



MEHHATROONIKAINSTITUUT
Mehhatroonikasüsteemide õppetool

MHK70LT

Ervin Piigli

**EMG SIGNAALITÖÖTLUSPLOKK
JUHTIMISRAKENDUSTEKS**

Autor taotleb
tehnikateaduse magistri
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 Mart Tamre juhendamisel.

“22” mai 2015 a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“.....”201.... a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”201.... a.

..... allkiri

Magistritöö ülesanne

2015. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Ervin Piigli, 132652 MAHMM (nimi, kood)

Õppekava: MAHM02/13

Eriala: mehhatroonika

Juhendaja: professor, Mart Tamre (amet, nimi)

MAGISTRITÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) EMG signaalitöötlusplokk juhtimisrakendusteks

(inglise keeles) EMG signal processing unit for control applications

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1	Patendi- ja konkurentsianalüüsi tegemine, EMG signaalitöötlusploki kontseptsiooni paikapanemine.	31.03.2015
2.	EMG signaalitöötlusploki prototüüpskeemi väljatöötamine, katsetuste läbiviimine ja dokumenteerimine.	10.04.2015
3.	Punktis 2 välja töötatud elektripõhimõtteskeemi põhjal trükkplaadi valmistamine. Töötlusplokile sobivate korpuste valik ning vajadusel ka projekteerimine. Korpuste elutsükli keskkonnahinnangu andmine.	17.04.2015
4.	EMG signaalitöötlusploki väljundsignaalide häälestamiseks sobiliku seadme väljatöötamine.	05.05.2015
5.	EMG signaalitöötlusploki testimine, sellele hinnangu andmine ja majandusliku analüüsi tegemine (pidades silmas väikeseeriatootmist).	15.05.2015

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Antud magistritöö raames töötatakse välja EMG signaalide töötlusplokk, mille väljundeid saab kasutada erinevates juhtimisrakendustes juhtkontrolleri sisenditena. Lihtsustamaks EMG signaali töötlusploki häälestamist väljaspool laboritingimusi, töötatakse välja vastav häälestusseade. Töötlusploki korpuste valikul hinnatakse nende elutsükli keskkonnamõjusid ning töö raames valminud süsteemile tehakse toote maksumuse hindamise analüüs.

Töö keel: eesti keel

Kaitsmistootlus esitada hiljemalt 12.05.2015

Töö esitamise tähtaeg: 22.05.2015

Üliõpilane: Ervin Piigli

kuupäev: 27.03.2015

Juhendaja: Mart Tamre

kuupäev: 27.03.2015

Sisukord

Autorideklaratsioon	2
Magistritöö ülesanne	3
Eessõna	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
1. SISSEJUHATUS	8
2. PATENDI- JA TURUANALÜÜS	11
3. EMG SIGNAALITÖÖTLUSPLOKI PROJEKTEERIMINE.....	14
3.1 Lähteülesande paikapanemine	14
3.2 Elektripõhimõtteskeemide koostamine ja testimine	15
3.2.1 Üldise põhimõtteskeemi koostamine	15
3.2.2 Põhiskeemi toetavate osaskeemide analüüs	16
3.2.3 Analoogsignaali töötlusplokkide analüüs.....	26
3.2.4 EMG signaalitöötlusploki voolutarbe hindamine	38
3.2.5 EMG signaalitöötlusploki võimendusteguri hindamine.....	39
3.2.6 Komponentide koondtabeli koostamine	39
3.3 Trükkplaadi projekteerimine	40
3.3.1 Trükkplaadi mõõtmete määratlemine	40
3.3.2 Komponentide paigutus.....	40
3.3.3 Üleviikude kasutamine	41
3.3.4 Projekteeritud trükkplaadi ülevaade.....	42
3.3.5 Trükkplaadi tellimine tootjalt	43
3.4 Korpuse projekteerimine	44
3.4.1 Erinevate lahenduste väljapakumine	44
3.4.2 Ekstrudeeritud alumiiniumprofiili valik	45
3.4.3 Lehtmaterjalist korpuse väljatöötamine	48
3.4.4 Korpuste majanduslik analüüs	50
3.4.5 Korpuste keskkonnaalane analüüs	51
3.4.6 Analüüside kokkuvõte ja korpuse valik	57
3.5 Signaalitöötlusploki digitaalväljundi realiseerimine	57
4. HÄÄLESTAMISE ABISEADME PROJEKTEERIMINE	59
4.1 Lähteülesande paikapanemine.....	59
4.2 Elektripõhimõtteskeemide koostamine ja testimine	60
4.2.1 Üldise põhimõtteskeemi koostamine	60
4.2.2 Osaskeemide koostamine ja analüüs	68
4.2.3 Komponentide nimekirja koostamine	80

4.3 Trükkplaadi projekteerimine	81
4.3.1 Trükkplaadi mõõtmete määratlemine	81
4.3.2 Komponentide paigutus.....	82
4.3.3 Üleviikude kasutamine	83
4.3.4 Projekteeritud trükkplaadi ülevaade.....	84
4.3.5 Trükkplaadi tellimine tootjalt	84
4.4 Navigaatornupu trükkplaadi projekteerimine	85
4.5 Häälestusseadme koostamine	86
5. VALMINUD SÜSTEEMI ÜLEVAADE	88
6. OMAHINNA ARVUTUS.....	90
7. ELEKTRISEADME TÖÖSTUSOHUTUS	91
KOKKUVÕTE.....	92
ABSTRACT.....	95
KASUTATUD KIRJANDUS	97
LISAD.....	100
Lisa 1. EMG signaalitöötusploki elektroonikakomponendid	101
Lisa 2. Signaalihäälestuse abiseadme elektroonikakomponendid.....	102
Lisa 3. EMG signaalitöötusploki elektripõhimõtteskeemid.....	103
Lisa 4. Signaalihäälestuse abiseadme elektripõhimõtteskeemid	106
Lisa 5. EMG signaalitöötusploki vasekiht ja märgistuse kiht.....	109
Lisa 6. Signaalihäälestuse abiseadme vasekiht ja märgistuse kiht	110
Lisa 7. Signaalihäälestuse abiseadme korpuse esipaneel.....	111
Lisa 8. EMG signaalitöötusploki gabariitmõõtmed	112
Lisa 9. Signaalihäälestuse abiseadme gabariitmõõtmed.....	113
Lisa 10. Korpuste keskkonnaanalüüsi indikaatorite koondtabel.....	114
Lisa 11. Aines MHK0071 koostatud EMG võimendi elektripõhimõtteskeem.....	115
Lisa 12. Signaalitöötusploki plahvatusvaade 1	116
Lisa 13. Signaalitöötusploki plahvatusvaade 2	117
Lisa 14. Signaalihäälestuse abiseadme plahvatusvaade	118

Eessõna

Lõputöö teema kasvas välja õppeainest „Tehnoloogiad erivajadusteks“. Selles õppeaines valminud EMG signaalide võimendi jäi prototüüpskeemi tasemele ning oli väliste häiringute suhtes väga tundlik, kuid saadud tulemus kinnitas, et teemaga põhjalikumalt tegeledes ning seda edasi arendades on võimalik jõuda stabiilse ning reaalselt kasutatava EMG signaali töötlusplokini.

Lühendite ja tähiste loetelu

ADC	analoog-digitaal konverter (<i>i.k. Analog-Digital Converter</i>)
CAD	raalprojekteerimistarkvara (<i>i.k. Computer Aided Design</i>)
CAM	raaltootmise tarkvara (<i>i.k. Computer Aided Manufacturing</i>)
CMOS	loogikalülituste tehnoloogia (<i>i.k. Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>)
COM	jadaliidese ühenduspesa (<i>i.k. Communication Port</i>)
EMG	elektromüograafia (<i>i.k. Electromyography</i>)
ESD	elektrostaatiline laeng (<i>i.k. Electrostatic Discharge</i>)
I2C	andmeedastusprotokoll (<i>i.k. Inter-Integrated Circuit</i>)
ICSP	trükkplaadil programmeerimise meetod (<i>i.k. In-System Serial Programming</i>)
LCD	vedelkristallekraan (<i>i.k. Liquid Crystal Display</i>)
LED	valgusdiod (<i>i.k. Light Emitting Diode</i>)
MCU	mikrokontroller (<i>i.k. Microcontroller Unit</i>)
PC	personaalarvuti (<i>i.k. Personal Computer</i>)
PWM	pulsilaiusmodulatsioon (<i>i.k. Pulse Width Modulation</i>)
SMD	pindmontaaž komponent (<i>i.k. Surface Mount Device</i>)
SP3T	pistikukonfiguratsioon ühe pooluse ja kolme kontaktiga
THT	läbivaukmontaaži tehnoloogia (<i>i.k. Through Hole Technology</i>)
TTL	transistorloogika (<i>i.k. Transistor-transistor Logic</i>)
U(S)ART	<i>i.k. Universal (Synchronous / Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
USB	Universaalne järjestiksiin (<i>i.k. Universal Serial Bus</i>)

1. SISSEJUHATUS

Selles lõputöös projekteeritakse süsteem, mis koosneb elektromüograafilise (EMG) signaali töötlusploki ning selle häälestamise abiseadmest. Projekteeritud süsteem luuakse erinevate juhtimisrakenduste tarbeks.

Nagu eessõnas mainitud, kasvas lõputöö teema valik välja õppeainest „Tehnoloogiad erivajadusteks“. Selle õppeaine praktilise töö käigus tutvuti analoogelektronika võimalustega, katsetati erinevaid operatsioonivõimendeid ning nende ühendusskeeme. Samuti tehti suurel hulgal praktilisi katsetusi EMG signaali võimendamiseks. Lõplik skeem, millega õppeaine praktiline töö lõpetati, on antud lisas 11. Sellest õppeainest saadi märkimisväärne kogemus EMG signaalitöötlusploki projekteerimiseks, kuid otseselt ühtegi lahendust praktilise töö käigus saadud tulemustest ei kasutata.

Samuti oli teema valikul oluliseks aspektiks lõputöös saadavate tulemuste ning ka tuleviku edasiarenduste rakendatavus inimeste igapäevase elu lihtsustamiseks ja elukvaliteedi parandamiseks. Igal aastal invaliidistub seljaajutrauma tõttu maailmas üle saja tuhande inimese [1], kellest enamus ei saa enam ilma ratastooli abita liikuda. Eriti keeruline on olukord tetrapleegia ehk nelja jäseme halvatusel, kes ei saa ratastooli juhtimiseks ka käsi kasutada. Kui nendele inimestele saaks välja pakkuda lahenduse, mis võimaldab ratastooli juhtimist pea liigutuste tuvastamise teel, siis kasvataks see nende iseseisvat liikumisvõimalust märkimisväärselt, sest sellise süsteemi abil saaksid nad ise ratastooli juhtida.

Sellisest süsteemist oleks abi nii noortele kui ka eakatele kasutajatele. Kõige enam invaliidistuvad 15-29 aastased noored [1], kellel on veel pikk elu ees ning kes nende vajadustele vastavate liikumisabivahendite abil saaks osaleda ühiskondlikus elus aktiivsemalt. Samuti saaks süsteemi välja pakkuda eakamatele inimestele, kellel on trauma tõttu liikumine raskendatud.

Kindlasti saab EMG signaalide mõõtmist ja interpreteerimist kasutada meelelahutuslike või muude vaba aja veetmise seadmete juures, mille tavapärased inim-masinliidese juhtimis-seadmed saaks välja vahetada EMG signaalide mõõtmisel ja interpreteerimisel töötavate juhtimisseadmete vastu. Samuti kasutatakse EMG signaalitöötlusploki erinevate meditsiiniliste ning biomehaaniliste rakenduste ning teadustööde juures. Seega on rakendusvaldkond lai ning potentsiaalselt on võimalik tõsta paljude inimeste elukvaliteeti.

Lõputööle seatud eesmärgiks ei ole ülalloetletud rakendusvaldkondades kasutatava valmis-seadme projekteerimine, sest rakendusvaldkonnad on erinevad ning seadme loomisel

tuleb teha tihedat koostööd ka lõppkliendiga, et kaardistada nende ootused ja nõuded seadme funktsionaalsusele ning disainile. Seetõttu seati eesmärgiks EMG signaalitöötlusploki projekteerimine, mis võimaldaks demonstreerida potentsiaalsele kliendile EMG signaali mõõtmise protsessi ning saadavat tulemust. Sellise seadme abil saaks koguda andmeid ja analüüsida, kuidas saavutada konkreetse kliendi või kasutusvaldkonna poolt seatud nõuetele sobivaid lahendusi.

Seega võib seadet kirjeldada kui universaalset EMG signaalitöötlusplokki, mille põhimõtteskeemi edasisel arendusel saab koostöös kliendiga välja arendada konkreetseesse rakendusse sobiliku seadme. Sellest tulenevalt on tootmismahud väikesed ning seadme projekteerimisel tuleb arvestada, et selle koostamine toimub käsitsi, mis seab kasutatavatele komponentidele piirmõõtmised, millest väiksemaid komponente ei saa töösse valida. Seetõttu kasutataksegi selles töös läbivaukmontaaži komponente, mida saab edasiste arenduste käigus välja vahetada pindmontaažikomponentide vastu ning seeläbi vähendada toote mõõtmeid.

Lisaks EMG signaalitöötlusplokile projekteeritakse ka selle häälestamise abiseade, mis on signaalitöötlusploki lahutamatu osa, sest häälestamise abiseadmega on võimalik signaalitöötlusploki väljundeid jälgida ning vastavalt mõõdetud tulemustele võimendustegurit muuta. See viib järgmise tööle seatud eesmärgini: projekteeritav EMG signaalitöötlusplokk peab olema suuteline mõõtma mistahes kasutaja mistahes skeletilihase poolt tekitatud signaale ja seetõttu on vajalik skeemi laialdase häälestamise võimalus.

Kuna seadme vajalikkusest ja seatud eesmärkidest on ülevaade antud, siis järgnevalt kirjeldatakse, millist signaali täpsemalt selle seadmega mõõdetakse.

Elektromüograafia abil saab mõõta skeletilihaste elektrilist aktiivsust, mis pärineb üsna keerukast keemiliste protsesside jadast, mis oluliselt lihtsustatult on järgnev [2]:

- Kesknärvisüsteem saadab signaali lihasele, et see aktiveeruks;
- Signaaliimpulsid liiguvad mööda närve neuromuskulaarse ühenduskohani, kus need sünapsi kaudu lihastele edastatakse;
- Pingetundlikes kaltsiumi kanalites hakkavad liikuma Ca^{2+} ioonid, mis neurotransmitterite kaasabil põhjustavad raku sisepotentsiaali muutumist. Puhkeolekus on rakumembraani sisepinge välispinge suhtes -90 mV. Kui kesknärvisüsteem saadab signaali lihase aktiveerimiseks, siis hakkab raku sisepinge muutuma välispinge suhtes positiivse pinge suunas ning lõpuks võib olla rakumembraani sisepinge välispinge suhtes $+20$ mV;

Et lihaspinget hoida, siis peavad sellised protsessid toimuma lühikese aja jooksul korduvalt. Järjestikuliselt toimuvaid lihase rakkude depolarisatsioone nimetatakse MUAPT-ks (*Motor Unit Action Potential Train*). Üksikute lihases paiknevate mootorsete üksuste signaalide kokkuliitmisel saadaksegi EMG signaal, mida nahapinnale paigutatavate elektrodidega mõõdetakse.

