), kus saadud andmete põhjal valitakse nii servoajami pöörlemissuund kui – kiirus.

Servoajam rakendatakse tööle vaid häälestusprotsessi automaatrežiimil, kus kasutaja on kohustatud varasemalt juhthoova S2 abil valima manuaal- ja automaatrežiimi vahel. Manuaalrežiimil peab kasutaja ise käsitsi pilli häälede keerama, kus valgusdiodindikaatorid ja vedelkristallkuvar võimaldavad kitarril häälestamisel piisavat tagasisidet.

Kogu süsteemi visualiseerimine toimub valgusdiodindikaatorite ja vedelkristallkuvari vahendusel. Vedelkristallekraanile kuvatakse instrumendi häälestamisel pillikeele põhivõnkesagedus ja selle põhinoot. Samal ajal näitavad ekraani kohal olevad valgusdiodindikaatorid pillikeele põhivõnkesageduse kõrvalekallet selle standardhäälestusest. Lisaks öeldule kuvatakse sinise valgusdiodiga kasutajale häälestusstendi visuaalsel pillikaelal, millist keelt parajasti häälestatakse. Visuaalne tagasiside häälestusprotsessist on seejuures tarvilik nii süsteemi arendamisel kui hiljem süsteemi kasutamisel.

Häälestussüsteemi keskseks toiteallikaks on nikkel-koobalt aku nimipingega 9,6 V ja mahtuvusega 650 mA (firmalt *Nikko*), mis tagab arendusplaatidele toite lubatavas pingevahemikus (5...12 V). Küll on aga valitud konkreetne aku piisavalt suure väljundvooluga põhjusel, et servoajami voolutarve on maksimaalse momendi korral võrdlemisi suur. Tagamaks servoajamile stabiilset toitepinget, on ahelasse vahele lülitatud 15 W alalispingemuundur, mis põhineb impulss-stabilisaatoril *LM2596S*. Analoogahela toide on kõigist ülejäänud ahelatest isoleeritud ja saab toite eraldi 9V nimipingega liitiumpatareidelt. Kogu süsteemi rakendab tööle kahepositsiooniline ümberlülitid S1.

Ligipääsu võimaldamiseks kõikidele süsteemikomponentidele on koostatud võimalikult ülevaatlik ja selgesti mõistetav kasutajaliides stendi näol. Stendil on kõik häälestamiseks vajalikud komponendid paigutatud hästi nähtavatele kohtadele. Stendi konstruktsioonelemendid on projekteeritud programmis *AutoCAD 2014*. Raalootmisega tegelevas ettevõttes KR Studios on jooniste põhjal CNC-pingil lõigatud pleksiklaasist välja juba konkreetsed detailid. Häälestusstend koosneb seejuures läbipaistvatest 5 mm paksustest plaatidest.

Töö sissejuhatuses püstitatud erialateadmiste rakendamise eesmärgi võib lugeda täidetuks. Koostatud on terviklahendus, mis võimaldab pillikeeli häälestada automatiseeritult ja vähendatud ajakuluga. Süsteem on optimeeritud ja seadistatud lihtsustama kitarril häälestamist nii algajale pillimängijale kui kogunud muusikule. Kasutajaliidese kasutamine on piisavalt lihtne, et seda esimesel korral tabada ning valmistab kindlasti põnevust ka muusikakaugele inimesele.

Nagu juba varem oli mainitud, on plaanis magistritöö raames koostatud süsteemi edasi arendada ning lisada iga pillikeele jaoks oma servomootor. Küll on aga soov leida hetkel kasutatavast väiksemad servomootorid ning integreerida need mõne kitarril kaelale. Käesoleva arendustöö lõppfaasis võiks suurema osa stendil olevaid komponente kitarril kerele mahutada ning selliselt kogu häälestussüsteem instrumendi sisse viia. See võimaldaks omakorda muusikul automaatset häälestussüsteemi pidevalt endaga laval ühes pilliga kaasas kanda.

