



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Mehhatroonikainstituut

Mehhatroonikasüsteemide õppetool

MHK40LT

Riho Koop

**KOMPAKTNE MIDI PEDAALILAUD
ORELIKONSOOLILE**
Bakalaureusetöö

Autor taotleb
tehnikateaduste bakalaureuse
akadeemilist kraadi

Tallinn
2015

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”.....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”.....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”.....201... a.

..... allkiri

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2015 aasta II semester

Üliõpilane: Riho Koop 104109 (nimi, kood)

Õppekava MAHB

Eriala Mehhatroonika

Juhendaja: teadur Maido Hiiemaa (amet, nimi)

Konsultandid: (nimi, amet, telefon)
.....

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Kompaktne MIDI pedaalilaud orelikonsoolile

(inglise keeles) Compact MIDI pedalboard for organ console

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Olemasolevate MIDI pedaalilaudade tehniliste näitajatega tutvumine, sobiva standardi valimine	31.03.2015
2.	Kompantse ja ergonoomilise pedaalimehhanismi väljatöötamine	17.04.2015
3.	Näidispedaali elektroonika disain ja programmeerimine	24.04.2015
4.	Näidispedaali valmistamine, testimine	08.05.2015
5.	Võimalik pedaalilaua koost.	15.05.2015

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid

Töökindla, kompaktse ja ergonoomilise MIDI pedaalilaua väljatöötamine.

Täiendavad märkused ja nõuded:

Töö keel: Eesti

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt 12.05.2015 **Töö esitamise tähtaeg**...22.05.2015.....

Üliõpilane /allkiri/ kuupäev.....

Juhendaja /allkiri/ kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöörde

SISUKORD

Bakalaureusetöö ülesanne	3
Eessõna	5
SISSEJUHATUS	6
1. TURUANALÜÜS	8
1.1. Olemasolevate MIDI pedaalide tehniliste näitajatega tutvumine	8
1.1.1 Hammond XPK200	8
1.1.2 Roland PK-7	9
1.1.3 Tüüpiline mehhanism	10
1.2. Sobiva standardi valik	10
2. PEDAALIMEHCHANISMI VÄLJATÖÖTAMINE	12
2.1. Pedaali mõõtmete ja omaduste valik AGO standardi eeskujul.....	12
2.1.1 Teisendused SI süsteemi	12
2.1.1 Pedaali mõõtmed	12
2.1.3 Pedaali vajutamiseks vajaminev jõud	13
2.2. Pedaali mehhanism	14
2.3. Pedaali mehhanismi dimensioneerimine	16
2.3.1 Pedaali mehhanismi lihtsustatud mudel	16
2.3.2 Arvutused MATLAB tarkvaraga	18
2.3.3 Arvutuste tulemused	20
3. NÄIDISPEDAALI ELEKTROONIKA JA PROGRAMMEERIMINE	22
3.1. Näidispedaali elektroonika disain.....	22
3.1.1 MIDI standard	22
3.1.2 Arduino Uno.....	22
3.1.3 Sensor	23
3.1.4 Näidispedaali elektroonika skeem	24
3.2. Programmeerimine.....	24
3.2.1 MIDI standard	24
3.2.2 Programm	25
4. NÄIDISPEDAALI VALMISTAMINE, TESTIMINE	27
4.1. Näidispedaali valmistamine	27
4.2 Näidispedaali testimine	28
5. VÕIMALIK PEDAALILAUA KOOST	29
KOKKUVÕTE	30
SUMMARY	32

EESSÕNA

Lõputöö teema tuleb autori isiklikust huvist muusikainstrumentide kaasajastamise ja edasiarendamise vastu. Lõputöö teema valikut suunas Tallinna Tehnikaülikooli mehaanikateaduskonna teadur Mairo Hiiemaa, kes oli ka antud töö juhendajaks. Töö käigus valmistatud näidispedaal valmis Tallinna Tehnikaülikooli Mehhatroonikainstituudi töökoja seadmeid kasutades.

SISSEJUHATUS

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli välja töötada kompaktne ja ergonoomiline pedaalilaud, mis vastaks MIDI muusikariistade digitaalne liides i.k. *Musical Instrument Digital Interface* tehnilisele standardile. Loodav lahendus pidi olema mõõtmelst sarnane praegu turul olevatele kompaktsetele pedaalilaudadele kuid pakkuma organistile traditsioonilisele orelikonsoolile sarnanevat ergonoomikat.

Hetkel on organistidel valida kas hinnalt kättesaadvate ja mõõtmelst kompaktsete pedaalilaudade või krikutes kasutatavate orelite pedaalilaudasid matkivate suuremõõtmeliste ja kalliste pedaalilaudade vahel. Seetõttu pole paljudel organistidel soovi ega võimalust isiklikku orelikonsooli omada. Lahendus mis pakuks parimat mõlemast valikust annaks rohkematele orelihuvilistele võimaluse omada autentse tunnetusega pedaalilauda. Pedaalilaua projekteerimisel oli tähtis saavutada soovitud ergonoomika võimalikult lihtsa mehhanismi ja väikese detailide arvuga, et detailide valmistamine ning pedaalilaua koostamine oleks lihtne ja odav. Materjalide valikul oli tähtis töödeldavus, esteetilisus, keskkonnasõbralikkus, samuti hind.

Ülesande lahendus jagunes 5-ks osaks:

- Olemasolevate MIDI pedaalilaudade tehniliste näitajatega tutvumine ja sobiva standardi valimine.
- Kompaktse ja ergonoomilise pedaalimehhanismi väljatöötamine.
- Näidispedaali elektroonika disain ja programmeerimine.
- Näidispedaali valmistamine, testimine.
- Võimalik pedaalilaua koost.

Olemasolevate kompaktsete MIDI pedaalilaudadega tutvumine oli vajalik nende võimaluste ja puuduste paremaks mõistmiseks. Saadud info toob hästi välja vahe loodud lahenduse ja olemasoleva vahel. Lisaks võrdlusele praegu kasutatavate pedaalilaudadele oli uue disaini loomisel palju abi orelikonsooli ehitust kirjeldava standardi eeskujuks võtmine.

Kuna olemasolevad kompaktsed pedallimehhanismid ei rahulda seatud tingimusi, tuli luua orelikonsoolide seas uuenduslik mehhanism. Mehhanismi 3D modelleerimiseks kasutati Dassault Systèmes Solidworks® tarkvara. Mehhanismi dimensioneerimiseks vajalike arvutuste tegemiseks MathWorks MATLAB® tarkvara.

Näidispedaalil kasutatav elektroonika ja sinna juurde kuuluv programm on mõeldud ainult näidispedaali katsetamiseks töötava MIDI seadmena. Selline lähenemine võimaldas kasutada väga lihtsaid lahendusi nii elektroonikas kui ka juhtprogrammis, samas saades vajamineva tagasiside näidispedaali toimimise ja võimalike puuduste kohta. Väiksem ajakulu näidispedaali elektroonika ja programmeerimise peale võimaldas kiiremini edasi liikuda näidispedaali katsetamise juurde. Väikese komponentide arvuga skeemi loomise ja lihtsa programmeerimise võimaldas Atmega328 mikrokontrolleril põhineva Arduino Uno arendusplaadi ja Arduino 1.6.4 vabavara kasutamine. Näidispedaalil kasutatav sensorilahendus on valitud katsetamiseks seda tüüpi sensori sobilikkust antud rakendusse, vaatega, et ka lõpplahendus kasutaks sarnast lahendust.

Näidispedaali valmistamisel kasutati materjale, uurimaks nende sobivust lõpplahenduse juures. Detailide valmistamine andis infot materjalide töödeldavuse ja sobivuse kohta tootmiseks. Kõik valmistatud kasevineerist detailid on loodud CNC freesimise teel. Eesmärgiks oli hinnata kasevineeri sobivust sel viisil töötlemiseks. Näidispedaali valmistamine võimaldas hinnata mehhanismi koostamise keerukust.

Näidispedaali testimise käigus sai selgeks reaalse pedaali sarnasus arvutuslike tulemustega. Sai katsetada reaalset pedaalitunnetust jala all ja vastavust algselt seatud kriteeriumitele. Testimine näitas valitud lahenduse sobivust ja võimaldas edasi liikuda, pakkumaks välja võimalik pedaalilaua koost ühe pedaali mastaabis.

1.TURUANALÜÜS

1.1 Olemasolevate MIDI pedaalilaudade tehniliste näitajatega tutvumine

1.1.1 Hammond XPK200



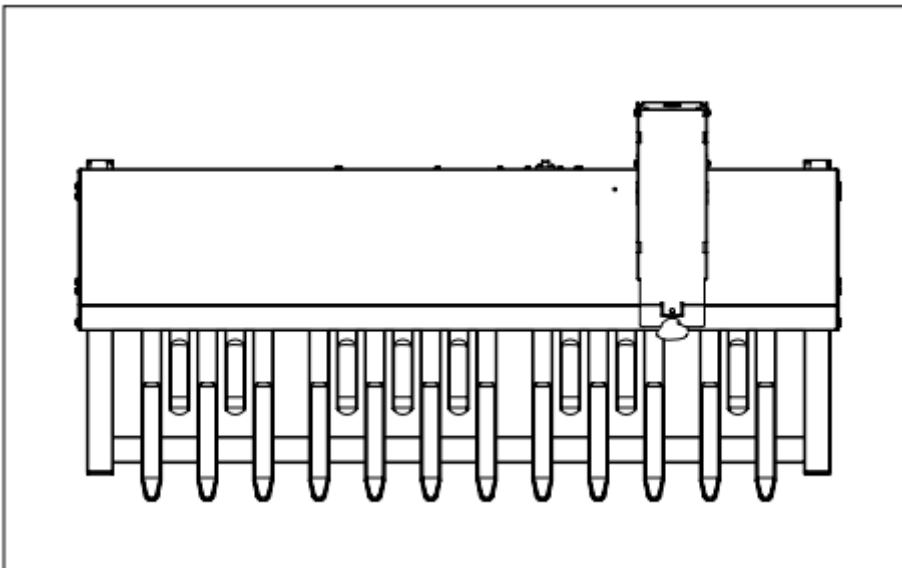
Sele 1.1. Hammond XPK 200 [1]

Pedaalilaua mõõtmed: pikkus 872mm, laius 400mm kõrgus 133mm

Pedaalilaua kaal: 13,5kg

Klahvide arv: 20 [2]

Pedaalilaua orienteeruv hind internetipoodides on 1000€.