Kuna naha pinnale kleebitavad elektrodid ei paikne vahetult lihaskiu peal, siis on tegelikud registreeritavad potentsiaalid palju väiksemad ning jäävad suuremate lihaste puhul 3 mV juurde. [2] EMG signaale saab mõõta ka invasiivsel meetodil (nõelelektroode kasutades), mille puhul on signaal konkreetsem, kuid lõputöös esitatud rakendusse need sobilikud ei ole kuna nõelelektroode kasutades on vajalik nõela steriilsuse tagamine, mis ei ole väljapool laboritingimusi pika aja jooksul saavutatav.

Magistritöö valmimisel kasutati signaalide analüüsimiseks kahekiire ostsilloskoobi OWON SDS5032E. Seadmete elektroonika põhimõtteskeemide, trükkplaatide ja CAD mudelite projekteerimiseks kasutati mitmeid programme, nendest põhilised inseneriprogrammid on järgmised:


- Dassault Systems SolidWorks 2013 (3D projekteerimine)
- National Instruments MultiSim 12.0 (elektripõhimõtteskeemide koostamine ning erinevad elektroonikaalased simulatsioonid)
- National Instruments UltiBoard 12.0 (trükkplaatide disainimine)

Seletuskirja põhiosa jaguneb kaheks mahukaks teemaks: ühes antakse ülevaade EMG signaali häälestusploki projekteerimisest ning teises kirjeldatakse EMG signaalitöötlusploki häälestamise abiseadme projekteerimist. Neid põhiteemasid toetavad töö terviklikuks käsitlemiseks ka patendi- ja turuanalüüs, töös projekteeritud süsteemi ülevaade, omahinna arvutus ja samuti käsitletakse lühidalt põhilisi jätkusuutlikkuse teemasid. EMG signaalitöötlusploki korpuste valikul teostatakse sobiliku korpuse valimiseks ka põhjalik keskkonnamõjude analüüs.

Töö eesmärgiks on teoreetilise lahenduse valmimine, mille põhjal saab tellida sobilikud komponendid ning koostada seadmed. Töö esitamise hetkeks on juba trükkplaadid valmistamisel ning komponendid tellitud – seetõttu võib öelda, et töö kaasab endasse ka praktilise väljundi ning ei jää teoreetilisele tasemele. Häälestusseadme programmeerimine teostatakse seadme valmimisel.

2. PATENDI- JA TURUANALÜÜS

Töö käigus teostati patendianalüüs, mille otsingusõnale „EMG“ tuli 40 vastet [3]. Enamus nendest tulemustest olid antud töös projekteeritavast prototüüpseadmest oma spetsiifika poolest kaugel, kuid kindlasti tuleb töö edasiarendusel konkreetsemateks seadmeteks patendi-analüüsi tulemustega arvestada, sest patendiga on kaitstud lai vahemik erinevaid elektroodide süsteeme ning ka spetsiifilised rakendusvaldkonnad (nt. proteesi juhtimine, personaalarvuti kursori juhtimine jms.)

	<p>Europäisches Patentamt European Patent Office Office européen des brevets</p>	<p>Otsingusõna: EMG Vasteid: 40 Otsingu kuupäev: 21.05.2015</p>
---	--	---

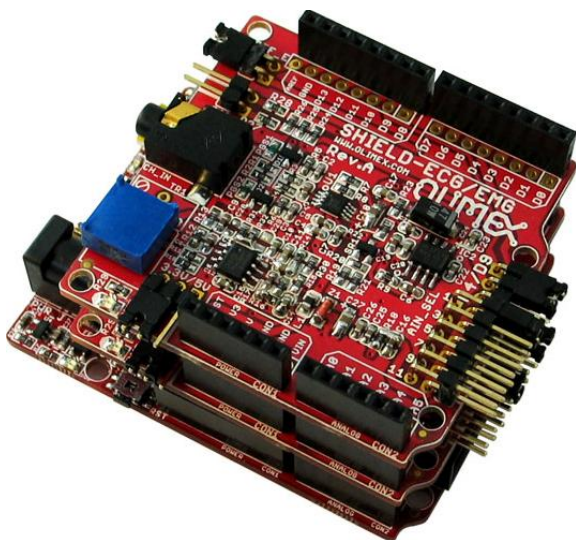
Järgnevalt antakse ülevaade turul saadaolevatest EMG signaali töötlusplokkidest.

Üldiselt saab sellised seadmed jagada hobikasutajate jaoks mõeldud arendusplaatideks ning teiselt poolt on tegu teadustöö jaoks mõeldud EMG mõõtmisüsteemidega.

Olimex EMG shield

Toode on ette nähtud töötama koos Arduino arendusplaadiga ning on mõeldud hobikasutajale bioloogiliste signaalide mõõtmisvõimaluste avastamiseks. Üksteise peale on võimalik laduda 6 kihti plaate, mis võimaldab kuue kanali mõõtmist [4]. Toode maksab 20 € ning selle eest saab osta arendusplaadi, millega katsetusi läbi viia. Antud toodet ei saa korpuse puudumise tõttu kasutada kaasaskantava EMG signaalitöötlusplokkina.

Selel 2.1 on näidatud kolmest Olimex EMG arendusplaadist koosnev virn.



Selel 2.1 Olimex EMG shield arendusplaat [4]

Muscle Spiker Box Bundle

Selle toote näol on tegemist komplektiga, mis koosneb EMG signaali mõõtmiseks kõikidest vajalikest komponentidest. Ka sellel puhul on tegemist hobikasutajale suunatud tootega, kuid Spiker Box'i puhul ei saa lõppkasutaja ise mitte midagi seadistada. Antud toodet on võimalik ühendada nii arvutiga kui ka mobiilse seadmega ning põhiliseks väljundiks arvuti või mobiilse seadme poolt tekitatav lihaspingutusele vastav helisignaal. [5] Komplekti maksumus on \$149 USD. Toote müügi pakend ja selle sisu on näha seel 2.2.



Sele 1.2 Muscle Spiker Box Bundle [5]

Thalmic Myo

Tegemist on sisseehitatud elektroodide, töötusskeemi ning andmesidega EMG käevõru, mis registreerib käe liigutusi nii EMG kui ka kiirendusanduri signaalide põhjal. Tegemist on professionaalse lahendusega, kuid seda saab kasutada vaid käeliigutuste tuvastamiseks, mis antud töö sissejuhatuses toodud rakendusvaldkondade puhul ei ole alati kasutatav lahendus. Seadme maksumus on \$199 USD. [6]



Sele 2.2 Thalmic Myo EMG käepeal [6]

DELSYS Bagnoli Handheld EMG systems

Selle EMG seadme puhul on tegemist antud töös arendatavale süsteemile kõige lähedasema tootega. Põhilise vahena saab välja tuua, et see toode kaalub ligikaudu kolm korda rohkem ning on välismõõtmete poolest samuti üle kahe korra suurem. [7] Seetõttu on tegu pigem statsionaarset kasutust leidva seadmega ja seadme kaasaskantavus on kehvem. Seel 2.4 on kujutatud antud seadet koos komplekti kuuluvate elektrodidega.



Sele 2.4 DELSYS Bagnoli Handheld EMG systems [7]

Motion Lab Systems MA300 EMG system

Selle tootekomplekti tootjafirma pakub laialdast valikut erinevaid süsteeme biomehaanika alaste uurimustööde tarbeks. Seel 2.5 väljatoodud komplekti on võimalik ühendada 16 EMG kanalit [8]. Kui uurimustöö eeldab ruumis liikumist, siis selle tarbeks on Velcro materjalist vestid, mille külge saab seadmeid ajutiselt kinnitada – kõik see on ideaalne uurimustöö tarbeks, kuid keeruline ja üleliigne igapäevaelu lihtsustava süsteemi jaoks.



Sele 2.3 Motion Systems MA300 EMG system [8]

Analüüsi kokkuvõtteks: töö raames loodav süsteem on piisavalt uuenduslik.

3. EMG SIGNAALITÖÖTLUSPLOKI PROJEKTEERIMINE

3.1 Lähteülesande paikapanemine

Enne projekteerimisega alustamist määrati signaalitöötlusploki esitatavad nõuded, millele valmisprojekteeritud seade vastama peab. Paikapandud nõuded koos lühikese kirjeldusega on antud järgnevas loetelus:

- **Minimaalsed korpuse välismõõtmed**

Signaalitöötlusplokk peab olema võimalikult väike, et seda mugavalt kaasas kanda saaks. Arvestama peab sissejuhatuses tehtud kitsendusega, mis eeldab võimaluse korral läbivaukmontaaž komponentide kasutamist.

- **Keskkonnasõbralik ja vastupidav korpus**

Signaalitöötlusploki korpus peab olema vastupidavast materjalist ja kannatama nii muljumist kui pinna kriipimist ilma kaubanduslikku välimust kaotamata. Samuti pööratakse tähelepanu korpuse keskkonnamõjude hindamisele.

- **Laialdaste reguleerimisvõimalustega elektroonikaskeem**

EMG signaalitöötlusplokk peab olema kasutatav erinevate inimeste ning erinevate lihaste peal, seetõttu peab võimendi olema reguleeritav nõnda, et analoogväljund oleks iga indiviidi ning iga lihase puhul reguleeritav vahemikku, mis võimaldaks suure resolutsiooniga analoog-digitaal konverteerimist.

- **Digitaalväljund juhtimise rakendustes kasutamiseks**

Skeemil peab olema lisaks analoogväljundile ka digitaalväljund, mis on rakendatav diskreetse lülituse teostamiseks vastavalt kasutaja poolt reguleeritavale lihaspingutuse nivoole. Samuti peab olema võimalik digitaalväljundit konfigurida PWM signaali väljastama, mille signaali täituvus sõltub lihaspingutuse nivoost.

- **Parasvõõtmesse sobilik töötemperatuuride vahemik**

EMG signaalitöötlusploki funktsioneerimine peab olema tagatud laias temperatuuride vahemikus. Eesmärgiks võeti, et signaalitöötlusplokk peab olema kasutatav vahemikus $-30^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$.

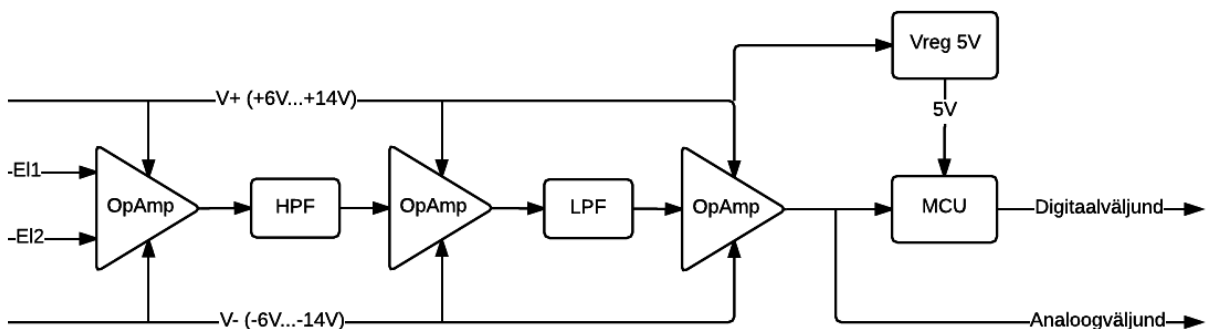
- **Minimaalne maksumus**

Kuna prototüüpseeria puhul ei ole võimalik suurte tootmiskogustega võrreldavat hinda saavutada, siis hinnalõhe vähendamiseks pöörati tähelepanu ka võimaluste piires komponentide maksumuse minimeerimisele.

3.2 Elektripõhimõtteskeemide koostamine ja testimine

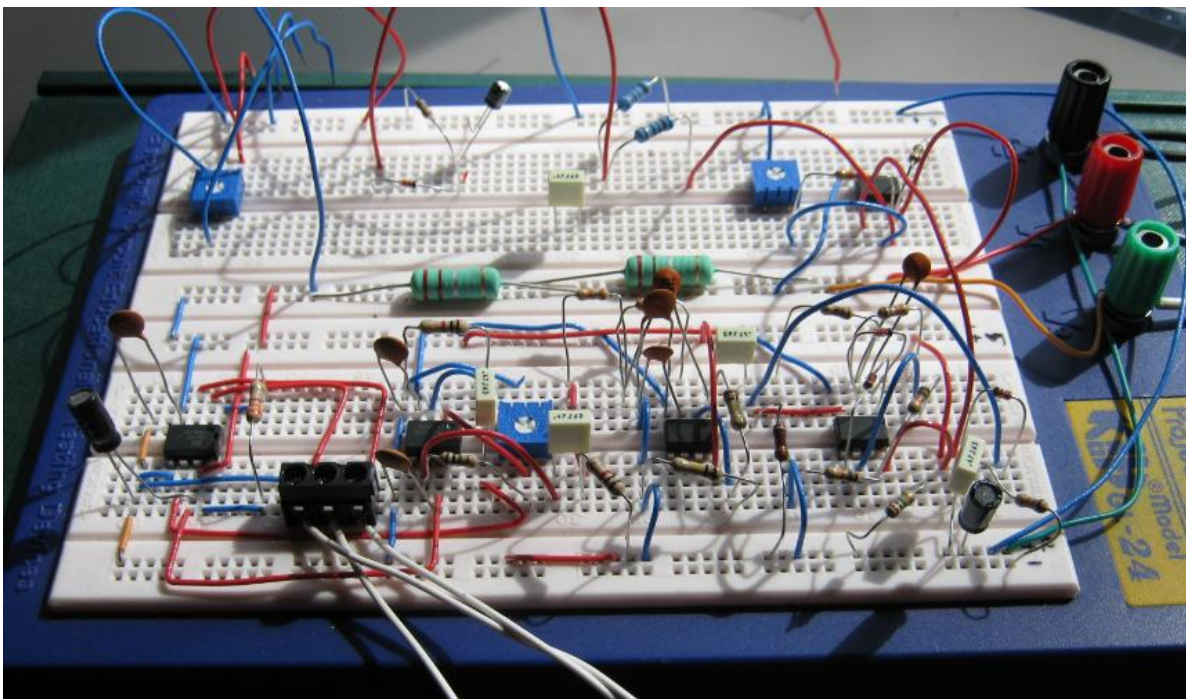
3.2.1 Üldise põhimõtteskeemi koostamine

Üldise põhimõtteskeemi koostamisel lähtuti eelnevatest elektroonikaalastest kogemustest ning lähteülesandes paikapandud nõuetest. Põhimõtteskeem on antud seel 3.1. Skeem hõlmab endas diferentsiaalvõimendit, millele järgneb kõrgpääsfilter. Sellele järgneb operatsiooni- võimendi, millele omakorda järgnevad madalpääsfilter ja lõppvõimendi. Mikrokontrolleri ADC sisend on ühendatud lõppvõimendi väljundiga. Planeeritav toitepinge on vahemikus $\pm 6V \dots \pm 14V$.