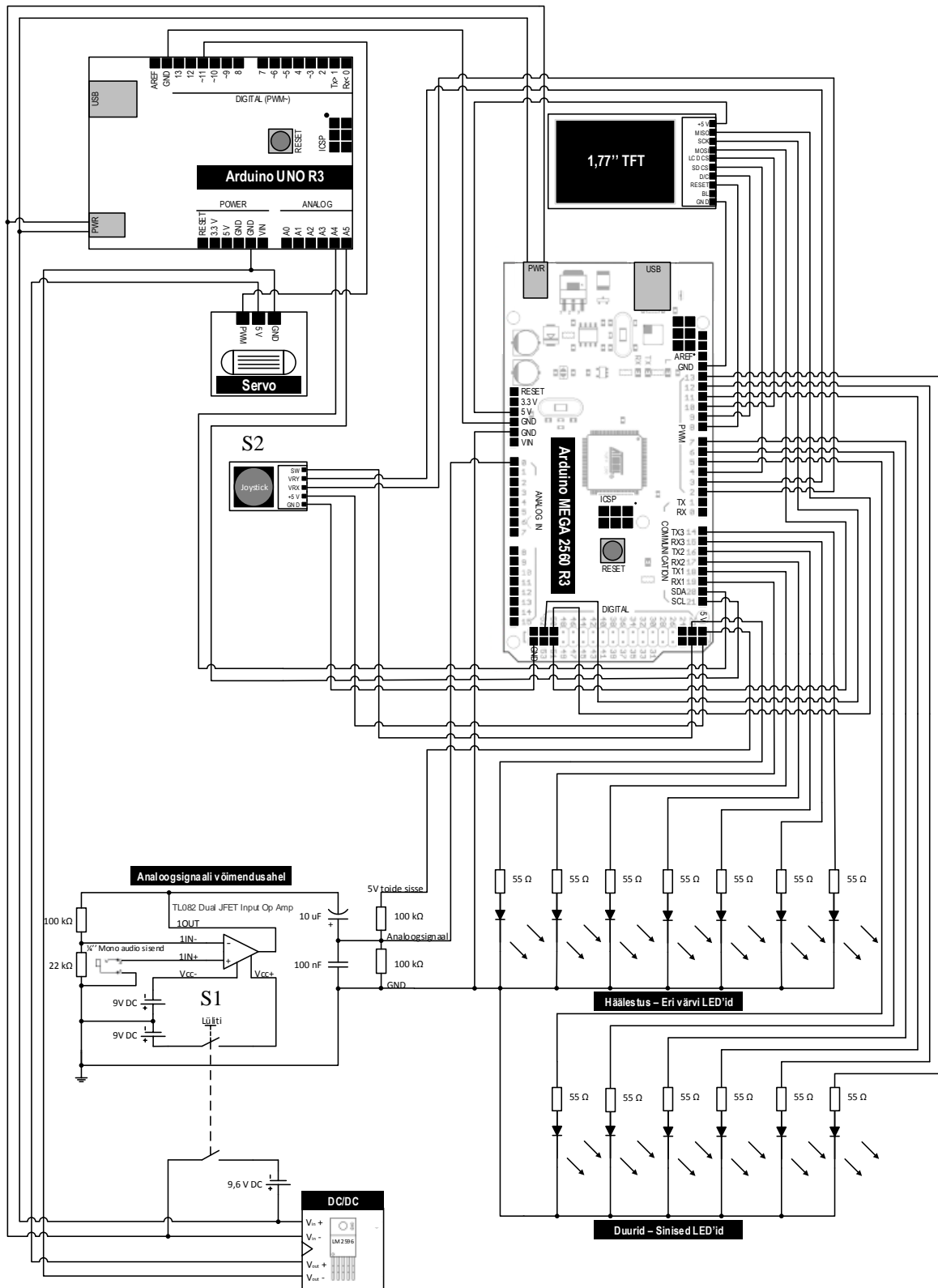
KASUTATUD KIRJANDUS

1. Tronical kodulehekül <http://www.tronical.com/>, Vaadatud 05.02.2015.a.
2. Instructables: Arduino Audio Input, kasutaja amandaghassaei
<http://www.instructables.com/id/Arduino-Audio-Input/?ALLSTEPS>,
Vaadatud 10.02.2015.a.
3. Martin Möller, foto veebis aadressil
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Classical_Guitar_not_labelled.jpg, Vaadatud
03.04.2015.a.
4. Larry Fishman, foto veebis aadressil
http://www.premiarguitar.com/articles/A_Piezo_Pioneer, Vaadatud 03.04.2015.a.
5. Instructables: Acoustic Guitar Pickup, kasutaja adamkumpf
<http://www.instructables.com/id/Acoustic-Guitar-Pickup/step2/Specifications/>,
Vaadatud 15.05.2015
6. Tallinna Tehnikaülikooli Elektroonikainstituudi kodulehekül <http://www.elin.ttu.ee>,
Vaadatud 05.05.2015.a.
7. Toom, L. DVB videosignaali DCT simuleerimine arvutil. Magistritöö. – Tartu: TÜ
eksperimentaalfüüsika ja tehnoloogia instituut, 2005. – 122 lk.
8. Fu Chen, K.; Li Mei, S. Composite interpolated Fast Fourier Transform with the
Hanning window. IEEE Transactions on instrumentation and measurement. Vol. 59 of