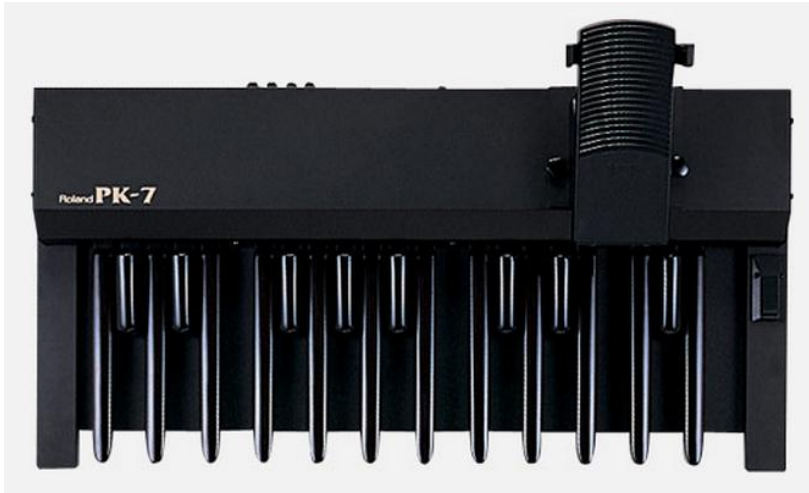


Sele 1.2. Hammond XPK 200 joonis pealtvaates [2]

Hammond XPK 200 näol on tegemist tuntud muusikainstrumentide tootja „Hammond“ kompaktse MIDI pedaalilauaga. Nagu näha ülaloleval joonisel (Sele 1.2), on mängimiseks kasutatava ala laius ainult umbes pool kogu seadme laiusest. Seetõttu on pedaalide mängimiseks kasutatav ala liiga lühike ning ei võimalda organistil mugavalt kasutada ühe jala

teise tagant läbi viimise tehnikat. Kasutatud mehhanismi ja lühikeste pedaalide tõttu on pedaalide kaldenurga erinevus vabastatud ja alla vajutatud asendis suur võrreldes täis suuruses pedaalilaudadega ning võõras suurtel orelikonsoolidel mängivatele organistidele.

1.1.2 Roland PK-7



Sele 1.2. Roland PK-7 pealtvaates [3]

Pedaalilaua mõõtmed: pikkus 905mm, laius 492mm kõrgus 264mm

Pedaalilaua kaal: 15,7kg

Klahvide arv: 20 [3]

Pedaalilaua orienteeruv hind internetipoodides on 1200€.

Roland PK-7 on suurtootja „Roland“ kompaktne MIDI pedaalilaud. Tegemist on Hammond XPK 200 otsese konkurendiga nii hinnaklassi kui ka omaduste poolest. Sellest tulenevalt on sarnased ka puudused. Roland PK-7 puhul on suudetud mängimiseks kasutatavat ala suurendada umbes 2/3 seadme laiuseni. Tulenevalt sellest ja suuremast kogulaiusest on ka pedaalid märgatavalt pikemad ja mängimine mugavam. Kuna mehhanism on sarnane, on ka sellel seadmel tunda pedaalide kaldenurga muutumist. Tänu sellele ja pikemale mängimiseks kasutatavale alale on pedaalide otstes noodi mängimiseks vajalik vajutuse sügavus ja tugevus tuntavalt erinev.

Turul leidub veel kümneid sarnaseid pedaalilaudasid. Siin näidatud 2 eksemplari on laialt levinud ja suurtootjate valmistatud ning iseloomustavad hästi sellesse turusegmenti kuuluvate seadmete omadusi.

1.1.3 Tüüpiline mehhanism

Hetkel turul olevates pedaalilaudades kasutatakse tihti mehhanisme, kus pedaal on ühendamiseks pedaalilaua raamiga kasutatakse lehtvedru. Pedaal liigub kahe vertikaalse, pedaali vabas olekus mitte pedaali puutuva juhiku vahel, mille ülesandeks on horisontaalsuunaliste nihete vähendamine. Seega määrab lehtvedru pedaali vajutamiseks vajamineva jõu ja pedaali liikumistrajektoori. Lisaks sellele peab lehtvedru ära hoidma soovimatu pedaali liikuvuse kõigis suundades peale vertikaalse suuna. Seega on lehtvedrul väga suur osa pedaalitunnetusest, mis organistini jõuab. Sellisel lahendusel on oma eeliseid: mehhanism on väga lihtne, töökindel, odav. Samas on sellisel lahendusel mitmeid puudusi. Pedaali all hoida on tunduvalt raskem kui pedaali liigutamist alustada ülemisest asendist. See on vastupidine mugavuse seisukohast, sest vajutuse algus peab organistile olema võimalikult tuntav ja konkreetne. Pedaali allasendis hoidmine võiks olla aga lihtsam, et kergendada akordide hoidmist. Pedaali kaldenurk muutub vajutuse käigus, seetõttu sõltub pedaali vajutussügavus sellest, millises kohas mängija jalg pedaali tabab. Kuna pedaal on raamile kinnitatud ainult ühest otsast ja ainult lehtvedruga, on hoolimata stabiliseerivatest juhikutest vastuvõtlik mängija vajutuse jõu horisontaalsuunalisele komponendile. Ideaalselt peaks pedaalitunnetus olema mängijale ühtlane, hoolimata sellest, kuhu mängimiseks kasutatavas alas jalg pedaali tabab.



Sele 1.3. Hammond pedaalilaua lehtvedrud [4]

1.2 Sobiva standardi valik

Paljud orelid on ehitatud enne standardite tekkimist meistrite oma reeglite järgi, seetõttu ei ole ebatavalised orelid, mis ei vasta lõpuni ühelegi standardile. Näiteks leidub Suurbritannias instrumente, mis kasutavad osaliselt erinevaid euroopalikke standardeid. [5]

AGO Ameerika Organistide Gild i.k. *American Guild of Organists* standard on peamiselt kasutusel Ameerika Ühendriikides. Seda standardit iseloomustab, nagu ka ISOB Registreeritud Orelihitajate Ühing i.k. *Incorporated Society of Organ Builders* standardit, nõgusus raadiusega 8 jalga, 6 tolli ($\approx 2,59$ meetrit). [5]

Nagu eelnevalt näiteks toodud seadmetel Roland PK-7 ja Hammond XPK 200, on kompaktsetel pedaalilaudadel pedaalide paigutus tavaliselt sirgjooneline, mis on ebasobiv nõgusa asetusega pedaalilaudu kasutavatele organistidele. Ergonoomiliselt on eelis nõgusatel pedaalilaudadel kuna nõgusa pedaalilaua puhul on äärmised pedaalid mängjale lähemal kui need oleks sirge laua puhul. Seetõttu on äärmised pedaalid nõgusa pedaalilaua puhul paremini kättesaadavad. Nõgusa pedaalilaua puhul on klahvid suunatud nõgusustsentrini poole, see muudab samuti äärmiste pedaalide vajutamise lihtsamaks kui sirge pedaalilaua puhul. AGO standard on väga sarnane Suurbritannias levinud ISOB standardile. Nii saaks loodav pedaalilaud olema sobilik nii Ameerika Ühendriikide kui ka Suurbritannia turu jaoks.

Traditsiooniliselt on meistrid valmistanud oreleid võttes eeskujuna standardite mõningatest aspektidest, ka eelpool näiteks toodud tänapäevased seadmed ei vasta lõpuni ühelegi orelihitamise standardile. Seetõttu on AGO standard valitud eeskujuks kuid seda on jälgitud valikuliselt ja muutustega, sobimaks paremini antud turusegmendi ja ka töö autori eelistustega.

2. PEDAALIMEHCHANISMI VÄLJATÖÖTAMINE

2.1. Pedaali mõõtmete ja omaduste valik AGO standardi eeskujul

2.1.1. Teisendused SI süsteemi.

AGO standard on loodud Ameerika Ühendriikides ning seetõttu on pikkusühikuteks ft (1 ft=304,8mm) jalg i.k. *foot* ja in (1 in=25,4mm) toll i.k. *inch*. Töös on kõik pikkuste teisendused millimeetritesse tehtud 1 mm täpsuseni. Standardis on massi ühikuna kasutusel lb (1 lb=453,59237g) nael i.k. *pound*. Töös on kõik massi teisendused tehtud 1g täpsusega.

2.1.2. Pedaali mõõtmed

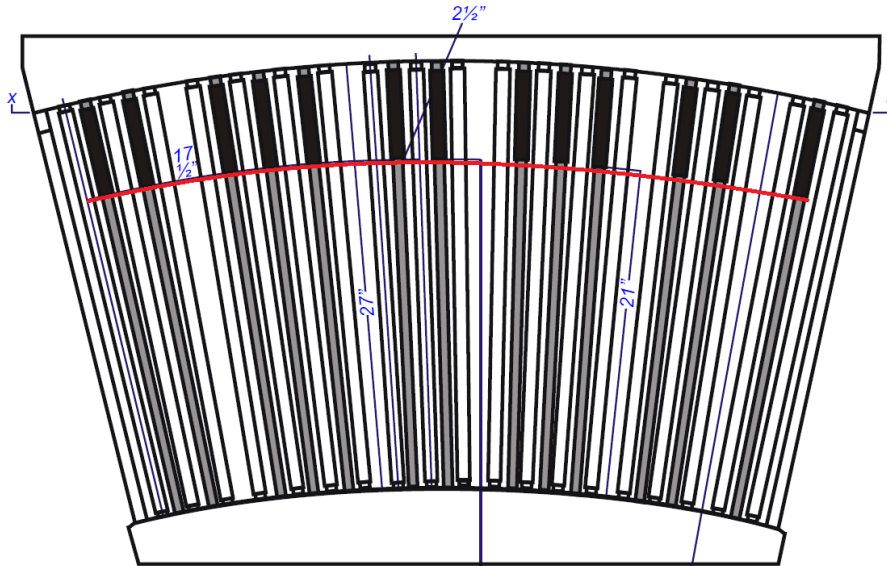
Kannalaua ja varbalaua vaheline kaugus: 27in. [6] Kannalaua ja varbalaua vaheline kaugus 27in= 686mm määrab pedaali pikkuse. Selline pikkus tuleneb standardis kasutatava mehhanismi vajadusest pika klahvi järgi, et vähendada klahvi kaldenurga muutust liikumiselt ülemisest asendist alumisse. Mängimiseks kasutatakse sellest pikkusest umbes poolt. Seetõttu valisin klahvi pikkuseks 340mm.