Sele 3.1 EMG signaalitöötlusploki esialgne põhimõtteskeem

Täpsema skeemi ja komponentide valiku paikapaneel toimus makettplaadi abil, mis on näidatud seel 3.2. Antud plaadil testiti etappide kaupa erinevaid lahendusi, analüüsiti ostsilloskoobi abil tulemusi ning vajadusel tehti korrekture. Lõpuks koostati samal makettplaadil ka terviklik lahendus, mida kirjeldatakse alapeatükis 3.2.2



Sele 3.2 Makettplaat põhimõtteskeemi testimiseks ja arendamiseks

3.2.2 Põhiskeemi toetavate osaskeemide analüüs

Järgnevalt analüüsitakse makettplaadil koostatud skeemi. Parema ülevaatlikkuse huvides jagatakse elektriskeem osadeks ja teostatakse komponentide valik ning skeemi analüüs iga osa kohta eraldi. *Esmalt tehakse ülevaade erinevatest põhiskeemi toetavatest elektriskeemi osadest (3.2.2) ning seejärel antakse ülevaade EMG võimendi toimimisest (3.2.3).*

Ühenduspesad ja ESD kaitse

Pesade valikul lähtuti ennekõike erinevate tootjate poolt pakutavatest ühenduskaablitest elektroodide ja töötluskeemi vahel. Kui tegemist ei ole mingi spetsiifilise seadme kaablitega, siis üldiselt on saada EMG signaalkaableid kahes erinevas pistikustandardis: kasutusel on audioseadmetest tuttavaks saanud 3,5 mm pistikud (sele 3.3) ning MedSafe 1,5 mm DIN pistikud (sele 3.4). Mõlematel juhtudel on kasutusel ühenduskaablite elektroodidega ühendamiseks spetsiaalsed pesad, mis istuvad elektroodi küljes oleva metallist juhtelektroodi külge.



Sele 3.3 EMG signaalkaabel koos 3,5 mm pistikuga [9]

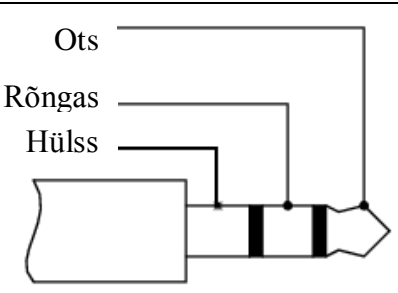


Sele 3.4 EMG signaalkaabel koos MedSafe 1,5 mm DIN pistikuga [10]

Lisaks elektroodide sisenditele (elektrood 1, elektrood 2, maandus) on skeemi vaja lisada ka pesad toite (positiivne toitepinge, maandus, negatiivne toitepinge) ning töötlusploki väljundite tarbeks (analoogväljund, digitaalväljund, maandus). Kuna loetletud sisendid-väljundid on kõik kolme kaupa grupeeritud, siis on mõistlik kasutada nende jaoks ühtset pistikustandardit. See võimaldab vähendada erinevate komponentide arvu ning jätab töötlusploki esipaneelile korrapärase välimuse.

Seetõttu valitaksegi ühtseks pistiku-pesa standardiks 3,5 mm stereo standard. Erinevate sisendite-väljundite funktsioonide omistamine pistiku-pesa standardile on näidatud tabelis 3.1. Töötlusploki trükkplaadil lähevad kasutusse pesad, kuid pesasse sobiva pistiku najal saab anda funktsioonide omistamisest parema ülevaate. 3,5 mm pesa-pistiku standardile antud nimetus TRS tuleneb kontaktide ingliskeelsetest nimetustest „*tip*“- ots, „*ring*“- rõngas ja „*sleeve*“- hülss. Seel 3.9 näidatud pesadel X1, X2 ja X3 tähistavad T,R,S just ülalnimetatud kontakte.

Tabel 3.1 Ploki sisend-väljundpesadele funktsioonide omistamine



Tähis	Elektroodide sisend	Toide	Töötlusploki väljund
Ots	Elektrood 1	V+	Digitaalsignaali
Rõngas	Elektrood 2	GND	Analoogsignaali
Hülss	GND	V-	GND

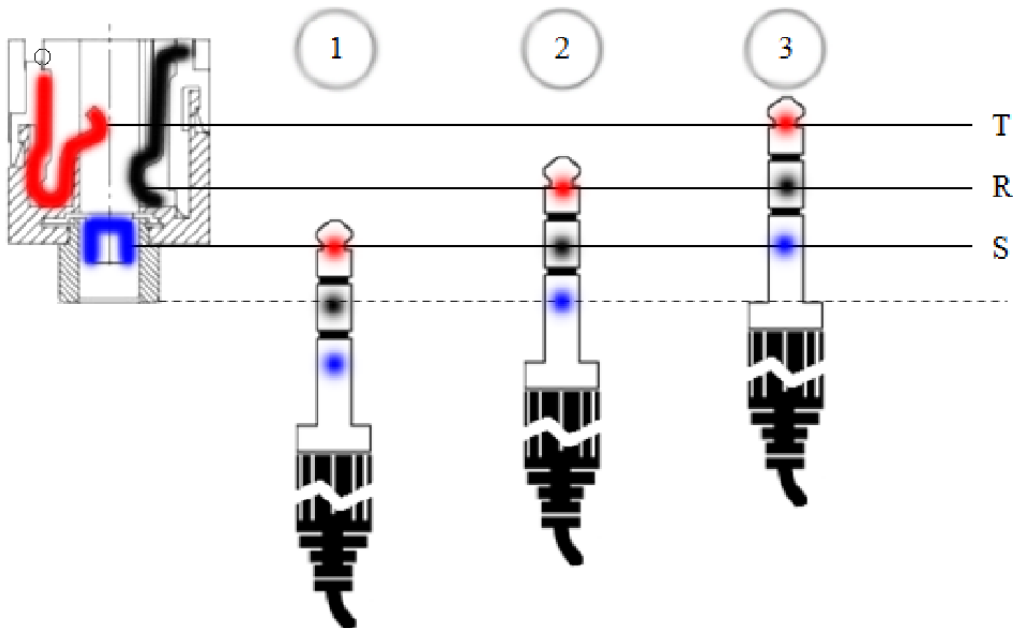
Elektroodide sisendi ja töötlusploki väljundi puhul kasutatakse standardset kontaktide konfiguratsiooni, kus hülss on maanduseks ning signaalide kandjad on ots ja rõngas.

Kuna töötlusploki toide ei ole unipolaarne, siis ei ole võimalik leida standardsete madalpinge alalisvoolu pesade hulgast sobilikku. Ühe variandina saaks kasutada kahte standardset alalisvoolu pesa, kuid see oleks tarbija jaoks ebamugav lahendus, kuna kaablite hulk kasvab. Seetõttu tuleb käsitleda alternatiivseid variante ning üheks sobilikuks variandiks on kontaktide arvu sobivuse tõttu 3,5 mm pesa, mis ühtib ka ülal põhjendatud ühenduspesade standardiseerimise põhimõttega.

Erinevalt unipolaarsetest alalisvoolupesadest tuleb TRS pistikuid-pesaid toite ülekandmiseks kasutamisel arvestada, et enne kui pistik pesasse paika istub, toimuvad ebasoovitavad ühendused kontaktide vahel, mis ei ole mõeldud omavahel kontaktis olema.

Pistiku sisestamisel pesasse puutub pistiku kontakt „ots“ enne õige kontaktini jõudmist kokku nii hülsi kui ka rõnga kontaktiga. Sama põhimõtte järgi puutub enne õige kontaktini jõudmist pistiku kontakt „rõngas“ kokku pesa kontaktiga „hülss“. Selliseid kombinatsioone kirjeldab

sele 3.5, kus on näidatud valituks osutunud kontaktide konfiguratsioon pistik-pesa süsteemis. Punane värv tähistab positiivset toitepinget, must maandust ning sinine negatiivset toitepinget.



Sele 3.5 Pistiku 3,5 mm pesasse pistmisel tekkivad valeühendused

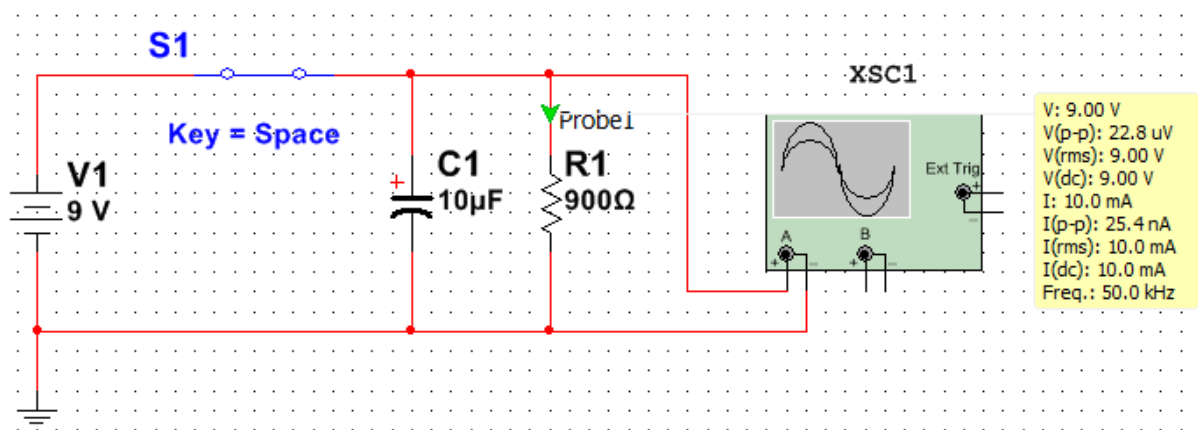
Järgnevalt analüüsitakse seel 3.5 rõnga sees olevate numbrite järgi, mis toitepinged antud hetkel skeemi toiteahelas on. Sellise analüüsi läbiviimine on vajalik, sest vastasel korral võib samaaegselt operatsioonivõimendi positiivse toite jalga olla ühendatud negatiivse pingega ning negatiivse toite jalga positiivse pingega, mis on lubamatu, sest see viib operatsioonivõimendi rikkeni.

1. Ühenduses on pistiku V+ ning pesa V-, kuna rohkem kontakte ühenduses ei ole, siis puuduva referentsi ning katkestatud vooluahela tõttu skeemil toide puudub.
2. Ühenduses on pistiku V+ ning pesa GND; pistiku GND ja pesa V-. Skeemis on positiivne toitepinge kasutusel referentsipingena (GND) ning kuna pistiku GND ühendatakse süsteemi negatiivse pingega, siis täidab tekkinud ajutine vooluring ettenähtud ülesannet ning skeemil on olemas negatiivne toitepinge. Positiivne toitepinge sellel hetkel puudub.
3. Kõik kontaktid on korrektselt ühendatud ning skeem on töövalmis.

Analüüs näitas, et valitud lahendus tagab ohutu pistiku sisestamise ning elektriskeemis olevate komponentide tootjate poolt lubatud minimaalseid ja maksimaalseid toitepingeid ei ületata. Kui kasutusele oleks võetud teiste pistikutega sarnane ühendusviis, kus GND on ühendatud hülsiga, siis oleks see tekitanud olukorra, kus toitepingete absoluutväärtused oleks summeerunud skeemi negatiivses toiteahelas, seetõttu võib analüüsi lugeda kordaläinuks.

Antud skeem on ette nähtud töötama patarei toite pealt ning patarei toide on piisavalt stabiilne ka ilma siluvate kondensaatoriteta töötamiseks, siiski otsustati lisada toitepinge silumiseks elektrolüüt-kondensaatorid. Nende ülesandeks on ennekõike pistiku liikumisel pesas tekkivate pingekõikumiste silumine.

Kondensaatoritele C6 ja C7 (sele 3.9) sobiliku mahtuvuse valimiseks teostati MultiSim keskkonnas simulatsioon, mille skeem on näidatud seel 3.7. C1 tähistab toidet siluvat kondensaatorit ning takisti R1 on skeemi pandud koormuse simuleerimiseks, mille väärtus arvestati nõnda, et see tekitaks skeemis voolutugevuse 10 mA, mis on hinnanguline EMG töötlusploki voolutarve.



Sele 3.4 Toitepinge silumiskondensaatori simulatsiooni ülesehitus

Simulatsiooni tulemused on koondatud tabelisse 3.2. Valituks osutus 47 µF kondensaator, mis annab optimaalse tulemuse nii tagatud skeemi tööaja (toitepinge ei lange alla 6V) kui ka järgnevate astmete kondensaatorite mahutavuste suhtes. Selle all mõeldakse kondensaatorite mahutavuse järk-järgulist kahanemist skeemi toitepinge sisendist üksikkomponendini.

Tabel 3.2. Tagatud skeemi tööaja sõltuvus kondensaatori mahtuvusest

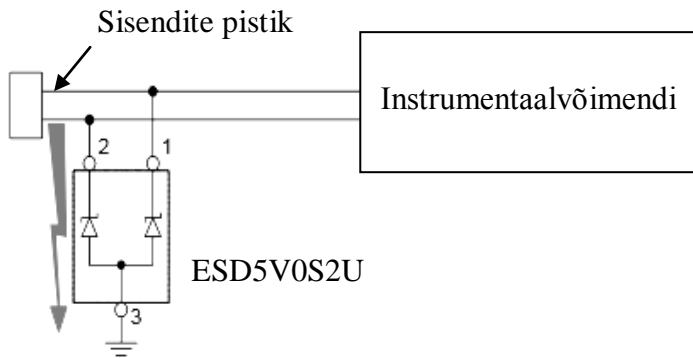
Kondensaatori mahtuvus (µF)	Tagatud skeemi töö aeg (ms)
10	3 ms
47	13 ms

Kuna EMG signaali töötlusploki peab olema võimalik kasutada igapäevaselt kõikide riistega ning ka väga väikese õhuniiskuse puhul, siis on elektroodide sisendite kaitsemine elektristaatilise laengu eest põhjendatud. Selleks kasutatakse INFINEON ESD5V0S2U-06 E6327 kahe kanaliga kaitsedioidi. See elektroonikakomponent on mõeldud kasutamiseks 3,3 V rakendustes ning on seetõttu madala läbilöögipingega (7 V), mis antud rakendusse sobib ideaalselt kuna elektroodide sisendis on pinged alati alla 100 mV.