98. – Hiina: Natural Science Foundation of China, 2010, Lk. 1571...1579.
9. National instruments: Understanding FFTs and Windowing, [http://www.ni.com/white-
paper/4844/en/](http://www.ni.com/white-paper/4844/en/), Vaadatud 05.05.2015
10. Block, B-M; Mercorelli P. Conceptual understanding of complex components and
Nyquist-Shannon sampling theorem: a design based research in Engineering. 2015
IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON). Vol. 20 of 25. –
Lueneburg: Leuphana University of Lueneburg, 2015, Lk. 462...470.
11. Lehtla, T.; Kulmar, L. Mikroprotsessortehnika. – Tallinn: TTÜ elektriagamite ja
jõuelektronika instituut, 1995. – 140 lk.
12. Lehtla, M. Loengukonspekt õppeainetes „AAR0060 Elektriagamite
mikroprotsessorjuhtimine“: Elektrilised signaalimuundurid I, 2015. – 81 lk.
13. Wikipedia: Sämplimine, <http://et.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4mplimine>, Vaadatud
06.05.2015

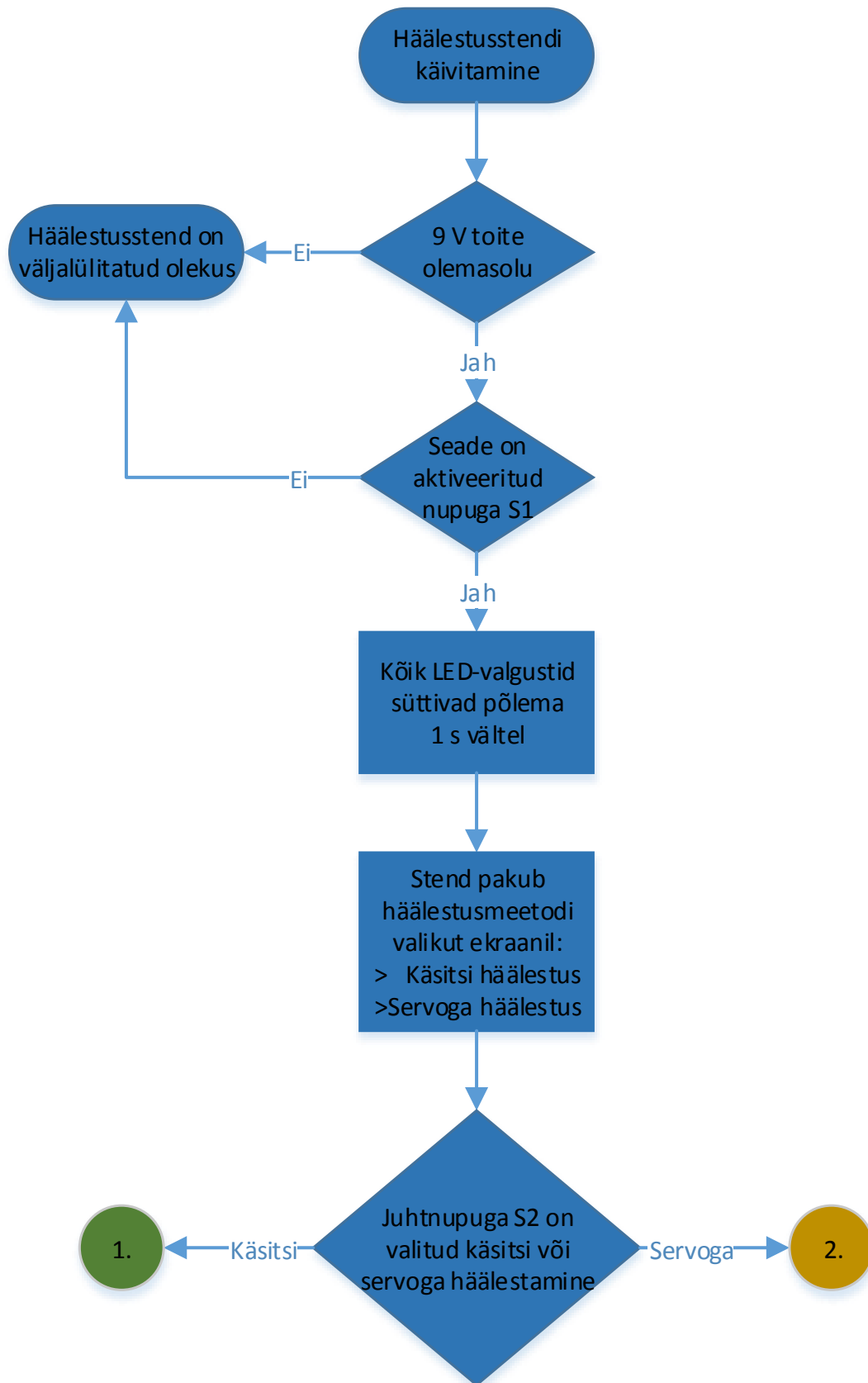
14. Kasutaja Bomazi, foto veebis aadressil http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ec/Exploded_Servo.jpg, Vaadatud 02.02.2015
15. Arduino kodulehekül <http://www.arduino.cc/>, Vaadatud 07.05.2015