Valgete pedaalide laius: 7/8in – 15/16in. [6] Sellest vahemikust (22mm – 24mm) valisin 22mm laiuse. Sama laiuse valin ka mustade pedaalide jaoks, et must ja valge pedaal jagaksid võimalikult palju detaile. Seeläbi saab vähendada erinevate detailide arvu.

Vajutuse sügavus 1/2in. [6] 1/2in=13mm on vahemaa pedaali vaba ja alla vajutatud asendi vahel.

Mustade klahvide mängimiseks kasutatava pinna pikkus 6½in. [6] 165mm on kompaktse pedaalilaua jaoks liiga pikk kuna musti pedaale vajutatakse ainult varbaga ja selleks pole nii suur pikkus tingimata vajalik. Mõistlik on vähendada mustade pedaalide mängimiseks kasutatavat pinda ning selle arvelt suurendada vaba pinda valgetele pedaalidele. Heaks kompromissiks on 100mm mis tagab piisava pinna vajutamiseks, samas andes ruumi juurde valgetele pedaalidele. Tegemist on mõõtmega, mis näidispedaali valmistamist ei mõjuta. Valitud pikkuse sobivust saab katsetada alles prototüübi faasis, mida käesolev töö ei hõlma.

Kahe lähima valge pedaali tsentrite vaheline kaugus musta klahvi mängimiseks kasutatava osa mängija poolses otsas $2\frac{1}{2}$ in. On kõige tähtsam nimetatud mõõtmetest ja on tähtis et seda kasutataks muutmata. [6] Musta klahvi mängimiseks kasutatava osa mängija poolne ots on tähistatud joonisel Sele 2.1. punase kaarega. $2\frac{1}{2}$ in=64mm.



Sele 2.1. Musta klahvi mängimiseks kasutatava osa mängija poolne ots AGO pedaalilaul. [6]

Mustade klahvide mängimiseks kasutatava ala kõrgus võrreldes valgete pedaalidega mängijapoolses otsas: 1in, teises otsas $\frac{1}{2}$ in kõrgem. [6] Mängijapoolses otsas 25mm on sobilik kuid kuna musta pedaali mängitava ala pikkus on valitud lühem, on sobilik kõrgus teises otsas valitud 33mm.

Pedaalide paigutuse kaardumus -ja nõgususraadius 8ft 6 in. [6] 8ft 6 in =2591mm. Nagu ka eelmise mõõtme puhul saab selle mõõtme sobivust katsetada alles prototüübi faasis.

Näidispedaalil see kasutust ei leia.

2.1.3 Pedaali vajutamiseks vajaminev jõud

Vajutuse raskus $2\frac{1}{2}$ lb – 3lb musta klahvi mängimiseks kasutatava osa mängija poolses otsas [5] $2\frac{1}{2}$ lb=1134g=1,134 kg 3lb=1361g=1,361 kg

$$F_s = m \cdot g \quad (2.1)$$

kus F_s - vajutuseks vajalik jõud

m - mass

g – raskuskiirendus

Märkus. raskuskiirenduseks on võetud $9,8\text{m/s}^2$

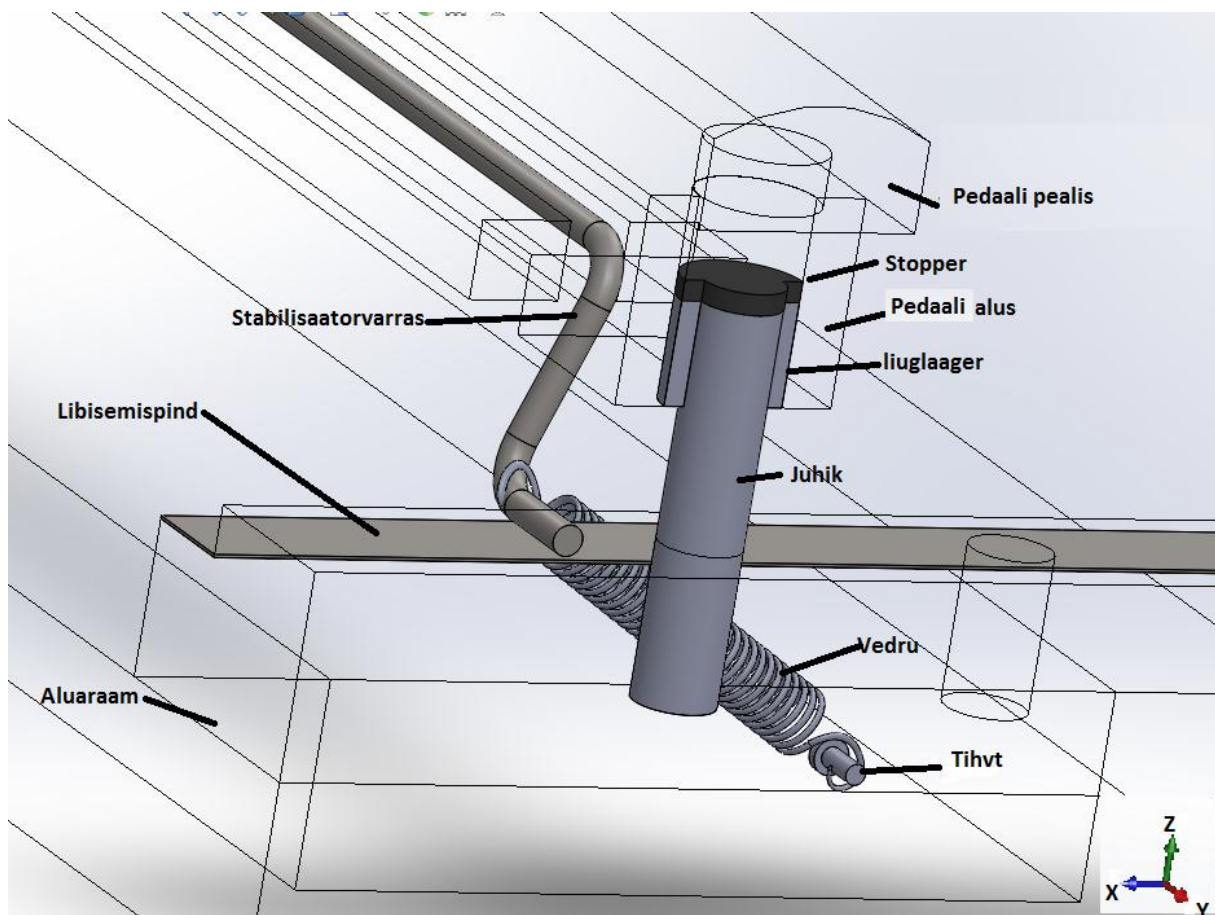
Tabel 2.1. Pedaali vajutamiseks vajaminev jõud

m kg	F_s N
1,134	11,1
1,361	13,3

Saadud on jõu F_s minimaalne ja maksimaalne sobilik väärtus, mis on vajalik pedaali vajutamiseks ülemisest asendist alumisse.

2.2 Pedaali mehhanism

Mehhanismi loomisel kasutati AGO standardit eeskujuks võttes eelnevalt määratud mõõtmeid ja omadusi. Vältida üritati tüüpilisi kompaksete pedaalilaudade puudusi ja luua organisti jaoks ergonomiline, traditsioonilisele orelikonsoolile sarnanev pedaalitunnetus.



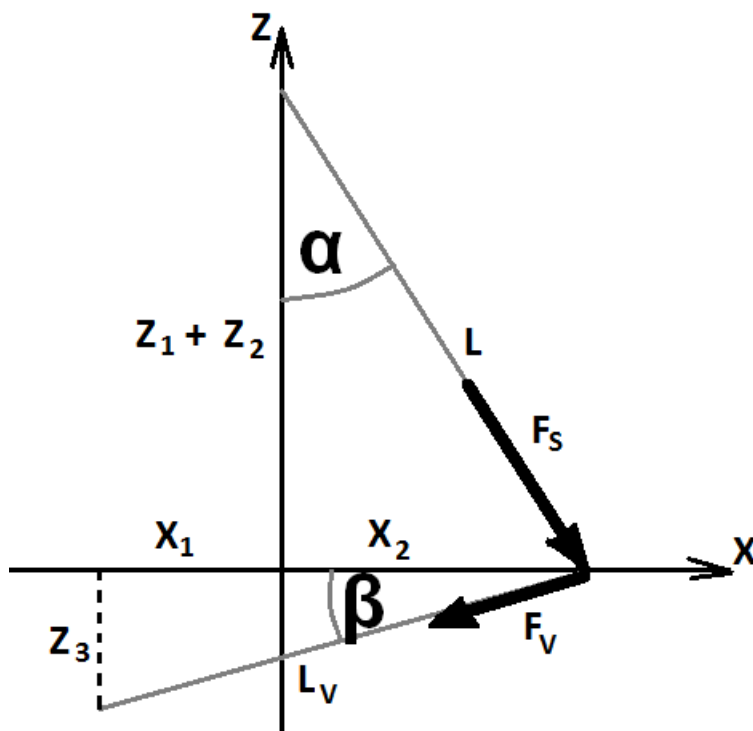
Sele 2.2. Pedaali mehhanism

pehmedada pedaali jõudmist alumisse asendisse koostöös pedaali pealisega. Liuglaager on kinnitatud pedaali alusele ja liigub mööda juhikut tagades nii Z-suunalise translatoorse liikuvuse ja piirates teisi liikumisvõimalusi. Ümber X-telje rotatsioonide piiramisel aitab kaasa stabilisaatorvarras. Kokku on ühes pedaaalis 15 detaali, millest 9 on erinevad. Seda on rohkem kui lihtsamates kompaksetes pedaalimehhanismides kuid vähem võrreldes näiteks klaveri klahvimehhanismiga. Steinway klaveri ühe klahvi mehhanism koosneb 57 erinevast detailist [7].