Valitud ESD kaitsedioid vastab järgnevatele standarditele:

- IEC61000-4-2 (ESD): ± 30 kV (kontaktpinge)
- IEC61000-4-4 (EFT): 80 A (5/50 ns) ()
- IEC61000-4-5 (surge): 40 A/600 W (8/20 μ s)

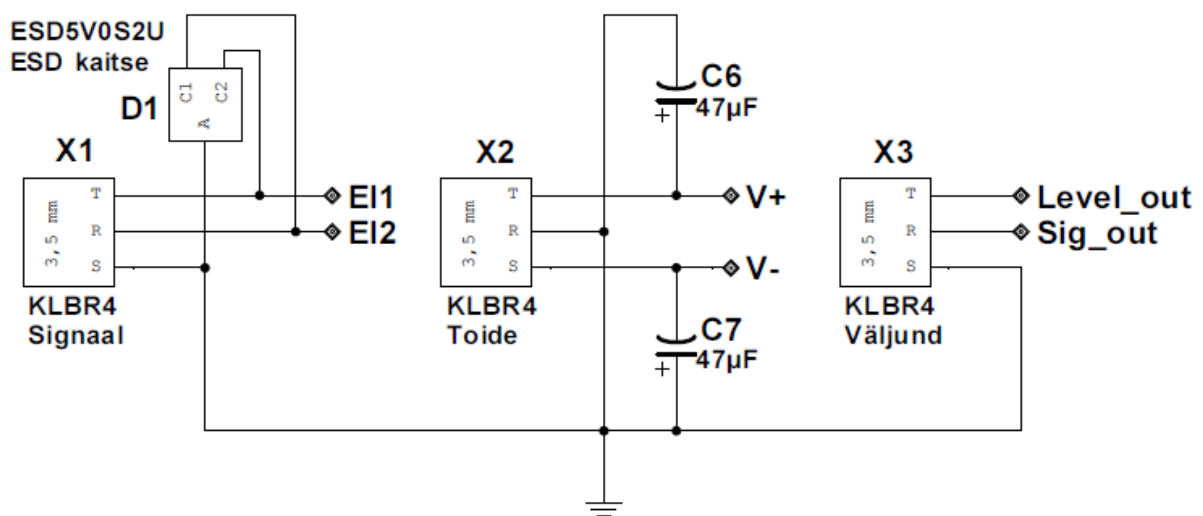
ESD kaitsedioidi skeemi ühendamise konfiguratsioon on näidatud seel 3.8.



Sele 3.5 ESD kaitsedioidi skeemi ühendamise konfiguratsioon

Valitud ESD kaitsedioidi puhul tuli teha erand ning kasutusele võtta pindmontaaž elektroonikakomponent, sest neid läbivaukmontaaži trükkplaadi jaoks ei valmistata. Kuna tegemist on SMD komponendiga ja trükkplaat on planeeritud ühepoolne, siis võimaldab see põhimõtteliselt piiranguteta paigutada ESD kaitsedioidi vahetult elektroodide sisendiks oleva pesa juurde. Selline paigutus on komponendi tootja poolt rangelt soovitatud.

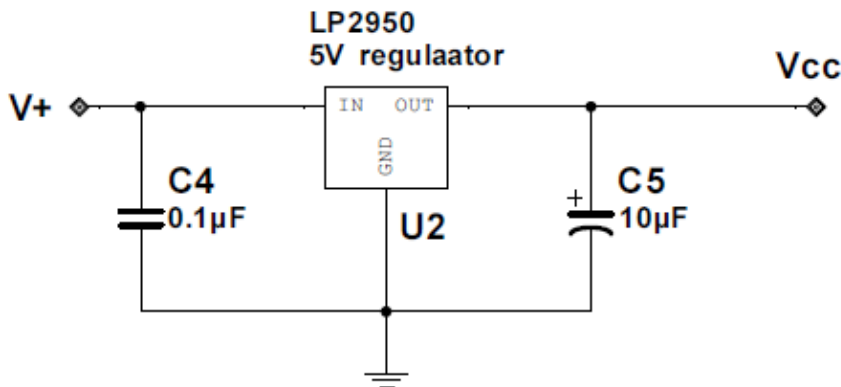
Antud alapeatükis kirjeldatud komponentide valikut kokkuvõttev elektripõhimõtteskeem on antud seel 3.9.



Sele 3.6 Pistikupesade osaskeemi elektripõhimõtteskeem

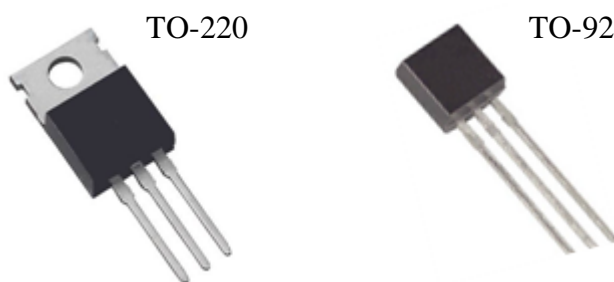
Pingeregulaator

Bipolaarne toitepinge on mõeldud skeemil olevate operatsioonivõimendite toiteks. Kuna EMG signaalitöötlusplokk sisaldab ka mikrokontrollerit, siis on vaja toitepinge regulaatorit, mis tagaks MCU-le sobiliku 5 V toitepinge. Pingeregulaatori ühendamine elektriskeemi on näidatud seel 3.10. Regulaatori sisend on ühendatud toitepesas oleva positiivse toitepinge kontaktiga.



Sele 3.7 Pingeregulaatori osaskeemi elektripõhimõtteskeem

Regulaatori valikul lähtuti ennekõike nõutavast väljundpingest ning arvestati hinnanguliselt, et väljundvool peaks jääma 100 mA juurde, mis tagab üheltpoolt varuteguri ning teiselt poolt mõistliku regulaatori suuruse. Võimsamad regulaatorid on TO-220 korpuses (sele 3.11, vasakpoolne pilt) ja need oleks antud rakendusse esiteks põhjendamatult võimsad ning teiseks ei mahuks need eesmärgiks seatud korpuse mõõtmetele vastavasse korpusesse ära. Seetõttu osutus valituks TO-92 korpuses pingeregulaator, mis on näidatud sele parempoolsel pildil.



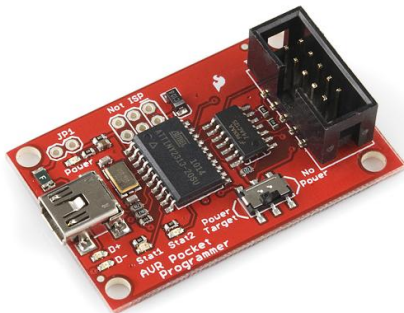
Sele 3.8 Pingeregulaatori korpuste võrdlus

Skeemis olevate kondensaatore C4 ja C5 valik on tehtud pingeregulaatori andmelehel olevate soovitude järgi. Valitud pingeregulaatori puhul saab kasuliku omadusena välja tuua, et reguleeritud 5 V väljundpinge on tagatud kui sisendpinge $V_{in} \geq 5,4$ V, mis on väga mõistlik optimeeritud patareikasutuse huvides. Enamasti ei suuda 5 V regulaator stabiilset väljundpinget tagada kui sisendpinge langeb alla 7 V.

Mikrokontroller

EMG signaali töötuslokkis on mikrokontrolleri ülesanne mõõta töödeldud analoogsignaali pingeniivod ning vastavalt kasutaja poolt potentsiomeetrist reguleeritud lävipingele teostada diskreetsignaali lülitus. Sellise ülesande jaoks ei ole vaja keerukat kontrolleri ning ennekõike on olulised kontrolleri väikesed mõõtmed ning odav hind. Kontrollerile esitatavad nõuded ning nende nõuete selgitused on järgmised:

- **Mikrokontroller peab olema sobilik läbivaukmontaažiks**
Eelistatud korpuse tüüp on DIP (*DualInlinePackage*), mis võimaldab kontrolleri lihtsat skeemile montaaži.
- **Mikrokontrolleri toitepinge peab olema 5 V**
See nõue on eelkõige seotud programmeerimisliidese tööpingega, mida on kirjeldatud järgmises punktis.
- **Mikrokontroller peab olema programmeeritav „AVR Pocket programmer“-iga**
Antud programmaator on odav ja töökindel lahendus lihtsamate Atmeli AVR seeria mikrokontrollerite programmeerimiseks. Programmaator on näidatud seel 3.12.



Sele 3.9 Programmaatori „AVR Pocket Programmer“ ülevaade [11]

- **Mikrokontrolleril peab olema vähemalt 2 kanali ADC**
Analoog-digitaal konverteid kasutatakse kaheks ülesandeks: EMG signaali mõõtmiseks ning kasutajaliidese potentsiomeetri lugemiseks.
- **Mikrokontrolleril peab olema vähemalt 1 digitaalsignaali väljaviik**
Antud rakenduses kasutatakse seda digitaalväljundi tarbeks, mis peab seejuures olema riistvaralise PWM võimekusega.
- **Mikrokontroller peab olema varustatud sisemise ostsillaatoriga**
Sisemise ostsillaatori kasutamine hoiab kokku trükkplaadil olevat ruumi ning kuna antud rakenduses ei ole vajadust mingisugust konkreetset taktsagedust kasutada, siis sobib sisemine ostsillaator sellesse rakendusse hästi.

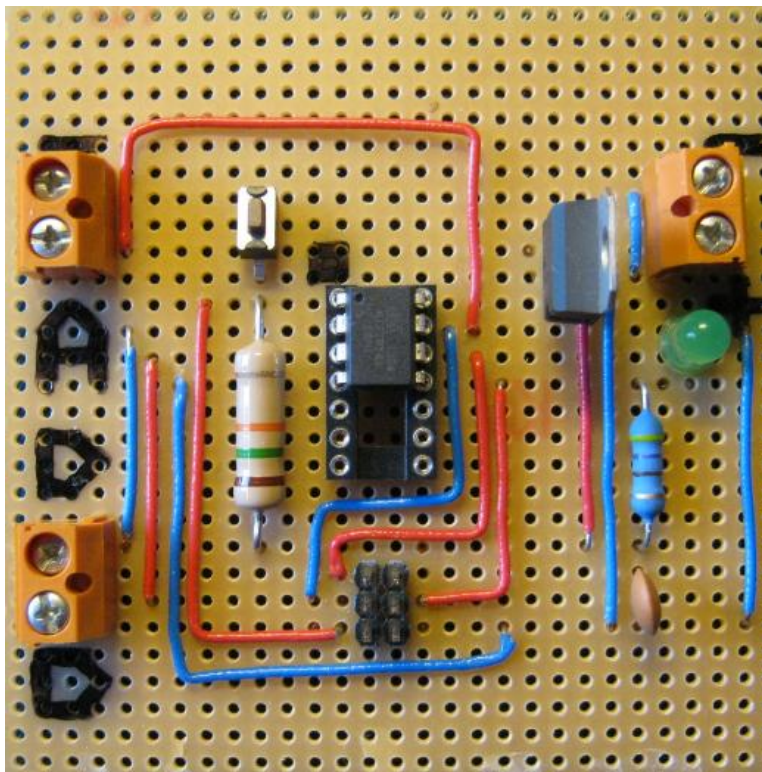
Etteantud kriteeriumitele vastas mikrokontroller Atmel ATtiny 45. Selle MCU peamised parameetrid on toodud välja tabelis 3.3.

Tabel 3.3 Atmel ATtiny45 peamised parameetrid

MCU	Mikrokontrolleri parameetrid					MCU hind
	Andmeside liidesed	Sisendeid-väljundeid	Väljaviike kokku	Programmi-mälu maht	Toitepinge (min-max)	
ATtiny 45 [12]	SPI, I2C	6	8	4 kB	2,7V 5,5 V	1,23 €

Peale mikrokontrolleri valikut katsetati selle EMG signaali töötlusploki skeemi sobivust katseplaadi abil, mis on näidatud seel 3.13. Katsetuste käigus tehti selgeks, et mikrokontroller on antud ülesande jaoks sobiv ning lisavõimalusena saab seda lisaks arvutiprogrammile AVR Studio programmeerida ka tänaseks päevaks laialt levinud Arduino programmeerimiskeskkonnas, mis lihtsustab esmaste katsetuste tegemist.

Seel 3.13 näidatud prototüüplaadil olevad komponendid on valitud sinna katsetamise eesmärgil ning osad nendest on suure võimsuse varuteguriga kuna plaadi koostamise hetkel olid just need komponendid kättesaadavad. Antud töös esitatud valmislahenduse puhul kasutatakse väiksemaid ning skeemi sobivamaid komponente.



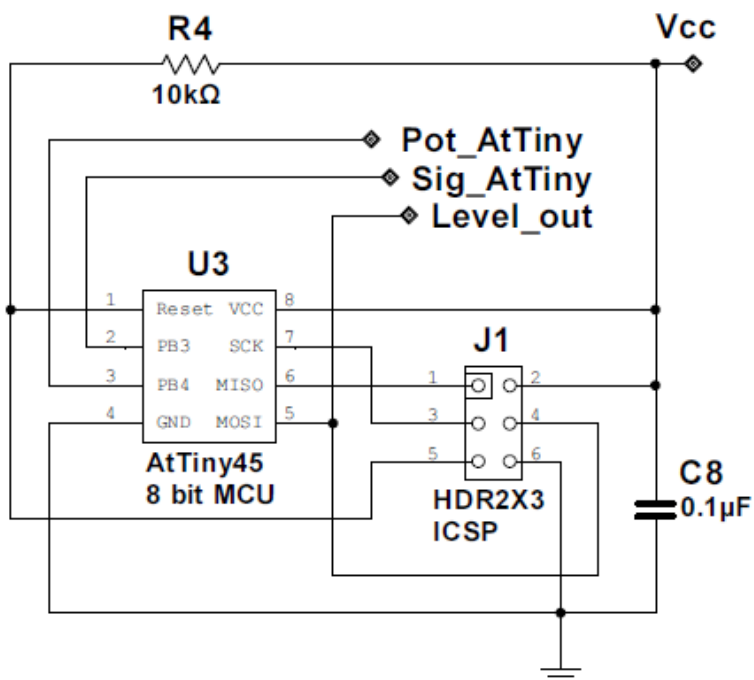
Sele 3.10 Atmel ATtiny45 testimise katseplaat

Tabelis 3.4 selgitatakse mikrokontrolleri väljaviikudele omistatud ülesandeid ning seotakse iga väljaviik konkreetse ülesandega.

Tabel 3.4. Atmel ATtiny45 väljaviikudele omistatud funktsioonid

Pin-i nr.	Pin-i funktsioon	Pin-i kasutus skeemis	Pin-i kasutuse selgitus
1	Reset	Reset	Mikrokontrolleri programmeerimisrežiimi viimine
2	PB3 (ADC3)	Sig_AtTiny	EMG analoogsignaali sisend MCU-sse
3	PB4 (ADC2)	Pot_AtTiny	Kasutajaliidese potentsiomeetri sisend MCU-sse
4	GND	GND	Mikrokontroller maandus
5	PB0 (MOSI)	MOSI / Level_out	Digitaalväljund (diskreetne lülitus või PWM); MCU programmeerimisel kasutatav andmeliin (<i>MasterOutSlaveIn</i>)
6	PB1 (MISO)	MISO	MCU programmeerimisel kasutatav andmeliin (<i>MasterInSlaveOut</i>)
7	PB2 (SCK)	SCK	MCU programmeerimisel kasutatav andmeliin (<i>SerialClock</i>)
8	VCC	VCC	Mikrokontroller toitepinge

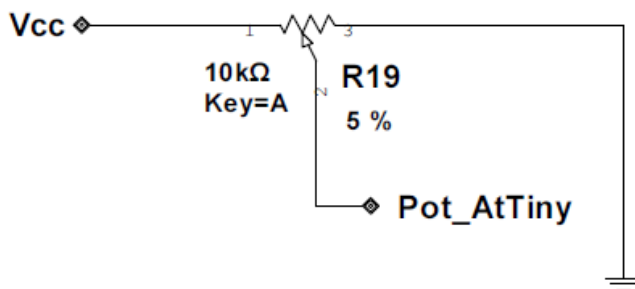
Selles alapunktis tehtud valikud võtab kokku elektripõhimõtteskeem, mis on antud seel 3.14. Skeemi keskne komponent on mikrokontroller (U3). Selle programmeerimiseks on ICSP pistik J1, mis on realiseeritud 2,54 mm jalavahega piikribasid kasutades. MCU „reset“ väljaviigu kõrgel nivool hoidmiseks on skeemi lisatud *pull-up* takisti R4, mida saab madalale nivoolle viia ainult programmeatori abil läbi pistiku J1. Kondensaatore C8 paigaldatakse mikrokontrolleri lähedale toitepinge silumiseks.