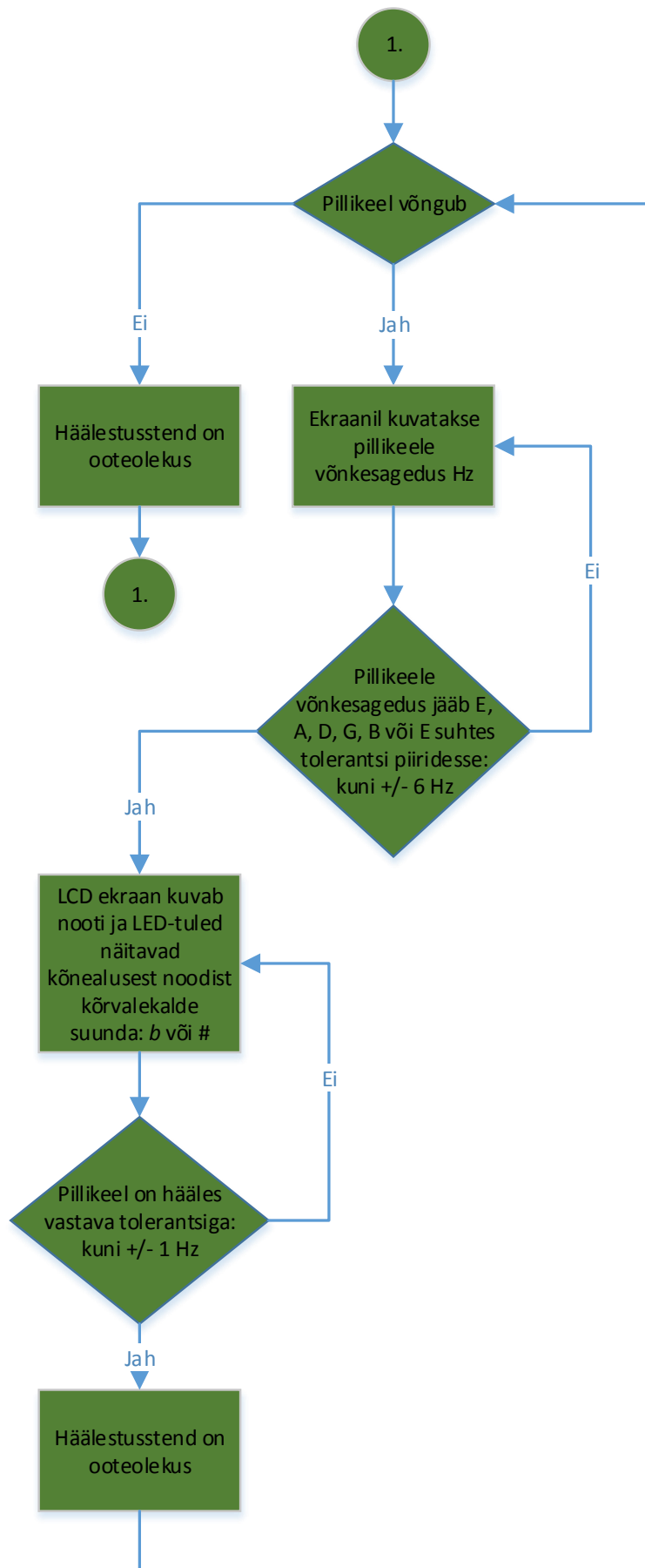
LISAD

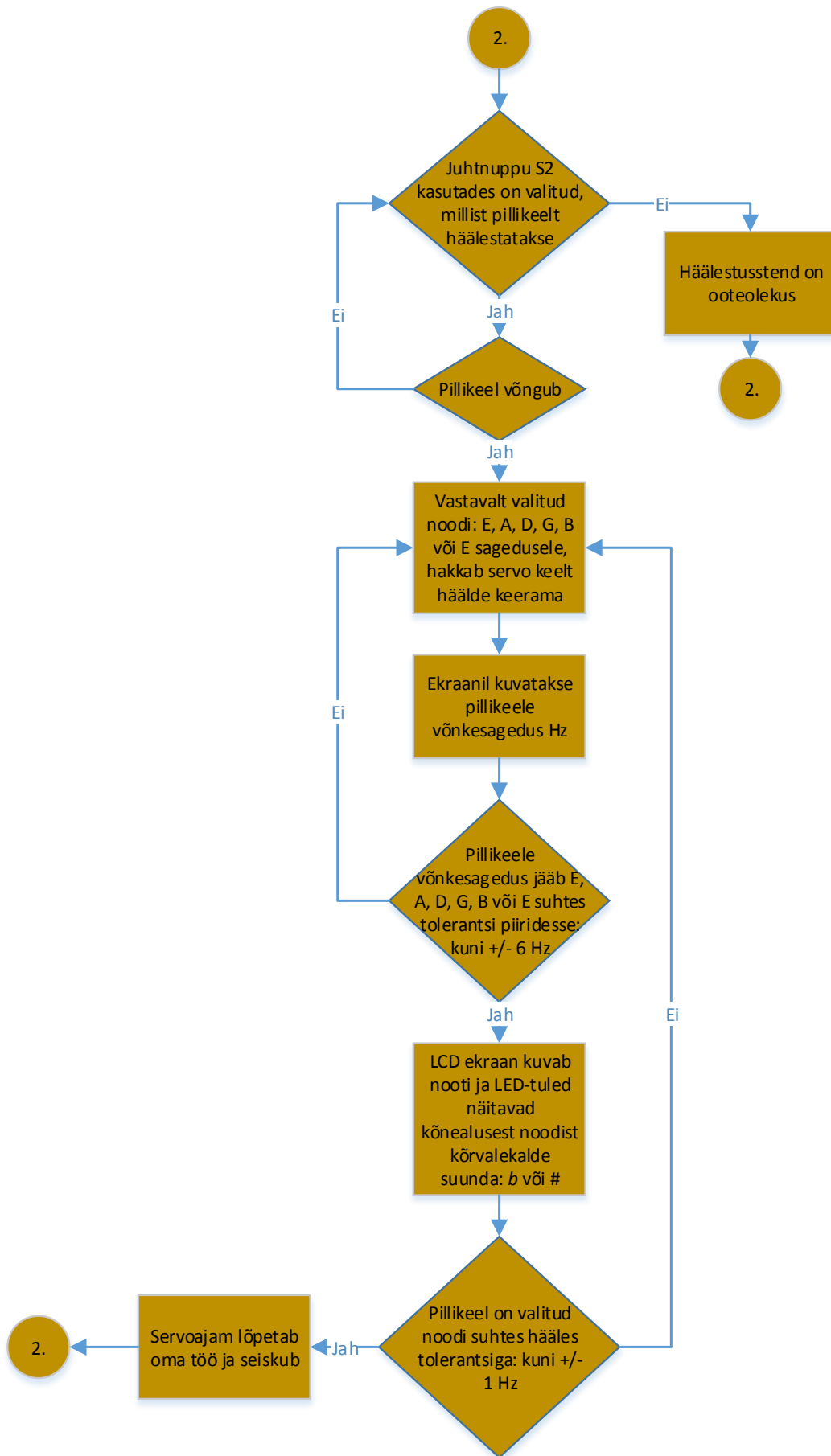
LISA 1 Elektriskeem



LISA 2 Protsessi kirjeldav voogesitusdiagramm







LISA 3 Stendi joonised