2.3 Pedaali mehhanismi dimensioneerimine

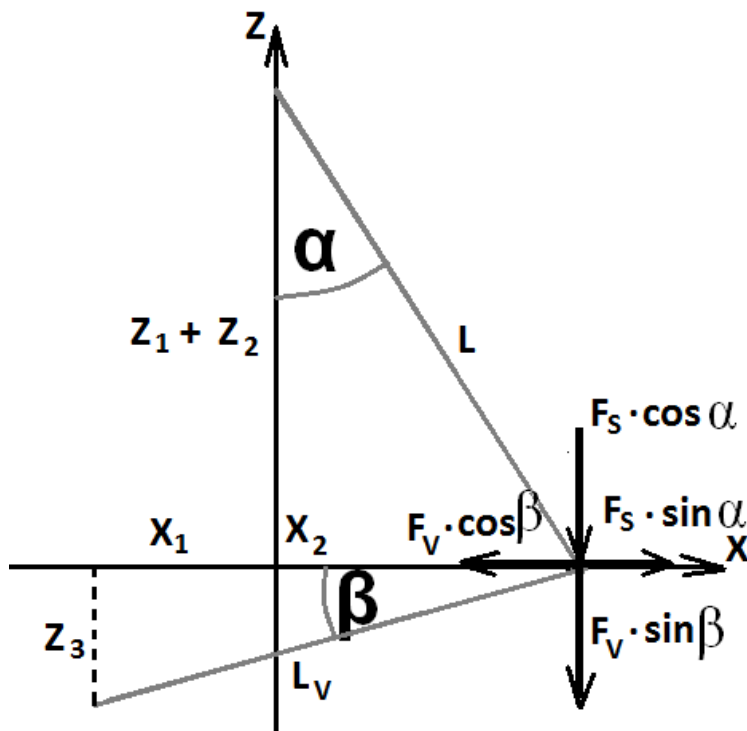
2.3.1 Pedaali mehhanismi lihtsustatud matemaatiline mudel

Mehhanismi lihtsustatud matemaatiline mudel oli vajalik mehhanismi sobiliku geomeetria leidmiseks, et loodav näidispedaal vastaks võimalikult täpselt seatud tingimustele. Mudeli abil valiti ka vedrud ja libisemispinna materjal.



Sele 2.4. mehhanismi mõõtmed ja jõud

Arvutuste tegemiseks on mehhanismis mõjuvad jõud jagatud X-telje ja Z-telje suunalisteks komponentideks.



Sele 2.4 Jõudude X-telje ja Z-telje suunalised komponendid

Tabel 2.2. Mudelis kasutatavate tähistete tähendused

Joonis	MATLAB	tähendus
Z_1	Z1	pedaali kaugus alumisest asendist
Z_2	Z2	pedaali soone põhja kaugus libisemispinnast pedaali alumises asendis
Z_3	Z3	tihvti Z-telje suunaline kaugus libisemispinnast
X_1	X1	tihvti X-telje suunaline kaugus Z-teljest
X_2	X2	stabilisaatorvarda alumise otsa ja vedru stabilisaatorvarda külge kinnituva otsa X-telje suunaline kaugus Z-teljest
L_V	Lv	vedru pikkus
F_V	Fv	vedru jõud
F_S	Fs	vajutuse jõud
α	alpha	nurk Z-telje ja stabilisaatorvarda vahel
β	beta	nurk vedru ja X-telje vahel
L	L	stabilisaatorvarda pikkus

	Z10	Z1 väärtus pedaali ülemises asendis
	Lv0	vedru algpikkus
	Fv0	jõud, millest alates hakkab vedru pikkus suurenema
	FvX	vedru jõu suurenemine vedru pikenemisel, ühikuks N/mm
	muu	hõõrdetegur μ
	X20	stabilisaatorvarda alumise otsa ja vedru stabilisaatorvarda külge kinnitava otsa X-telje suunaline kaugus Z-teljest pedaali ülemises asendis
$\sin\alpha$	sinalpha	nurga α siinus
$\cos\alpha$	cosalpha	nurga α koosinus
$\sin\beta$	sinbeta	nurga β siinus
$\cos\beta$	cosbeta	nurga β koosinus



Sele 2.5. Stabilisaatorvarda pikkus L

2.3.2 Arvutused MATLAB tarkvaraga

Arvutuste tegemiseks valiti järgnevad suurused: Stabilisaatorvarda pikkus L, mis koos valitud pedaali soone põhja kaugusega libisemispinnast pedaali alumises asendis Z2 määrab nurga Z-telje ja stabilisaatorvarda vahel alpha. Tihvti Z-telje suunaline kaugus libisemispinnast Z3 ja vedru algpikkus Lv0 määravad nurga beta. Vedru omadused Lv0, Fv0 ja FvX on valitud kasutades Alas-Kuul AS pakutavat valikut Lesjöfors AB toodetavatest tõmbevedrudest. Hõõrdetegur μ on määratud kasutatud materjalidega. Teras tsingitud terasel on staatiliseks hõõrdeteguriks 0,5, liughõõrdetegur 0,45 määrimata pindade korral [8]. Suurused pedaali kaugus alumisest asendist Z1 ja hõõrdetegur muu on antud üherealiste 14 veeruliste maatriksitena, et võimaldada mehhanismi toimimise uurimist pedaali ülemisest asendist alumiseni 1 mm sammudena.

```

1 - L = 29.0;
2 - Z1 = linspace (13,0,14) ;
3 - Z10=13 ;
4 - Z3=10 ;
5 - Z2=11 ;
6 - Lv0=25 ;% vedru algpikkus
7 - Fv0=0.9 ; %ud N millest alates hakkab vedru pikenema
8 - FvX=0.130 ; % N vedru jõu suurenemine iga pikenetud mm-ga
9 - muu=[0.5 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45] ;

```

Sele 2.6. valitud suurused

Edasi leitakse nurk α , pikkused: stabilisaatorvarda alumise otsa ja vedru stabilisaatorvarda külge kinnituva otsa X-telje suunaline kaugus Z-teljest X_2 , stabilisaatorvarda alumise otsa ja vedru stabilisaatorvarda külge kinnituva otsa X-telje suunaline kaugus Z-teljest pedaali ülemises asendis X_{20} , tihvti X-telje suunaline kaugus Z-teljest X_1 . Nende abil leitakse vedru pikkus. Vedru pikkus pidi jääma valitud vedru lubatud pikkusvahemikku.

```

11 - alphaDeg=acosd((Z1+Z2)/L)
12 - alpha=acos((Z1+Z2)/L) % nurk stabilisaatorvarda ja Z telje vahel
13 - sinalpha=sin(alpha)
14 - cosalpha=(Z1+Z2)/L
15 - X2=sqrt(power(L,2)-power((Z1+Z2),2))
16 - X20=sqrt(power(L,2)-power((Z10+Z2),2))
17 - X1=sqrt(power(Lv0,2)-power((Z3),2))-X20
18 - Lv=sqrt(power(Z3,2)+power((X1+X2),2)) % vedru pikkus

```

Sele 2.7. Vedru pikkus

Vedru pikkus F_v koosneb kahest komponendist: jõud, millest alates hakkab vedru pikkus suurenema F_{v0} ja vedru jõu suurenemine vedru pikenemisel. Mõlemad komponendid on korrutatud 2-ga, kuna vedrusid on 2. Nurk vedru ja X-telje vahel β on vajalik vajutuse jõu leidmisel. Vedru jõu ja vajutuse jõu Z-telje suunalistest komponentidest tulenevad hõõrdejõud ja vedru jõu X-telje suunaline komponent on vastassuunalised vajutuse jõu X-telje suunalisele komponendile. Tasakaaluvõrrand stabilisaatorvarda ja vedru ühenduspunktis X-telje suunas avaldub järgmiselt:

$$F_S \sin \alpha = \mu F_S \cos \alpha + \mu F_V \sin \beta + F_V \cos \beta \quad (2.2)$$

kus F_S – vajutuse jõud

α – nurk Z-telje ja stabilisaatorvarda vahel

μ – hõõrdetegur

F_V – vedru jõud

β – nurk vedru ja X-telje vahel

avaldades vajutuse jõu F_S saame:

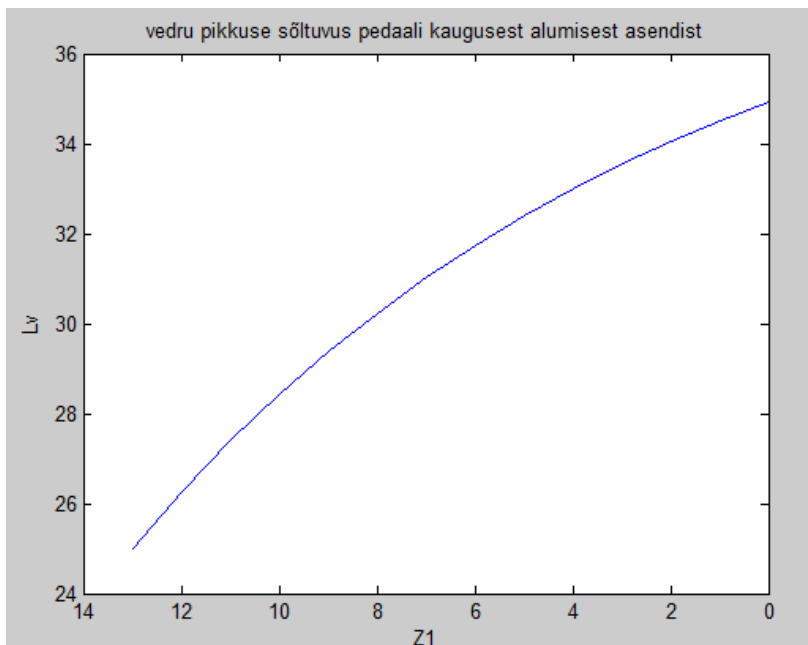
$$F_S = \frac{\mu F_V \sin \beta + F_V \cos \beta}{\sin \alpha - \mu \cos \alpha} \quad (2.3)$$

```
20 - beta=acos((X1+X2)./Lv) % nurk vedru ja X-telje vahel
21 - sinbeta=sin(beta)
22 - cosbeta=((X1+X2)./Lv)
23 - Fv=((Lv-Lv0)*2*FvX)+2*Fv0
24 - Fs=(muu.*sinbeta+Fv.*cosbeta)./(sinalpha-muu.*cosalpha)
```

Sele 2.8. Vedru jõud ja vajutuse jõud

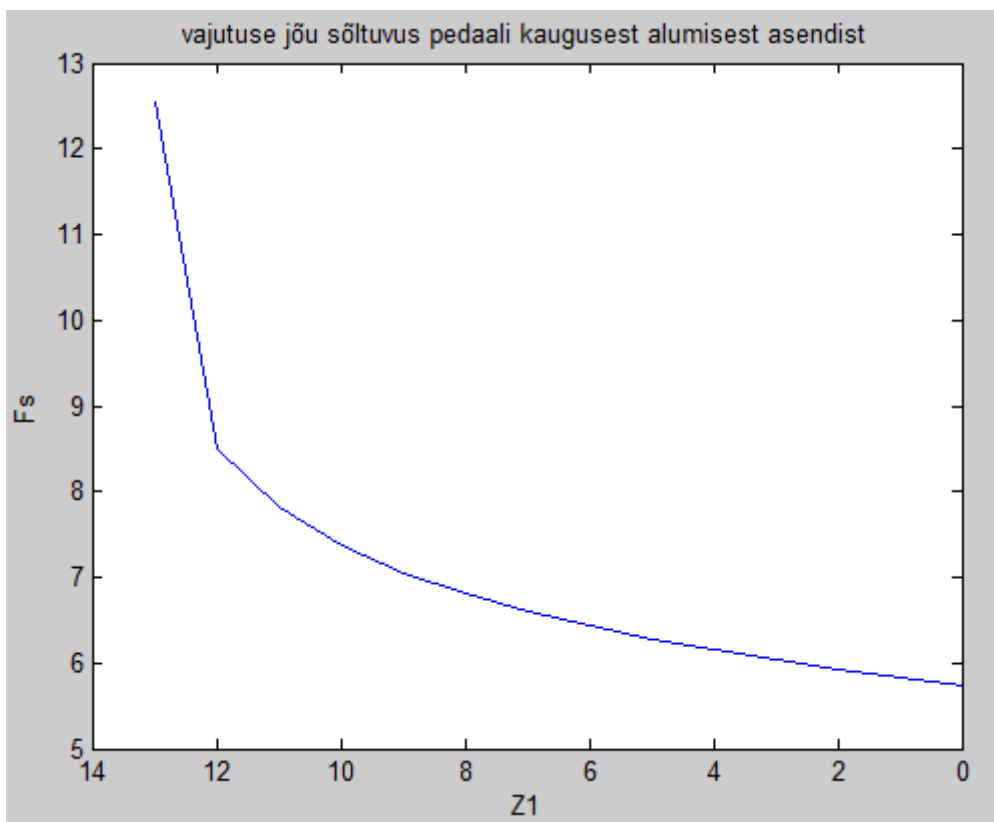
2.3.3 Arvutuste tulemused

Vedru pikkuse leidmine aitab kinnitada valitud vedru sobivust antud mehhanismi. Valitud vedru pikkus pidi jääma tootja poolt lubatud piiridesse. Valitud suurustele jõud, millest alates hakkab vedru pikkus suurenema F_{v0} ja vedru jõu suurenemine vedru pikenemisel F_{vX} vastab Lesjofors AB vedru katalooginumbriga 3710, vedru maksimaalne lubatud pikkus on 59mm [8] Seega on tegemist sobiva vedruga.



Sele 2.9. Vedru pikkuse sõltuvus pedaali kaugusest alumisest asendist

Vajutuse jõu F_S leidmine oli vajalik hindamaks pedaalimehhanismi sobivust seatud nõudmistele. Vajutuse jõud F_S pidi jääma eelnevalt AGO standardi põhjal valitud vahemikku 11,1 N kuni 13,3 N, nagu näha graafikult Sele 2.10., see ka õnnestus. Vajutuse jõu F_S sõltuvuse leidmine pedaali kaugusest alumisest asendist Z1 võimaldas hinnata loodava pedaali tunnetust. Eesmärgiks oli seatud, et pedaali all hoida oleks mängijal märgatavalt kergem kui ülemisest asendist alla vajutada. Vajutuse jõu F_S sõltuvus pedaali kaugusest alumisest asendist Z1 graafik Sele 2.10. näitab, et vajalik vajutuse jõud pedaali ülemisest asendist pedaali liikuma hakkamiseks on vajaminev jõud 12,5 kN kuid pedaali liikumisel alumisse asendisse langeb vajaminev jõud 5,7 Njuutonini. Tegelik pedaali all asendis hoidmiseks vajalik jõud on aga veelgi väiksem, sest hõõrdejõud on vastassuunaline liikumist põhjustavale jõule. Lisaks on seisuhõõrde tegur suurem liughõõrde tegurist [9]. Antud lihtsustatud mudel käsitleb aga ainult pedaali liikuma hakkamist ja liikumist alumise asendini.



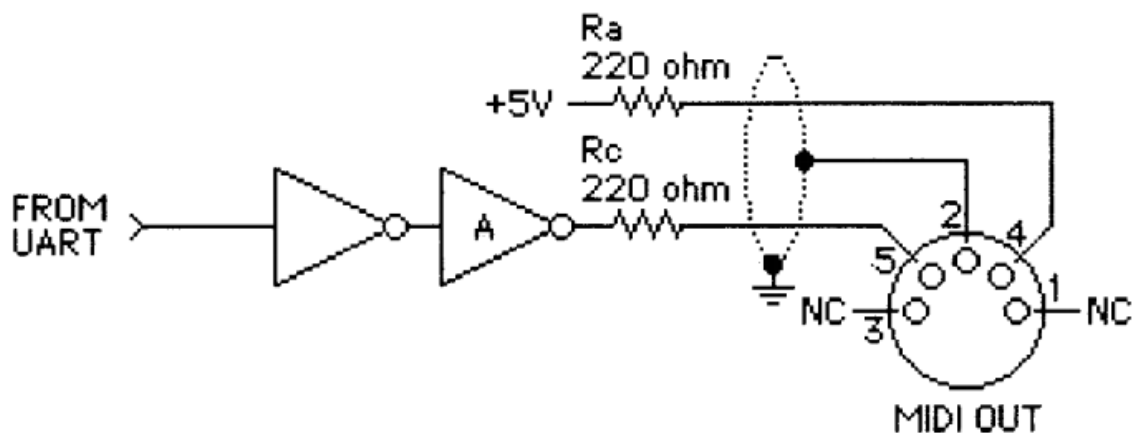
Sele 2.10. Vajutuse jõu sõltuvus pedaali kaugusest alumisest asendist

3. NÄDISPEDAALI ELEKTROONIKA DISAIN JA PROGRAMMEERIMINE

3.1 Näidispedaali elektroonika disain

3.1.1 MIDI standard

MIDI Elektriline spetsifikatsioon määrab, et seadmete ühendamiseks kasutatakse viie kontaktiga DIN Saksamaa Rahvuslik Standardiorganisatsioon *Deutsches Institut für Normung* DIN 41524 pistikutega, varjestatud keerdpaari. Kaabli varjestus on ühendatud maandusega ainult MIDI väljundipoolsest otsast. Seadmetel kasutatakse pesasid, kaablitel pistikuid. Takistid on vähemalt 5% täpsusklassiga. [10]



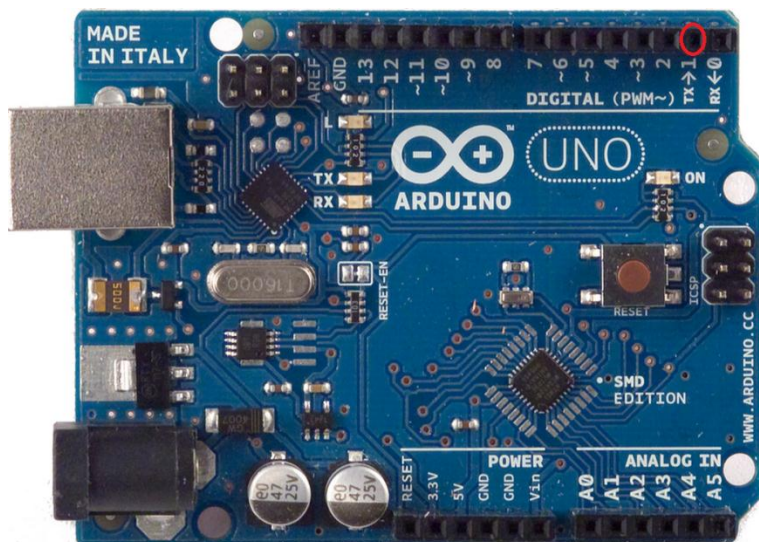
MIDI Standard Hardware

Sele 3.1. Standartne MIDI väljundi skeem.