Sele 3.11 Mikrokontrolleri osaskeemi põhimõtteskeem

MCU väljundi seadepotentsiomeeter

Mikrokontrolleri digitaalväljundi lävipinge seadmiseks kasutatava potentsiomeetri ühenduskeem on antud seel 3.15. Potentsiomeetri kruvi keerates tüüritakse potentsiomeetri väljaviiku 2 lähemale kas GND või Vcc pingele. Põhimõtteliselt on tegu seadistatava takistusjaguriga.



Sele 3.12 MCU väljundi seadepotentsiomeetri põhimõtteskeem

Toitepinge indikaator

Toitepinge indikaatoriks valiti väikese energiatarbe tõttu valgusdiod. LEDi valikukriteeriumid olid paigaldusviis (läbivaukmontaaž), värvus (roheline) ja võimalikult madal voolutarve. Järgnevalt on näidatud valikust parimate näitajatega valgusdiodile sobiliku takisti arvutamine.

Ballasttakisti arvutamise valem:

$$R = \frac{U_R}{I_f} = \frac{U_{in} - U_f}{I_f}$$

kus

- R – takistus
- U_R – pingelang takistil
- I_f – LEDi päri voolutugevus
- U_{in} – toitepinge
- U_f – LEDi päri pinge

Ballasttakisti arvutus:

$$R = \frac{U_R}{I_f} = \frac{U_{in} - U_f}{I_f} = \frac{5 - 2,4}{0,002} = 1300\Omega$$

Arvutatud väärtus ühtib E24 takistite (5% tolerantsiga) standardrea valikuga.

Lisaks sobilikule takistusele tuleb arvutada ka takistil esinev kaovõimsus.

Takisti kaovõimsuse arvutus:

$$P = U_R \cdot I_f = 2,6 \cdot 0,002 = 0,0052 \text{ W},$$

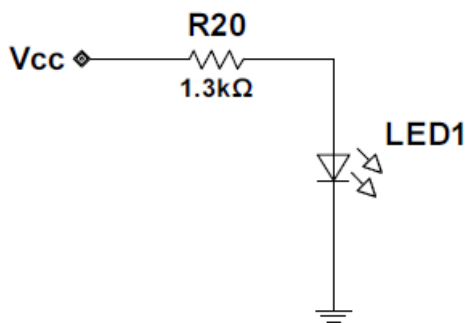
kus

- P – kaovõimsus

Standardsetest takistitest on seega sobilik valik järgmine: 1,3 k Ω ; 0,125 W.

LEDi voolutarvet on veel võimalik vähendada valides suurema väärtusega takisti, kuid seda tuleb teha LEDi valgusintensiivsuse visuaalse vaatluse alusel. Seetõttu piirdub siin töös valitud LEDi takisti valik teoreetilise arvutusega.

LEDi ühendusskeem koos arvutatud ballasttakistiga on näidatud seel 3.16.



Sele 3.13 EMG signaalitöötlusploki toiteindikaatori põhimõtteskeem

3.2.3 Analoogsignaali töötlusplokkide analüüs

Selles alapeatükis antakse ülevaade EMG analoogsignaali töötlusplokkides kasutatavatest elektroonikakomponentidest ning nendest koostatud signaalitötluse skeemidest. Analüüs teostatakse vastavalt eelnevalt makettplaadil koostatud skeemile.

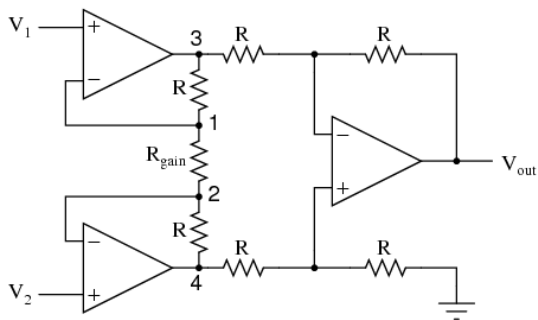
Instrumentaalvõimendi

EMG signaalitötluse esimeses etapis kasutatavate põhimõtete ja komponentide valik määrab suuresti väljundi kvaliteedi, sest selles astmes on signaalide pingeniivod madalad ning sellest tulenevalt on signaalid häiringute suhtes väga tundlikud.

Kõige sobilikum viis elektroodidelt signaalide vastuvõtmiseks on instrumentaalvõimendi kasutamine, mis sisaldab mõlema sisendi jaoks puhvreid ning diferentsiaalvõimendit, mis puhvrite väljunditega ühendatud on. Instrumentaalvõimendit saab koostada eraldiseisvatest operatsioonivõimenditest koos neid toetavate integraalskeemiväliste takistitega kui ka

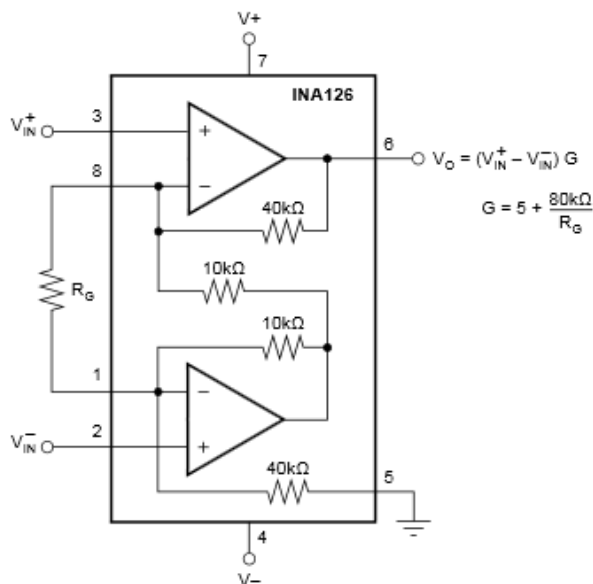
kasutada instrumentaalvõimendit, mis on ühte integraalskeemi koondatud ning nõuab vaid üksikuid väliseid komponente.

Nendest valikutest esimest kirjeldab sele 3.17. Kasutusel on kolm operatsioonivõimendit ning seitse takistit, kusjuures takistiga R_{gain} saab skeemi võimendust reguleerida. Antud skeemi kasutamine eessõnas mainitud projekti raames näitas, et sellise skeemiga saab küll signaali töödeldud, kuid tulemus ei ole stabiilne.



Sele 3.14 Eraldiseisvatest operatsioonivõimenditest koostatud instrumentaalvõimendi [13]

Seetõttu valiti instrumentaalvõimendiks integraalskeem, mis on spetsiaalselt mõeldud kasutamiseks patareitoitel olevate skeemide jaoks nii erinevate andurisignaali kui ka füsioloogiliste signaalide võimendina, mille hulka kuulub ka EMG signaal. Valitud instrumentaalvõimendi INA126PA põhimõtteskeem on antud seel 3.18.



Sele 3.15 INA126 integraalskeemisene põhimõtteskeem [14]

Tegemist on kahe sisendiga instrumentaalvõimendiga, mille signaalivõimendust saab reguleerida üksiku välise takistiga R_g . Välise komponentide minimaalne arv koos kompaktses DIP8 korpusega võimaldab antud skeemi puhul ka optimaalset trükkplaadi kasutust. Ainukese olulise miinusena saab välja tuua selle komponendi kõrge maksumuse (vt. lisa 1).

INA126PA valiku olulisemad põhjused on järgnevad:

- **Lai toitepingevahemik**

Antud instrumentaalvõimendile lubatud toitepingevahemik on $\pm 1,35 \text{ V} \dots \pm 18 \text{ V}$, mis võimaldab kasutada paljusid erinevaid toiteallikaid.

- **Signaalivõimenduse laialdane reguleerimisvõimalus**

Instrumentaalvõimendi signaalivõimendust saab reguleerida ühe välise komponendi abil vahemikus $5 \dots 10000$.

- **Töötamine diferentsiaalvõimendi konfiguratsioonis**

Töötlusploki sisenditesse rakendatud pingeniivoode lahutamise teel saadud tulemit võimendades on võimaik vabaneda efektiivselt välistest häiringutest.

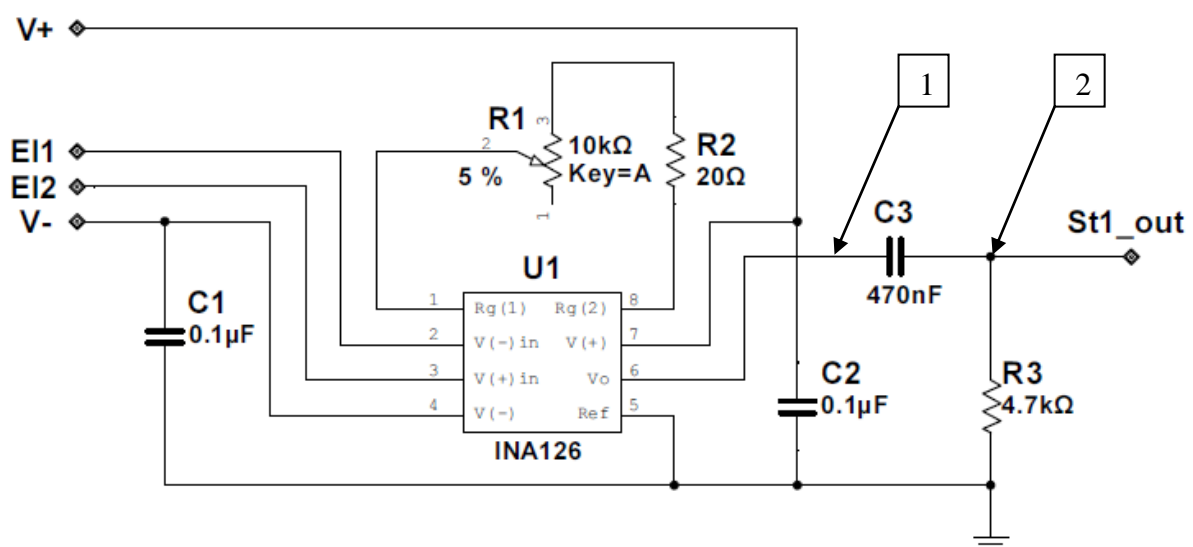
- **Väikese väärtusega pingenihtus (*offset voltage*)**

Kui sisendid on testi eesmärgil kokku ühendatud ning pingeerinevus nende vahel puudub, siis peaks ka väljundis olema pinge 0 V. Paljude odavamate lahenduste puhul erineb aga väljundpinge sellisel katsel 0 V-st märkimisväärselt. Selline nihutus tuleneb eelkõige takistite väärtuste erinevusest, mis on antud integraalskeemi puhul viidud sisemiste takistite laseriga töötlemise teel miinimumini ($250 \mu\text{V}$).

- **Stabiilsus temperatuurimuutuste suhtes**

Kuna EMG töötlusploki kasutatakse igapäevases kasutuses väljapool laboritingimusi, siis on oluline tagada, et instrumentaalvõimendi väljund ei ole temperatuuri suhtes ülemäära tundlik. Antud integraalskeemil on temperatuuri muutusest põhjustatud väljundpinge triivimine $3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Valitud instrumentaalvõimendi osaskeem on antud seel 3.19.



Sele 3.16 Instrumentaalvõimendi osaskeemi põhimõtteskeem

Kondensaatorid C1 ja C2 on vastavalt negatiivse ja positiivse toitepinge silumiseks, sealjuures kondensaatorite mahtuvused on valitud integraalskeemi tootja soovitude kohaselt.

Jadamisi ühendatud takisti R2 ja potentsiomeeter R1 moodustavad tagasiside signaali-võimenduse määramiseks. Takisti R2 lisati skeemi kuna katsetuste tulemusena selgus, et INA126 väljund läheb ebastabiilseks ning viimaks küllastub toitepinge lähedase pingeni kui takistus integraalskeemi väljaviikude 1 ja 2 vahel on väiksem kui 15 Ω. Takisti R2 garanteerib takistite jadaühenduse printsiipi kasutades vähemalt 20 Ω takistuse eelpool nimetatud INA126 väljaviikude vahel.

Järgnevalt on näidatud instrumentaalvõimendi minimaalse ning maksimaalse signaali-võimenduse teguri arvutused, mille arvutusvalem on järgmine:

$$G = 5 + \frac{80k\Omega}{R_g}$$

Kus

- G – signaalivõimenduse tegur
- R_g – signaalivõimenduse reguleerimise takisti takistuse väärtus

INA126 maksimaalse signaalivõimenduse teguri arvutamine

$$G_{max} = 5 + \frac{80k\Omega}{R_g} = 5 + \frac{80k\Omega}{R1_{min} + R2} = 5 + \frac{80k\Omega}{0\Omega + 20\Omega} = 4005$$

INA126 minimaalse signaalivõimenduse teguri arvutamine

$$G_{min} = 5 + \frac{80k\Omega}{R_g} = 5 + \frac{80k\Omega}{R1_{max} + R2} = 5 + \frac{80k\Omega}{10k\Omega + 20\Omega} = 13$$

Võimendustegur on potentsiomeetrist reguleeritav vahemikus 13...4005, mis on piisav, et tagada EMG signaalitöötlusloki sobivus kõikide skeletilihastega.

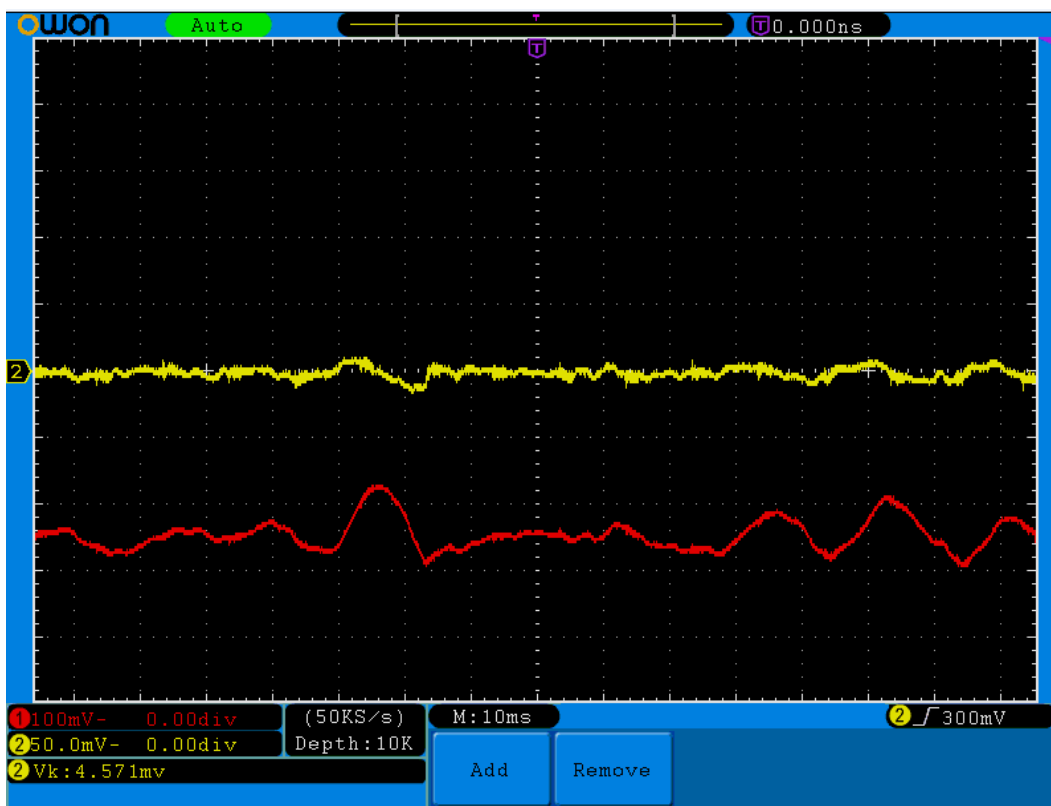
Järgnevalt teostatakse kondensaatoriga C3 vahelduvvoolusidestus. See eemaldab signaalist alalisvoolu komponendi, mis läbi järgmine võimendusaste saab võimendada reaalselt muutuvat signaali ning pidevalt esinevat alalisvoolukomponenti ei võimendata.

Kondensaator C3 moodustab koos takistiga R3 kõrgpääsfiltri, kus filtris neelduv signaal muundub takistil R3 soojusenergiaks. Antud juhul otsustati filtri äralõikesagedus valida katsetulemuste põhjal ning seetõttu filtri äralõikesageduse arvutust ei teostata. Selle asemel hinnatakse visuaalselt erinevate kombinatsioonidega saavutatavaid tulemusi ostilloskoobi ekraanilt.

Ostsilloskoobiga mõõdetavad katsepunktid on antud seel 3.19, kus 1 tähistab ostsilloskoobi esimest kanalit (punane) ja 2 tähistab ostsilloskoobi teist kanalit (kollane).

Esmalt tehti katse, kus kondensaatori C3 väärtus oli 470 nF ning takisti R3 väärtus 1 k Ω . Kui lihas oli lõdvas olekus, siis oli katsepunktis 2 mõõdetud signaali RMS väärtus 2,1 mV. Kui lihast pingutati maksimaalselt, siis oli signaali RMS väärtus 4,6 mV.

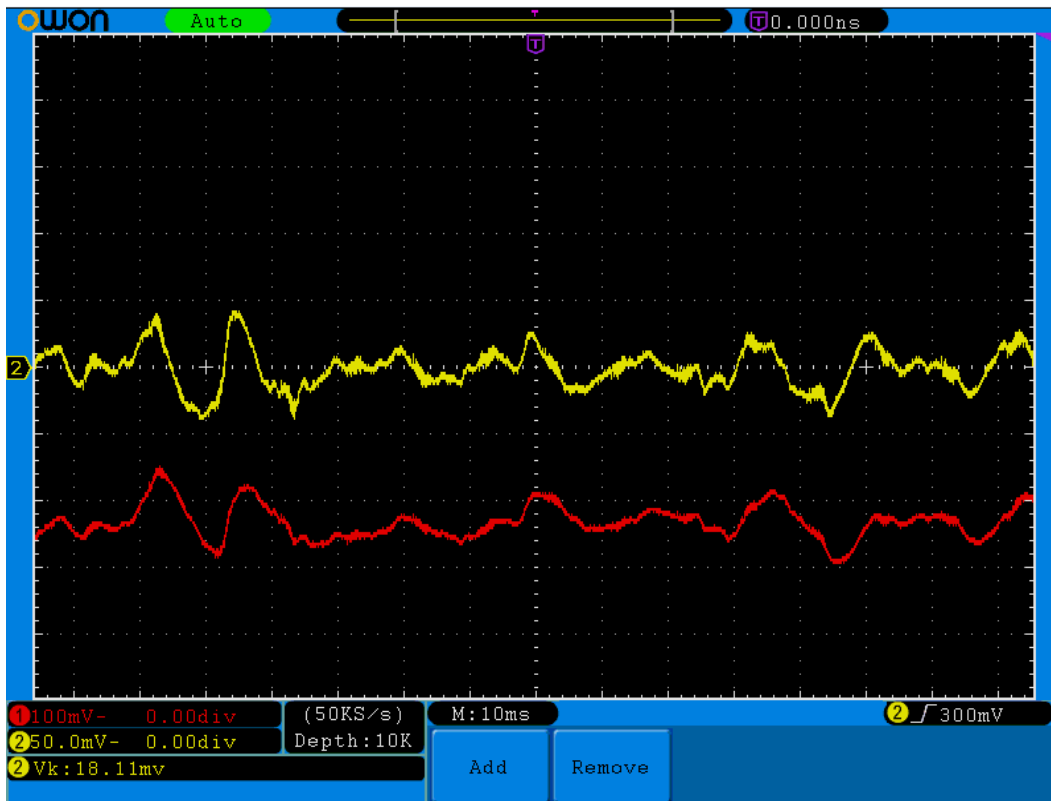
Seelt 3.20 on näha lihase maksimaalsele pingutusele vastav signaal enne (ostsilloskoobi kanal 1) ja pärast (ostsilloskoobi kanal 2) kõrgpääsfiltrit. Teostatav vahelduvvoolusidustus on ära kaotanud alalisvoolukomponendi ning seeläbi on näha signaali informatsiooni kandev osa – vahelduvvoolukomponent.



Sele 3.17 Kõrgpääsfiltri testimine, R = 1 k Ω

Kuna seelt 3.20 selgub samuti, et signaali amplituud on töötuse käigus vähenenud, siis teostati katsetusi erinevate takistitega kuni leiti sobilik kompromiss mürataseme ning signaali amplituudi vahel. Takisti R3 väärtust tõsteti 4,7 k Ω -ni, mislääbi koormatakse signaali vähem. Sellise katsekonfiguratsiooni korral kasvas lihase lõdvas olekus signaali RMS väärtus teises katsepunktis 2,1 mV pealt 2,7 mV peale. Analoogselt kasvas signaali RMS väärtus lihasingutuse korral 4,6 mV pealt 18,1 mV peale.

Sele 3.21 kujutab väljundsignaali maksimaalse lihasingutuse ajal ning võrreldes esimese katsega võib täheldada märkimisväärtset signaali infohulga kasvu.



Sele 3.18 Kõrgpääsfiltri testimine, $R = 4,7 \text{ k}\Omega$

Seetõttu valitakse edasiseks tööks iga võimendusastme järele kõrgpääsfilter, mis koosneb kondensaatorist väärtusega 470 nF ning takistist väärtusega 4,7 k Ω .

Täppisvõimendi

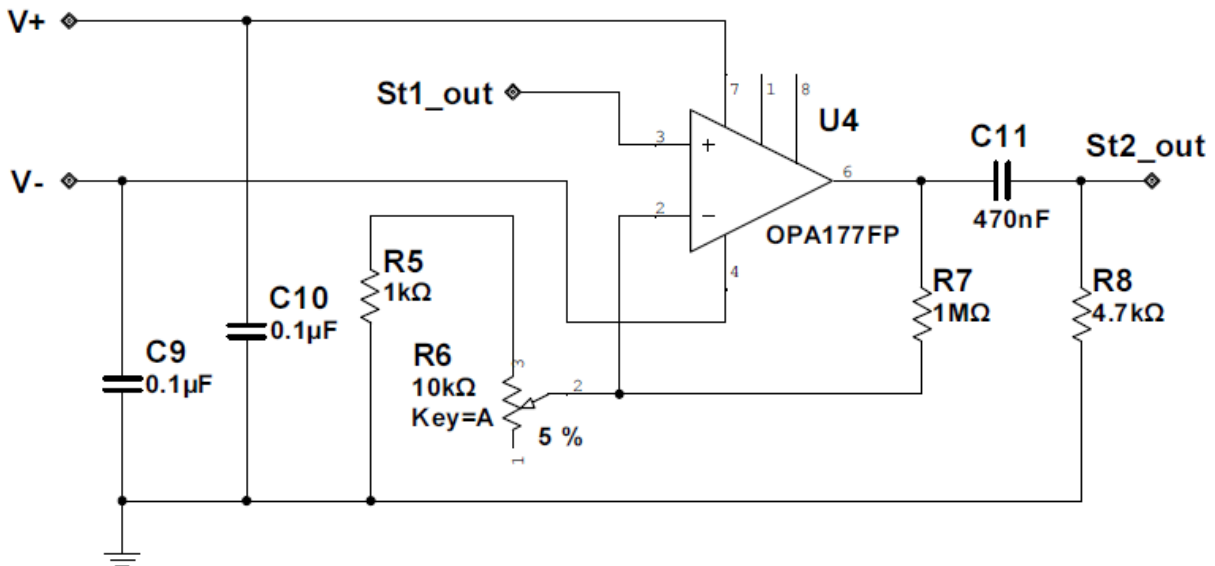
Instrumentaalvõimendile järgneva operatsioonivõimendi põhiülesandeks on ilma täiendavaid häiringuid lisamata signaali võimendamine. Kuna selles etapis on signaal veel suhteliselt nõrk ning signaali amplituud jääb 100 mV juurde, siis on ka selle võimendi valiku puhul tähtsad need samad kriteeriumid, mis instrumentaalvõimendi puhul välja toodi.

Seetõttu tehti valik täppisvõimendite hulgast ning valituks osutus *Texas Instruments*'i poolt toodetav OPA177FP. Ka selle operatsioonivõimendi puhul on sisemised täppistakistid töödeldud laseriga ning seetõttu on pingenihtus ja temperatuuri mõju integraalskeemile minimaalsed. Vastavad näitajad on 25 μV ja 0,3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

OPA177FP-le on lisatud ka välise potentsiomeetriga pingenihtuse elimineerimise võimalus, kuid katsete tulemustel leiti, et selleks ei ole vajadust. Lisandunud signaali korrigeerimise võimalusest tulenev kasu oli marginaalne.

Lubatud toitepingete vahemik on $\pm 22 \text{ V}$, mis on kooskõlas antud rakenduse poolt operatsioonivõimendile esitatavate nõuetega.

Ülevaate täppisvõimendi kasutusest antud rakenduses on antud seel 3.22. Kondensaatorid C9 ja C10 on kasutusel toitepingetest pingepiikide silumiseks. Kondensaatoriteks on valitud keraamilised kondensaatorid. Operatsioonivõimendi väljundis olevate kondensaatorite C11 ja takisti R8 valik on põhjendatud instrumentaalvõimendi skeemi kirjeldavas alapeatükis.



Sele 3.19 Täppisvõimendi põhimõtteskeem

Skeemi võimendusteguri reguleerimiseks on kasutusel potentsiomeeter R6, mis koos takistite R5 ja R7-ga moodustavad pingejaguri. Pingejaguri keskväljavõtust tulev tagasiside võimaldab reguleerida OPA177FP võimendustegurit.

Järgnevalt arvutatakse antud skeemile minimaalne ja maksimaalne võimendustegur. Arvutusvalem on selleks järgmine:

$$G = 1 + \frac{R7}{R5 + R6}$$

Kus

- G – signaali võimendustegur
- R5, R6, R7 – seel 3.22 antud takistite ja potentsiomeetri väärtused

Minimaalse võimendusteguri arvutus:

$$G_{min} = 1 + \frac{R7}{R5 + R6_{max}} = 1 + \frac{1000000}{1000 + 10000} = 92$$

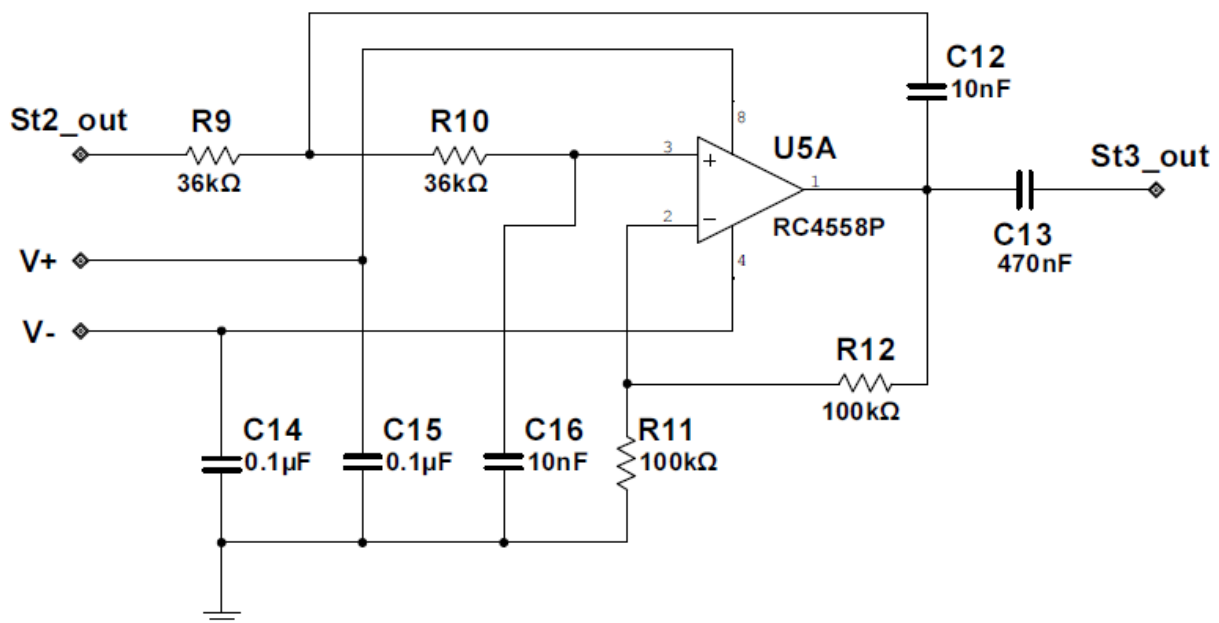
Maksimaalse võimendusteguri arvutus:

$$G_{max} = 1 + \frac{R7}{R5 + R6_{min}} = 1 + \frac{1000000}{1000 + 0} = 1001$$

Madalpääsfilter

Kui peale igat võimendusetappi on kõrgpääsfilter, mis alalisvoolukomponenti välja filtreerib, siis terve töötlusskeemi peale on üks madalpääsfilter, mis EMG sagedusalast välja jääva signaali komponendi summutab. Kuna EMG signaali kasulik sagedusala on vahemikus 10 Hz - 400 Hz, siis häälestati äralõikesagedus vastavalt sellele.