UART Universaalne asünkroonne vastuvõtja/saatja *universal asynchronous receiver/transmitter*, inverteri ja inverteeritud väljundiga operatsioonivõimendi ülesanded täidetakse Arduino Uno arendusplaadiga. Muudes aspektides on näidispedaali elektroonika disainis MIDI standardi elektrilist spetsifikatsiooni järgitud.

3.1.2 Arduino Uno

Arduino Uno on Atmega 328 mikrokontrollerit kasutav arendusplaat. Arduino Uno kasutamine võimaldas hoida komponentide arvu väikse. Arduino Uno oli tänu Atmega328 UART võimekusele suurepäraseks tööriistaks MIDI väljundi loomiseks. UART väljund võimekus on kättesaadav arendusplaadi digitaalsest kontaktist 1.



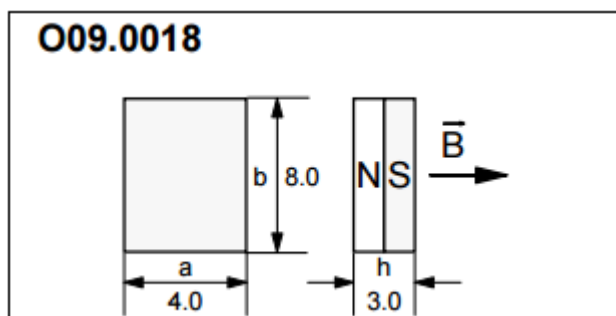
Sele 3.2. Digitaalne väljund 1 Arduino Uno arendusplaadil

3.1.3 Sensor

Sensori eesmärgiks on tuvastada pedaali vajutus. Selleks on erinevaid võimalusi. Odavam lahendus on mittefikseeruva tavaliselt avatud üherealise kahepositsioonilise lüliti kasutamine. Tegemist on pedaalilaudadel tihti kasutatava lahendusega. Mehaanilisel lülitamisel on rida puudusi. Lülimehhanism tekitab lülitamisel heli, lülitimehhanism kulub ja selle omadused, kaasa arvatud lülituskoht muutuvad. Lülitusel võivad tekkida soovimatud häiringud.

Keelreled pakuvad pikemat tööiga ja on väliskeskkonnast vähem mõjutatud, lülitamine toimub hääletult [11]. Halli andurid on pooljuht andurid. Neid iseloomustab ülimalt pikk tööiga, stabiilsed omadused, häiringute ja heli puudumine, puuduvad liikuvad osad, väga vähe väliskeskkonna poolt mõjutatav, väikesed mõõtmed[12]. Valitud bipolaarset Halli andurit TLE4945 iseloomustab toitepinge V_S vahemik 3,8 V kuni 24 V, lülitumise piirinduktsioonid 10 mT ja -6 mT. Andur kasutab PG-SSO-3-2 pakendit.[13]

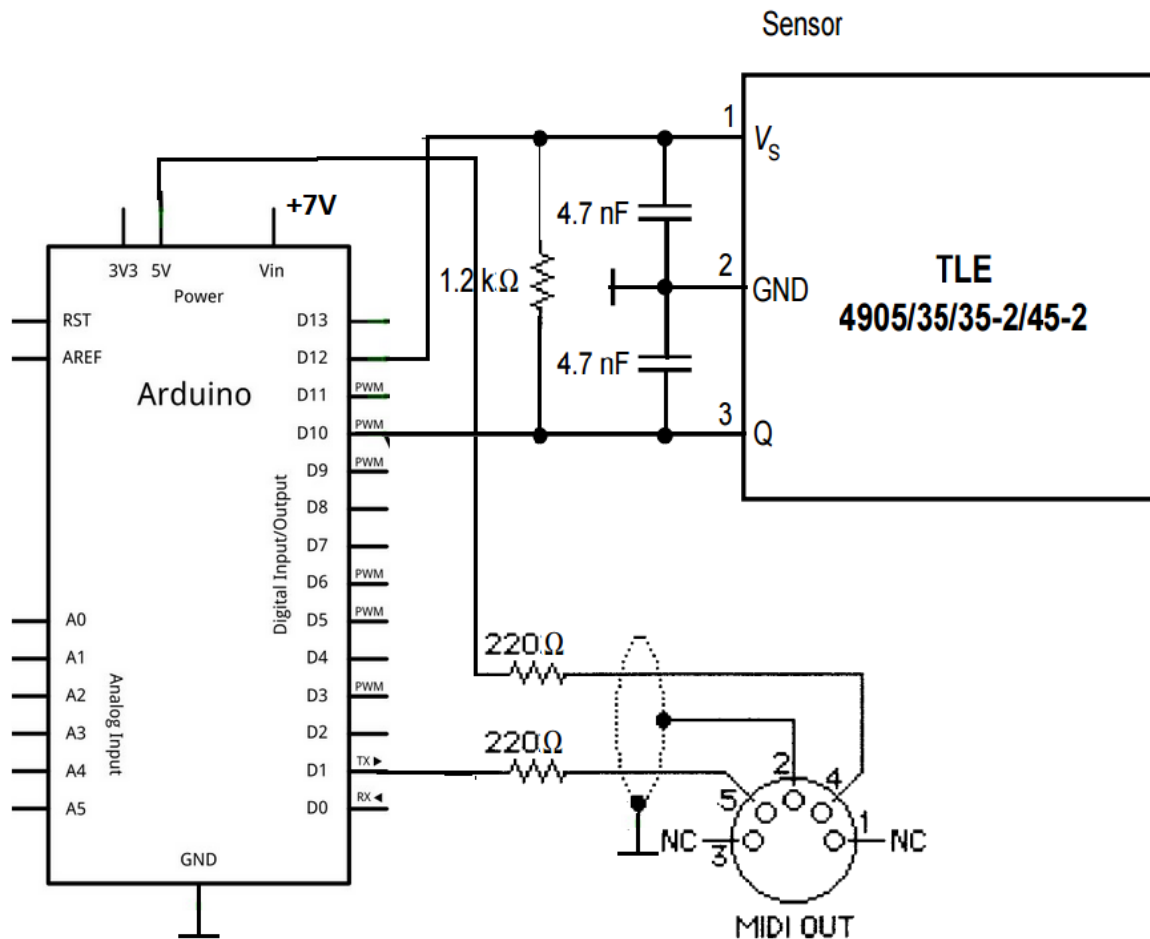
Anduri lülitamiseks on valitud NdFeB magnet oma väikeste mõõtmete tõttu. Valitud magneti O09.0018 induktsioon B joonisel Sele 3.3. näidatud suunas 4mm kaugusel on 45,4mT [14]



Sele 3.3. Valitud magneti O09.0018

3.1.4 Näidispedaali elektroonika skeem

MIDI väljund on koostatud vastavalt MIDI elektroonilisele spetsifikatsioonile. Halli andur TLE 4945 on rakendatud vastavalt tootja standardskeemile.



Sele 3.4 Näidispedaali elektroonika skeem

3.2 Programmeerimine

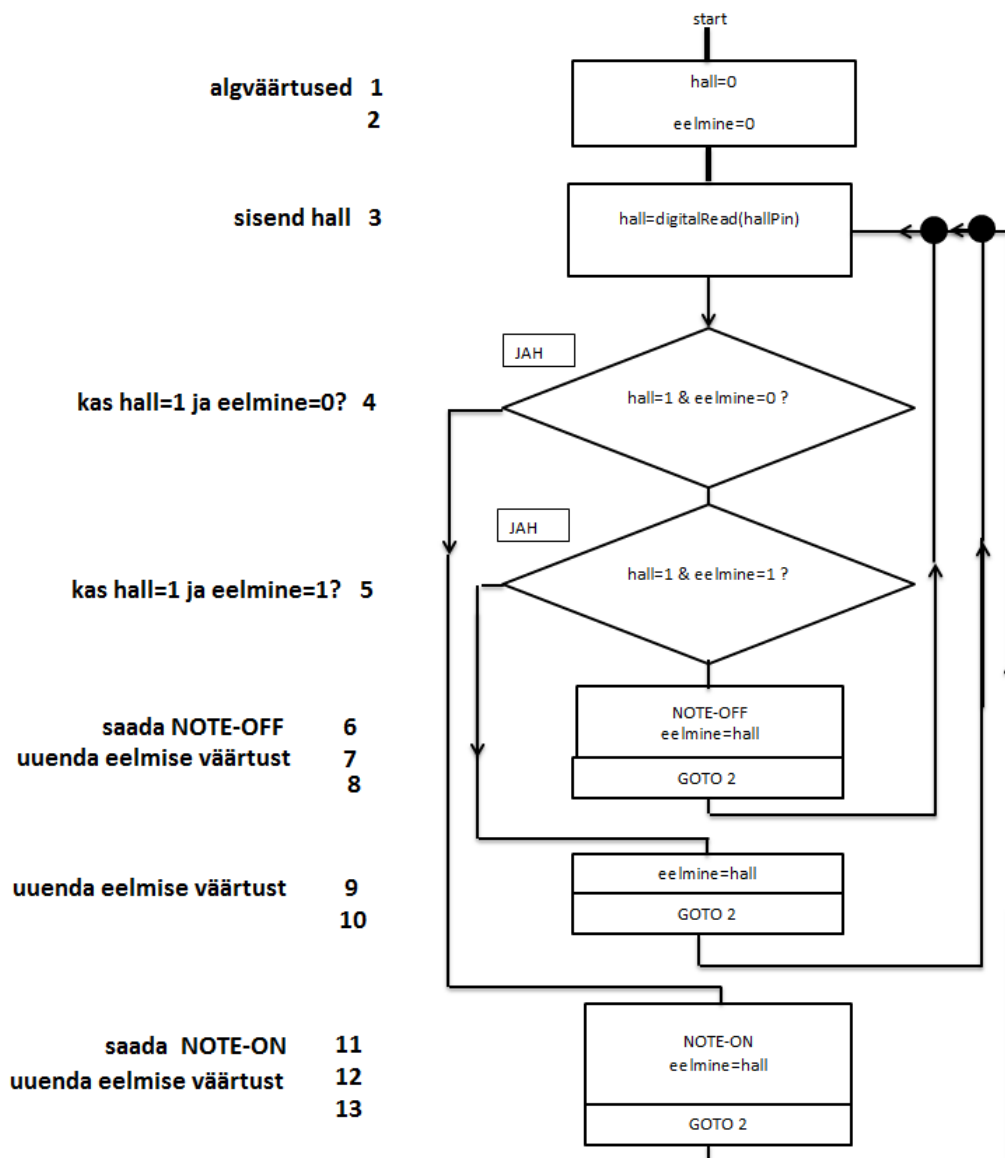
3.2.1 MIDI standard

MIDI suhtlus saavutatakse läbi mitmebaidiste sõnumite, mis koosnevad olekubaidist ja ühest või kahest andmetebaidist. Olekubaidid on 8-bitised binaarnumbrid, milles MSB tähtsaim bitt *Most Significant Bit* on 1. Olekubaidi eesmärgiks on määrata sõnumitüüp, ehk järgnevate andmebaidide eesmärk. Olekubaidid panevad vastuvõtja uude olekusse ka siis kui viimane sõnum ei olnud veel lõppenud. Olekubaidile järgnevad andmebaidid on 8-bitised binaarnumbrid, milles MSB on alati 0. Igale olekubaidile peab järgnema õige arv andmebaite. Noodi alustamise käsk NOTE-ON koosneb olekubaidist 144 (10010000), andme baidist mis määrab noodi, andme baidist mis määrab valjuduse. Noodi lõpetamise käsk NOTE-OFF