Kuna passiivfilter neelab filtreerimise käigus signaali energiat, siis võeti kasutusele aktiivfilter, mille põhimõtteskeem on välja toodud seel 3.23.



Sele 3.20 Madalpääsfiltri osaskeemi põhimõtteskeem

Kondensaatorid C14 ja C15 on kasutusel toitepingetest pingepiikide silumiseks. Kondensaator C13 täidab vahelduvvoolusidestuse tagamise ülesannet. Takistid R11 ja R12 on pingeljaguri põhimõttel operatsioonivõimendile tagasiside andmiseks ja võimendusteguri määramiseks. Erinevalt eelmistest võimendusetappidest on siin kasutusel fikseeritud võimendusteguriga operatsioonivõimendi, st. lõppkasutaja ei saa konkreetse võimendusastme võimendustegurit muuta.

Võimendusteguriks valiti 2, sest antud juhul ei ole eesmärk signaali võimendamine vaid signaali filtreerimine ilma amplituudi kadudeta, mis põhjendab ka madala võimendusteguri valikut.

Võimendina on kasutusel üldotstarbeline operatsioonivõimendi, mis on eelkõige valitud maksumust silmas pidades. Kuna selleks etapiks on juba signaal piisavalt üles võimendatud, siis ei ole täppisvõimendi kasutamisel mõtet. Valitud üldotstarbelise operatsioonivõimendi

RC4558P sisendile andmelehes antud pingenihtus (*offset voltage*) on maksimaalselt 6 mV, mis valitud võimendusteguri puhul triivib väljundit 12 mV võrra tegelikust väljundpingest kõrvale. Kuna põhisignaali on selleks võimendusetapiks juba hinnanguliselt 4 V amplituudiga, siis ei mõjuta pingenihtus enam signaalitöötlemise edasise tulemusi sellisel määral, et ligikaudu kümme korda kallima täppisvõimendi kasutamine põhjendatud oleks.

Järgnevalt arvutatakse aktiivfiltri äralõikesagedus, mille arvutusvalem võrdsete väärtustega takistite (sele 3.23: R9, R10) ja kondensaatoreid (C12, C16) kasutades on järgmine [15]:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

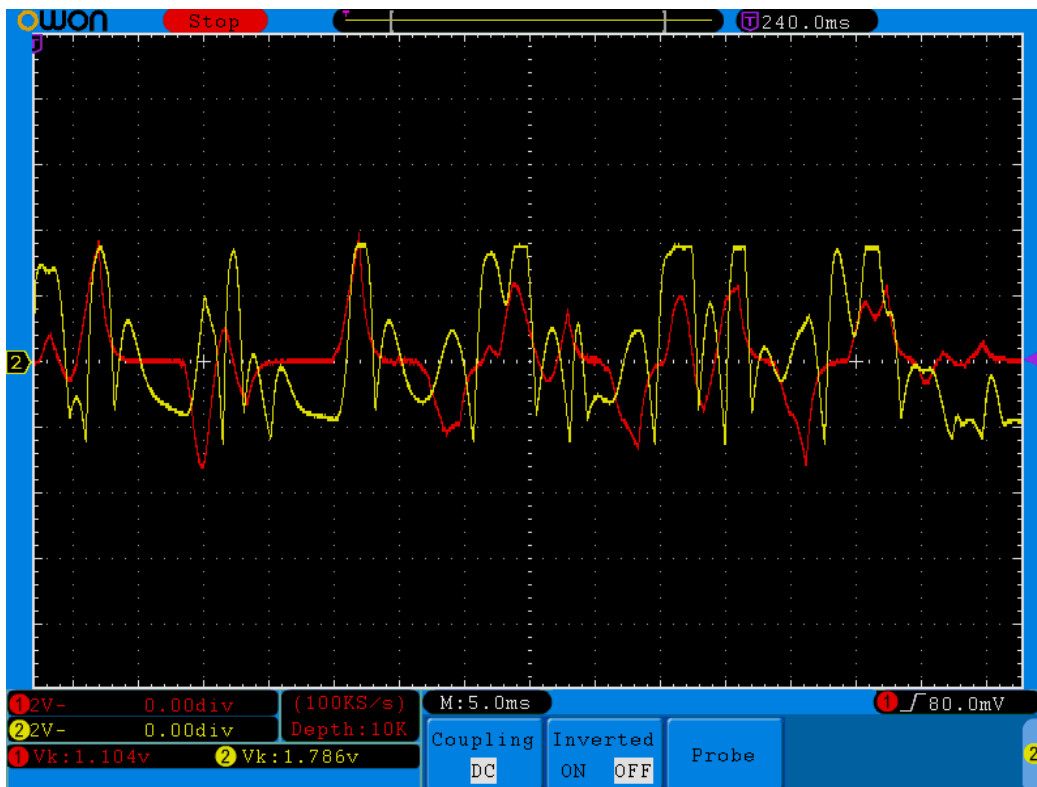
Kus

- f_c – filtri äralõikesagedus
- R – filtri takistite väärtused
- C – filtri kondensaatoreid väärtused

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 36 \cdot 10^3 \Omega \cdot 10 \cdot 10^{-9} F} = 442 \text{ Hz}$$

Arvutatud filtri äralõikesagedus on 442 Hz.

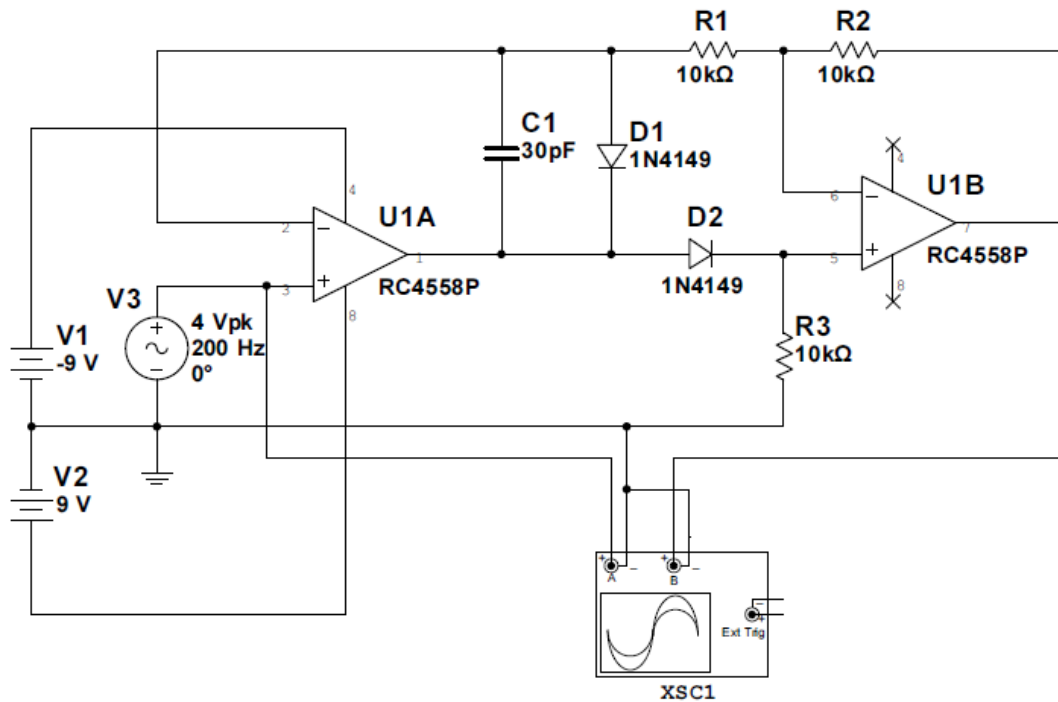
Filtri kasutamisel saavutatav tulemus on näha seel 3.24, kus ostsilloskoobi esimene kanal (punane) kujutab filtreeritud signaali ja teine kanal (kollane) kujutab filtreerimata signaali.



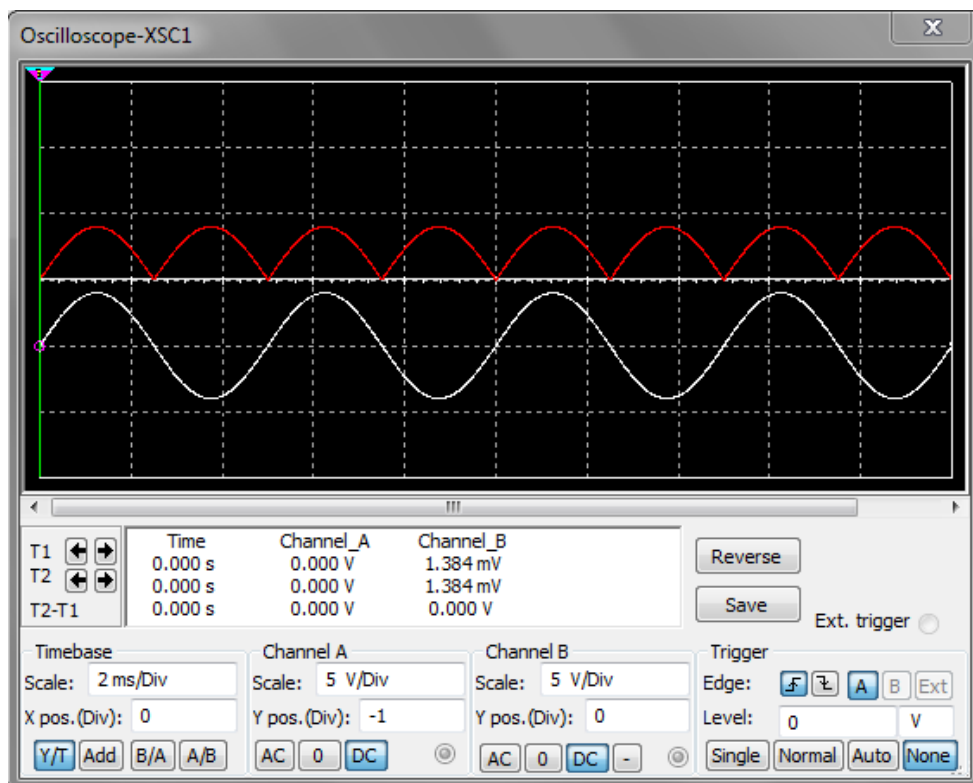
Sele 3.21 Madalpassfiltri simulatsioonitulemus, $f_c = 442 \text{ Hz}$

Signaali alaldamine ja silumine

Antud töö teoreetilise lahenduse faasis kasutati signaali alaldamiseks ideaalalaldit, mis viib diodide peale jääva pingelangu mõju aldatud signaalile nullilähedaseks. Ideaalalaldi skeem on antud seel 3.25 ja simulatsiooni tulemus ostsilloskoobil XSC1 on näidatud seel 3.26.



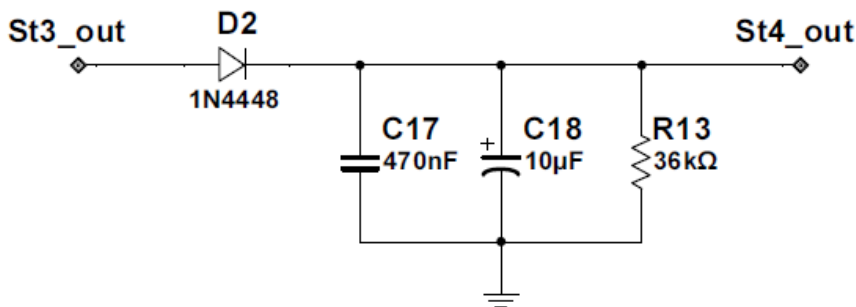
Sele 3.22 Ideaalalaldi põhimõtteskeem



Sele 3.23 Ideaalalaldi simulatsioonitulemus

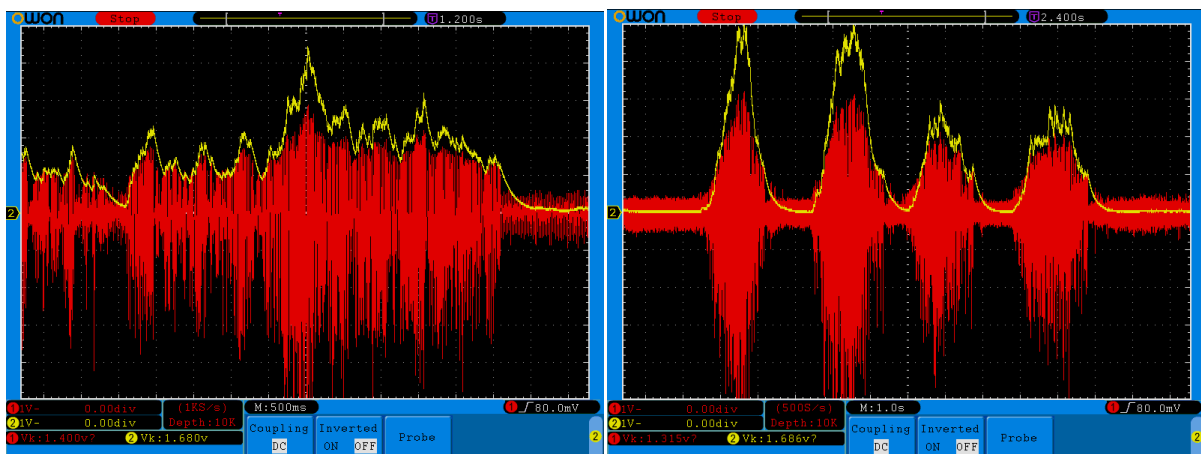
Sellise alaldi ja alternatiivsete variantide praktiline katsetamine viis aga järeldusele, et antud rakendusse piisab ka poolperiood alaldist, mis on realiseeritav ühe diodiga. Lisaks signaali alaldamisele tuleb signaali ka siluda, et võimaldada analoog-digitaalkonverterite kasutamist ilma täiendavate komponentideta.

Signaali silumiseks kasutatakse *envelope detector* põhimõtet, mille puhul silutud signaal järgib kõrgsagedusliku signaali amplituudi piike. EMG töötlusplakis kasutatav *envelope detector* on näidatud seel 3.27.