koosneb olekubaidist 128(10000000), andme baidist mis määrab noodi, andme baidist mis määrab valjuduse. Nooti saab lõpetada ka kasutades NOTE-ON käsku kuid määrates valjuduseks 0 (00000000). [10]

3.2.2 Programm

Programm on loodud katsetamaks näidispedaali MIDI seadmena. Programm kasutab sensorilt saadud infot klahvi vajutuse kohta noodi mängimise alustamiseks ja lõpetamiseks.



Sele 3.5. Programmi algoritm

```

const int hallPin = 10;    // Halli sensori kontakt
const int PowPin = 12;    // Halli sensori toite kontakt
// variables will change:
int hall = 0; // Halli sensori lugemisek muutuja
int eelmine = 0;

void setup() {

pinMode(PowPin, OUTPUT);
// Halli sensori pin sisendiks
pinMode(hallPin, INPUT);

Serial.begin(31250);
    delay(1000);
}

void loop()
{
    digitalWrite(PowPin, HIGH);
    delay(10);
    // loe sensorit
    hall = digitalRead(hallPin);
    digitalWrite(PowPin, LOW);

    if (hall == HIGH && eelmine == LOW) {
        // saada Note ON käsk
        Serial.write(144);
        Serial.write(21);
        Serial.write(127);
        eelmine = hall;
    }
    else if (hall == HIGH && eelmine == HIGH) {
        // ära saada käsku

        eelmine = hall;
    }
    else {
        // Note OFF käsk
        Serial.write(144);
        Serial.write(21);
        Serial.write(0);
        eelmine = hall;
    }
}
}

```

Sele 3.6. Programmi kood

4. NÄDISPEDAALI VALMISTAMINE, TESTIMINE

4.1 Nädispedaali valmistamine

Alusraami, pedaali aluse ja pedaali pealise valmistamiseks valiti kasevineer. Kasevineeri kasuks räägib esteetiline välimus, soodne hind võrreldes alumiiniumi, terase ja plastidega. Kasevineer on laialdaselt muusikainstrumentide valmistamiseks kasutatud leidev materjal. Võrreldes saematerjaliga on vineer tugevusomadused 1,5-2 korda suuremad, lisaks räägib vineeri kasuks madal soojus- ja helijuhtivus ja väike mass[15]. Samuti on tegemist loodussõbraliku materjaliga, mille toorainet saadakse ka Eestist. Kasevineerist detailid valmistati CNC freespingil kuna selline töötlus võimaldas suurt täpsust ja vähest järeltöötlust vajadust. Töö käigus ilmnes, et väga tähtis on kvaliteetne ja terav freesitera, sest nii saavutatakse esteetilisem tulemus ja vajadus lihvimise järgi on väiksem.

Vertikaalsete juhikute materjaliks on valitud alumiinium. Alumiinium on kergesti töödeldav ja moodustab kaitsva, samas esteetilise välimusega oksiidikihi. Eelnevalt poleeritud ümarmaterjal lõigati mõõtu treipingil. Tänu heale töödeldavusele olid poleerimis- ja lõikeprotsess vähe aega nõudvad. Libisemispinna materjaliks on tsingitud terasplekk. Tsingitud terasplekk on hea korrosioonikindlusega kergesti töödeldav ja soodne. Valitud materjali töödeldavus oli sedavõrd hea, et detailid lõigati välja plekikäärdega. Stabilisaatorvarda ja tihvti materjal on madala süsinikusisaldusega teras soodsa hinna ja kerge töödeldavuse tõttu. Stopper valmistati käsitööna butüülkummist.



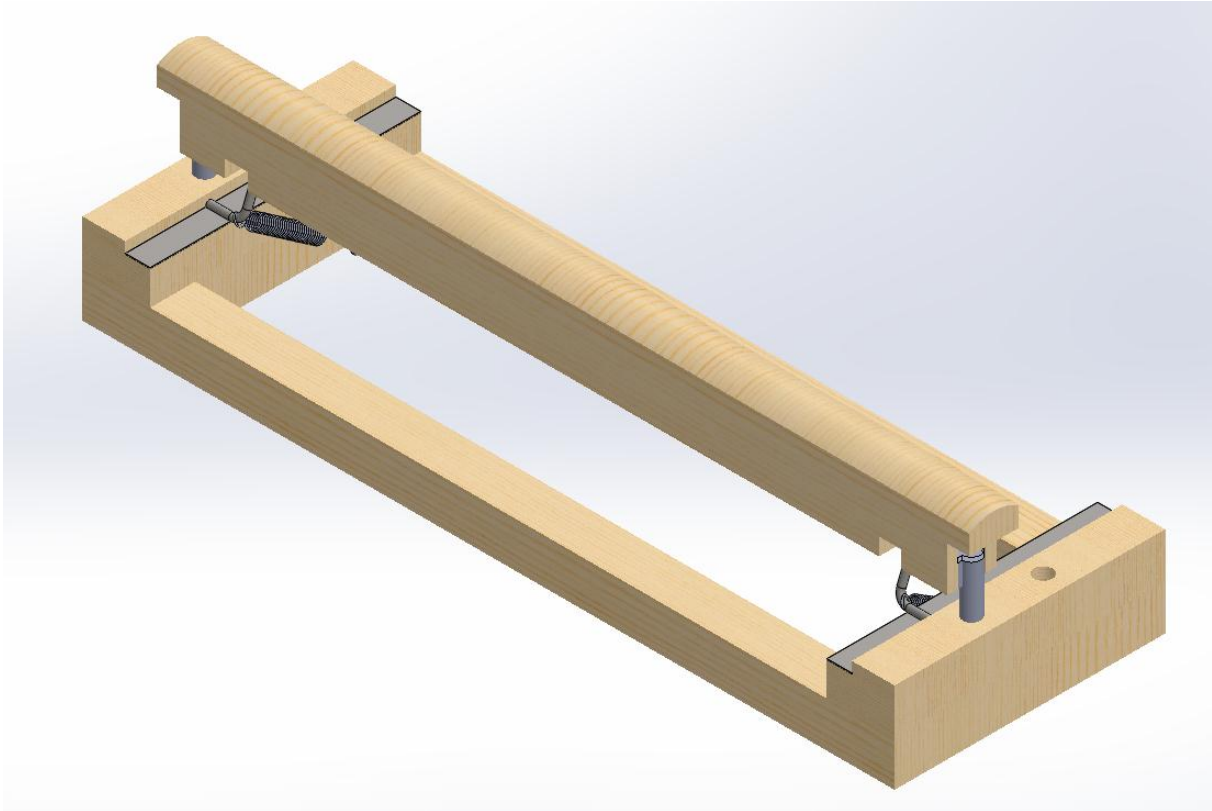
Sele 4.1 alusraam libisemispindade ja juhikutega, pedaali alus

4.2 Näidispedaali testimine

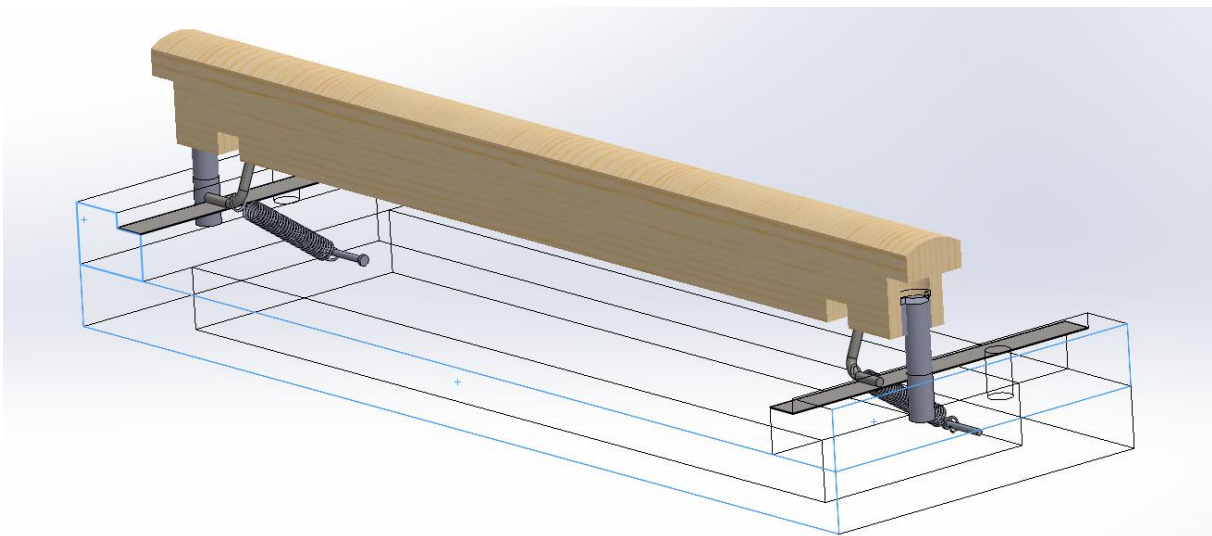
Näidispedaali testimise käigus hinnati pedaali omadusi eelkõige tunnetuslikult. Proovides pedaali vajutada erinevatest suundadest ja erinevatesse kohtadesse sai selgeks, et mehhanism saab soovimatutes suunades liikumiste piiramisega hästi hakkama. Pedaali tunnetus andis alust oletusele, et mehhanism toimib sarnaselt matemaatilises mudelis arvatatuga. Viidi läbi ka lihtne vastupidavustest, kus pedaali vajutati ülemisest asendist alumisse sagedusega 2 korda sekundis üle 1200 korra. Kulumist ja purunemisi testimise käigus ei täheldatud.

5. VÕIMALIK PEDAALILAUA KOOST

Kuna antud töö keskendus pedaalimehhanismi väljatöötamisele ja sellest tulenevalt lahendati küsimusi ühe pedalaali mastaabis. Ka siin toodud koost on ühe pedalaali mastaabis.



Sele 5.1 Pedaalilaua koost



Sele 5.2. Ühe pedalaali koost

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli välja töötada kompaktne ja ergonoomiline pedaalilaud, mis vastaks MIDI tehnilisele standardile. Tehes järeldusi loodud pedaalimehhanismist, saab loodud lahenduse põhjal konstrueeritav pedaalilaud olema praegu turul olevatele kompaktsetele pedaalilaudadele sarnaste mõõtmetega kuid pakkuma oluliselt paremat ergonoomikat. Suuresti aitab selles kaasa fakt, et kui praegu turul olevate pedaalilaudade mängimiseks kasutatav ala moodustab kui 2/3 kogu pedaalilaua pindalast pealtvaates, siis loodud lahendusel on see kogu pindala pealtvaates. See tähendab suurtele orelikonsoolidele omast mängimispinda. Teiseks oluliseks omaduseks on võrreldes praeguste kompaktsete MIDI pedaalilaudadega tunduvalt rafineeritum pedaalitunnetus. Pedaali vajutamiseks vajaminev jõud on valitud vastavuses AGO standardile. Koostatud matemaatilise mudelit aluseks võttes dimensioneeriti mehhanism. Arvutatu põhjal loodi näidispedaal, mille testimine andis reaalse ettekujutuse loodud süsteemist. Näidispedaali pedaalitunnetus vastas seatud kriteeriumitele.

Eduka lõpplahenduse eelduseks oli põhjalik eeltöö, mis algas olemasolevate kompaktsete MIDI pedaalilaudadega tutvumise teel. Uurimisobjektideks valiti kaks laialt levinud ja antud turusegmenti hästi iseloomustavat pedaalilauda. Selgusid seadmete põhilised puudused, milleks oli ebaotstarbekas ruumi kasutus, eriti arvestades, et tegu on kompaktsete pedaalilaudadega. Teiseks odava ja lihtsa pedaalimehhanismi nimel tehtud järeleandmised pedaalitunnetuses organisti jaoks. See süvendas veelgi veendumust et antud töös tuleb suurimat rõhku pöörata meeldiva pedaalitunnetuse loomiseks. Parima ergonoomika leidmiseks võeti appi ka olemasolev oreliehitusstandard, valituks osutus AGO standard. Vastavlt standardile valiti pedaali tähtsamad mõõtmed ja omadused. Pedaali tunnetuse osas oli inspiratsiooni allikaks kvaliteetse klaveri klahvi tunnetus. Loodud mehhanismi dimensioneerimiseks kasutati MATLAB simulatsioonikeskkonnas loodud matemaatilist mudelit. Mudel oli loodud suurte lihtsustustega kuid hilisemate katsete põhjal võib arvutused lugeda õnnestunuteks.

Näidispedaali loomine võimaldas lisaks arvutuste paikapidavusele katsetada ka erinevate materjalide töödeldavust ja sobivust antud mehhanismi detailide valmistamiseks. Autorile pakkus erilist huvi kasevineerist detailide valmistamine CNC freesimise teel. Varasemad kogemused sellise materjali freesimisel puudusid. Töö käigus selgus, et antud materjal on sellisel viisil kergesti töödeldav ning saavutatav kvaliteet piisavalt hea, et esteetilisuse nimel

on järeltöötuse vajadus vaid minimaalne. Näidispedaalil kasutatud elektroonika oli katsetuseks Halli efekti anduri sobivusele antud ülesandes. Kuna töö käigus otsustati keskenduda pedaali mehhanismi arendamisele, mitte terve pedaalilaua arendamisele on ka viimases punktis pakutud võimalik pedaalilaua koost ühe pedaali ulatusega.

SUMMARY

The aim of this final thesis for Bachelor studies was to create a compact and ergonomic pedalboard, that would be coherent with MIDI technical standard. Analysing the created pedal mechanism, it is possible to say that a pedalboard built with this mechanism will be similar in size to compact pedalboards currently on the market but it would offer far superior ergonomics. Largely it comes down to the fact, that compact pedalboards currently on the market have a playable area up to $2/3$ of their total horizontal surface area, where as the solution created here has all the horizontal surface area as playable area. This means a playable area the size of a large organ console pedalboard. The second important advantage when comparing to a compact MIDI pedalboard currently on the market is a much more refined pedal feel. The force needed to push the pedal was chosen in accordance with AGO standard. The mechanism was dimensioned using a mathematical model. Using the calculated values a sample pedal was created. Testing the sample pedal gave a real feel for the mechanism that was created. Pedal feel of the sample pedal was in accordance to the anticipated result.

The key to the successful ending was thorough preparation work. It started with looking at compact MIDI pedalboards currently on the market. Subjects for the study were chosen as widely used and well representative of the market segment. The main disadvantages of the mechanisms were highlighted. They were bad use of horizontal surface area, specially when taking account that the pedalboards are supposed to be compact. Secondly using cheap and simple pedal mechanism and compromising pedal feel. This fact made even clearer, that the main focus of this work has to be pedal feel and ergonomics. For better ergonomics an existing standard was chosen: the AGO standard. According to the standard the most important dimensions were chosen. The inspiration for the feel of the pedal was quality piano keyboard. To calculate the dimensions of the mechanism a mathematical model was created using MATLAB. The model was highly simplified but taking later experiments with the sample pedal into account, the calculations were a success.

Building the sample pedal allowed to test different materials for their purpose in the mechanism. The main interest for the author in this part of the work was to test birch plywood for its machinability with CNC router. The author had no previous experience with this manufacturing technique. It became clear that birch plywood is easily machinable and that the surface finish is good enough to need only a moderate amount of sanding for aesthetic purposes. Electronics gave the opportunity to try out Hall effect sensors in this application. Since the focus of this work was to create a pedal mechanism, the supposed pedalboard has only a scope of one pedal, anything more was not in the scope of this thesis.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Derringers Music kodulehekülg [WWW]
<http://www.derringers.com.au/products/Hammond-XPk%252d200-Pedal.html>
(28.03.2015)
2. Hammond XPk 200 Owners Manual. / Suzuki Musical Instrument MFG. CO., Ltd.
Jaapan: 2007. 1-12 [online] <http://www.suzuki-music.co.jp/en/> (28.03.2015)
3. Roland PK-7 spetsifikatsioon [WWW] <http://www.roland.com/products/pk-7/specifications/> (28.03.2015)
4. b3guys orelispetsialistide kodulehekülg [WWW]
http://www.b3guys.com/images/product_imgs/209.jpg (28.03.2015)
5. Organ Owners Manual. / Church Organ World. Lancashire Suurbritannia: 2014. 7
[online] <http://www.makinorgans.co.uk/files/Downloads-downloadFile-57.pdf>
(28.03.2015)
6. American Guild of Organists Standard Console Specifications. / ed. American Guild
of Organists. Highland: Wics Pipe Organ Company , 2002.
7. 162 Facts About Steinway & Sons and the Pianos They Build [WWW]
<http://www.steinwaypianos.com/159-facts-about-steinway-and-the-pianos-they-build>
10.04.2015
8. Lesjofors tõebevedrud [WWW]
http://catalog.lesjoforsab.com/catalog/pdf/en/chapters/71-78_EN.pdf (11.04.2015)
9. Davis, J R. Concise Metals Engineering Data Book. 5th ed. Materials Park OH: ASM
International, 2010
10. MIDI 1.0 Detailed Specification 4.2./ ed. The MIDI Manufacturers Association. Los
Angeles: The MIDI Manufacturers Association, 1995
11. soselectronic kodulehekülg [WWW]
<http://www.soselectronic.com/?str=1155&article=meder-wouldn-t-a-reed-switch-suit-to-youy> (12.04.2015)
12. Hall Effect sensing and Application./ Sensing and Control Honeywell Inc. Freeport:
Honeywell Inc, 2015. [online] http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=47847
(16.04.2015)
13. Uni- and Bipolar Hall IC Switches for Magnetic Field Applications [WWW]
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLE49X5L-DS-v01_05-en.pdf?fileId=db3a304316f66ee80117549ac8b206b1 (16.04.2015)

14. O009.0018 magnet [WWW]

<https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/yh240524.pdf> (17.04.2015)

15. Just E J. Puu ehitusmaterjalina. [WWW]

<http://puumarket.ee/static/files/469.Puu%20ehitusmaterjalina->

[%20koolitusmaterjal,%20Elmar-Jaan%20Just,%20vanemteadur,%20TT%C3%9C.pdf](http://puumarket.ee/static/files/469.Puu%20ehitusmaterjalina-%20koolitusmaterjal,%20Elmar-Jaan%20Just,%20vanemteadur,%20TT%C3%9C.pdf)

(18.04.2015)