Sele 3.24 Signaali silumine „*envelope detector*“ põhimõttel

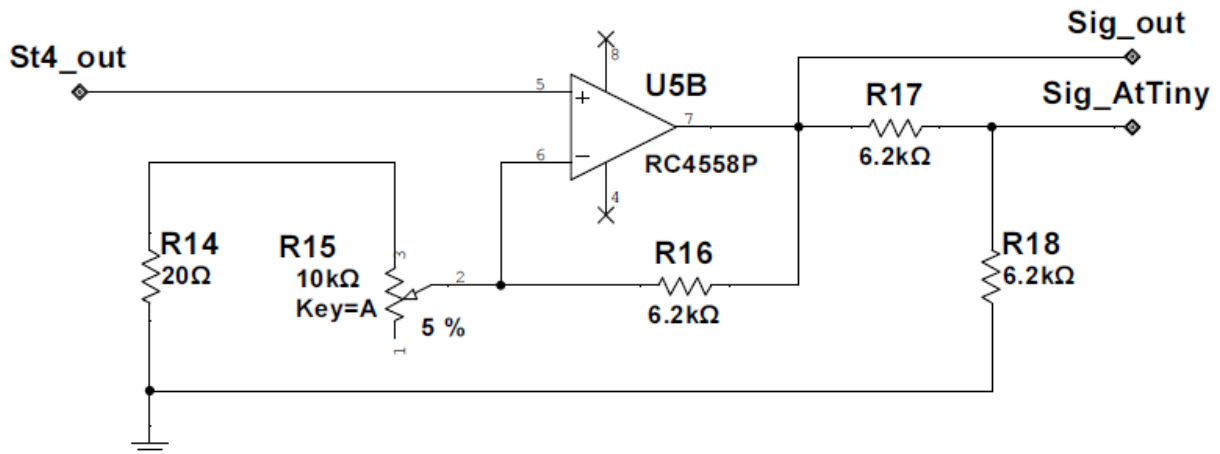
Kui viigust St3_out tuleb osaskeemi positiivne pinge, siis läbi diodi D2 laetakse kondensaatorid C17 ja C18. Kui aga viigust St3_out tuleb negatiivne pinge, siis diod ei juhi ja kondensaatorites olev laeng laetakse läbi takisti R13 maasse. Elektrolüüt-kondensaatori C18 ja takisti R13 sobilik valik teostati skeemi praktilise katsetamise teel kuna reaalselt EMG signaali on raske simuleerida. Kondensaator C17 eemaldab väljundisse tekkida võivad pingepiigid. Katsetuste tulemused on antud seel 3.28. Vasakpoolne illustratsioon näitab silutud signaali pideva lihaspinge korral ning parempoolne illustratsioon kujutab silutud signaali olukorras, kus lihast pingutatakse korduvalt lühikeste impulssidena. Punase värviga on kujutatud alaldamata ja silumata signaal ning kollase värviga tähistatakse silutud signaali.



Sele 3.25 Signaalisilumise osaskeemi katsetuste tulemused

Lõppvõimendi

Signaal läbib enne EMG signaalitöötlusloki analoogväljundisse jõudmist lõppvõimendi. Selle abil saab kasutaja reguleerida analoogväljundi taset vastavalt rakendusele lõplikult sobilikule tasemele. Lõppvõimendi skeem on antud seel 3.29.



Sele 3.26 Lõppvõimendi osaskeemi põhimõtteskeem

Takistid R14 ja R16 ning potentsiomeeter R15 moodustavad võimendi tagasiside ning nende abil reguleeritava võimendusteguri arvutus on antud järgnevalt.

$$G = 1 + \frac{R16}{R14 + R15}$$

Kus

- G – signaali võimendustegur
- R14, R15, R16 – seel 3.29 antud takistite ja potentsiomeetri väärtused

Minimaalse võimendusteguri arvutus:

$$G_{min} = 1 + \frac{R16}{R14 + R15_{max}} = 1 + \frac{6200}{20 + 10000} = 1,6$$

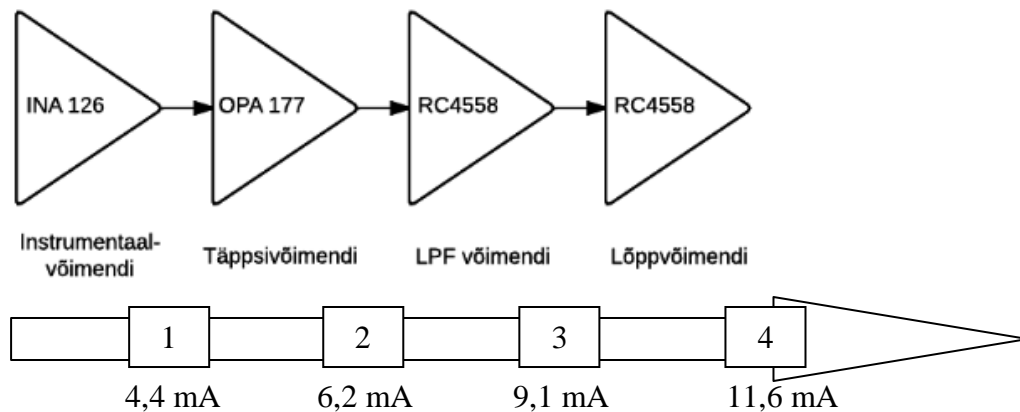
Maksimaalse võimendusteguri arvutus:

$$G_{max} = 1 + \frac{R16}{R14 + R15_{min}} = 1 + \frac{6200}{20 + 0} = 311$$

Takistid R17 ja R18 moodustavad pingejaguri, millega vähendatakse skeemi integreeritud mikrokontrolleri AtTiny ADC sisendisse minevat pinget ning piiratakse voolutugevust. Skeemi analoogsignaali väljund võetakse otse lõppvõimendi väljundist. Operatsioonivõimendi RC4558P väljund on lühise eest kaitstud, seetõttu ei ole voolutugevust piiravat takistit vaja väljundisse lisada.

3.2.4 EMG signaalitöötlusploki voolutarbe hindamine

Kaasaskantava seadme elektroonikaskeemi koostamisel on tähtis analüüsida ka skeemi voolutarbe minimeerimise võimalusi. Selleks tuleb esmalt mõõta skeemi voolutarvet komponentide kaupa, mida tehti seel 3.30 näidatud skeemi alusel. Punktis 1 mõõdeti ainult INA126 voolutarvet ning punktis 4 terve võimendikaskaadi voolutarvet. Mõõtmised teostati 11,9 V toitepinge juures.



Sele 3.27 Võimendikaskaadi voolutarbe mõõtmise tulemused

Saadud tulemuste põhjal saab arvutada voolutarbed komponentide kaupa, mis on järgmised:

- INA126: 4,4 mA
- OPA177: 1,8 mA
- RC4558: 2,5 mA ja 2,9 mA

Arvutatud tulemused olid ootuspärased, sest INA126 integraalskeemis on 2 operatsioonivõimendit ning seda arvestades on kõik võimendid suhteliselt sarnase tarbimisega. Erinevus kahe RC4558 võimendi voolutarbes on põhjustatud väliste komponentide erinevusest.

Skeemi tööaja arvutus:

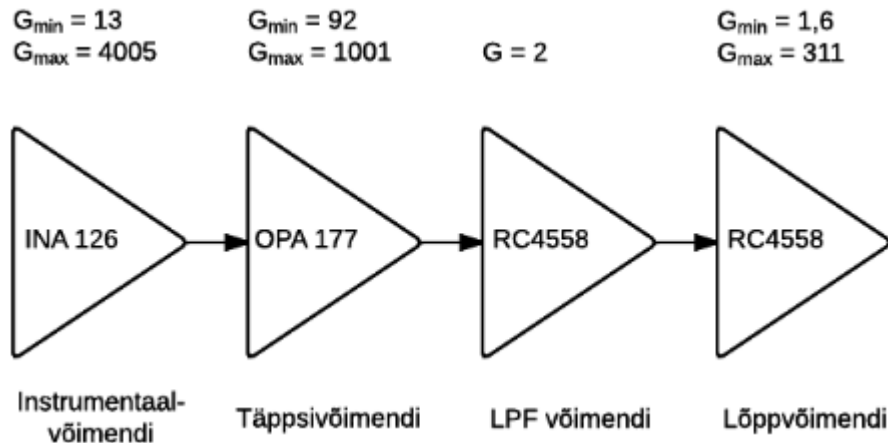
$$t = \frac{\text{patarei mahtuvus}}{\text{skeemi voolutarve}} = \frac{600 \text{ mAh}}{12 \text{ mA}} = 50 \text{ h}$$

Skeemi ligikaudne tööaeg 9 V patareidega on 50 h. Selle arvutamisse ei kaasatud mikrokontrolleri voolutarvet, kuid seda kompenseerib mõnel määral 9 V-se toitepinge juures tekkiv väiksem summaarne voolutarbimine.

Skeemi summaarne voolutarve on lõdva lihasega 11,6 mA ja maksimaalselt pingutatud lihasega 12,3 mA – seega võib põhimõtteliselt lugeda skeemi voolutarbe lihasingutuse tasemest sõltumatuks.

3.2.5 EMG signaalitöötlusploki võimendusteguri hindamine

EMG signaalitöötlusploki kasutusel mitu jadamisi ühendatud võimendit. Võimendite üksikud võimendustegurid on välja arvatud punktis 3.2.3. Järgnevalt arvutatakse EMG signaalitöötlusploki signaalivõimendustegur sisendist kuni väljundini. Kasutusel oleva kaskaadvõimendi konfiguratsioon on näha seel 3.31.



Sele 3.28 Signaalitöötlusploki kasutusel oleva kaskaadvõimendi plokk skeem

EMG signaalitöötlusploki skeemi minimaalne võimendustegur on leitav kõikide võimendus-etappide minimaalsete võimendustegurite korrutisena järgmiselt:

$$G_{min} = 13 \cdot 92 \cdot 2 \cdot 1,6 = 3827$$

EMG signaalitöötlusploki skeemi maksimaalne võimendustegur on leitav kõikide võimendus-etappide maksimaalsete võimendustegurite korrutisena järgmiselt:

$$G_{max} = 4005 \cdot 1001 \cdot 2 \cdot 311 = 2,5 \cdot 10^9$$

Antud arvutused annavad teoreetilise võimendusteguri, kuid ei tähenda, et sisendpinget võimendusteguriga läbi korrutades saadakse väljundpinge väärtus. Skeemis on signaalkadusid – näiteks signaali aldamisel kasutatava diodi peale jääb 0,7 V pingelang, filtrid neelavad signaali energiat jne.

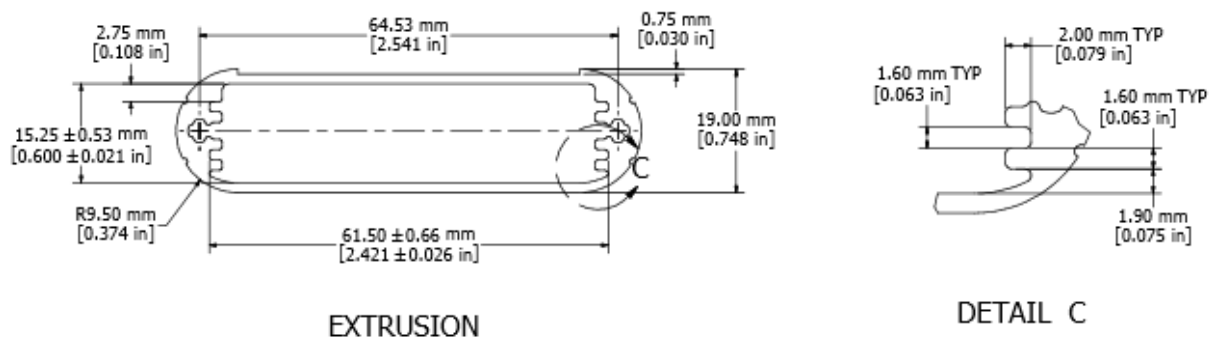
3.2.6 Komponentide koondtabeli koostamine

Komponentide koondtabel on antud lisa 1, milles on näidatud komponendi Farnelli tellimusnumber, kirjeldus, kogus skeemis, märgistused, minimaalne- ja maksimaalne töötemperatuur, tüki hind ning komponentide hind kokku. Komponente analüüsides on skeemi lubatud töötemperatuuri vahemik $-30^{\circ}\text{C} \dots 85^{\circ}\text{C}$, mis on kooskõlas lähteülesandega. Komponentide summaarne maksumus on 19 €.

3.3 Trükkplaadi projekteerimine

3.3.1 Trükkplaadi mõõtmete määratlemine

Trükkplaadi mõõtmed määratleti põhimõttel, et mida väiksem tuleb trükkplaat, seda parem. Arvestada tuli siiski ka valitud korpusega ehk korpuse valik toimus samaaegselt trükkplaadi mõõtmete määratlemisega. Valitud korpuseks osutus ekstrudeeritud alumiiniumprofiil, mis on spetsiaalselt mõeldud kahe 1,6 mm paksuse trükkplaadi mahutamiseks. Valitud korpuse profiilvaade on antud seel 3.32.



Sele 3.29 Ekstrudeeritud alumiiniumprofiili profiilvaade [16]

Korpusetootja poolt etteantud trükkplaadi laius on 60 mm, mis sai ka trükkplaadi mõõtmete valimisel aluseks võetud. Trükkplaadi pikkus määratleti töö käigus komponentide trükkplaadile mahutamise tulemusena, kuid eesmärgiks võeti, et trükkplaadi pikkusmõõde ei oleks üle 59 mm. See tagab korpuse optimaalse kasutuse, mis on lahti seletatud punktis 3.4.2. PCB lõplikuks pikkuseks jäi 54 mm.

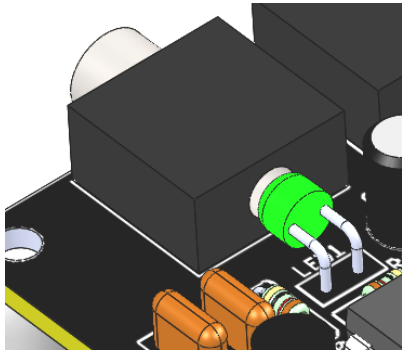
Seega trükkplaadi mõõtmed on 60 mm x 54 mm x 1,6 mm, kõik väljalõiked on sirgjoonelised.

3.3.2 Komponentide paigutus

Kuna komponentide hulgas ei olnud integraalskeeme, mille puhul on vaja minimeerida osade väliste komponentide radade pikkuseid (nt. ostsillaatorid, signaalilaade kondensaatorid jms), siis lähtuti ennekõike põhimõttest, et komponentide omavaheline paigutus tagaks võimalikult lühikesed rajapikkused ning võimalikult vähe üleviike. Samuti üritati võimaluse korral paigutada DIP8 korpuses olevad integraalskeemid ühele joonele ning sama põhimõtet järgiti ka passiivkomponentide paigutusel, et tagada trükkplaadi korrektne välimus.

Fikseeritud paigutusega komponendid on järgmised: pesad sisendite ja väljundite tarbeks, potentsiomeetrid skeemi erinevate võimendusastmete reguleerimiseks ning digitaalväljundi lülituspunkti määramiseks. Kuna nii pesad kui ka potentsiomeetrid peavad olema lõppkasutajale lihtsasti kättesaadavad, siis paigutati need trükkplaadi servadesse nii, et

corpuse vastaval töötlemisel oleks need ilma corpust avamata nähtaval. Kuna alumiiniumprofiili otsakaaned on plastmassist ja tasapinnalised, siis oli lihtsama töödeldavuse huvides mõistlik pistikud ja potentsiomeetrid ka nende taha paigutada. Pistikute (X1, X2, X3) ja potentsiomeetrite (R1, R6, R15, R19) paigutus on näidatud seel 3.33.

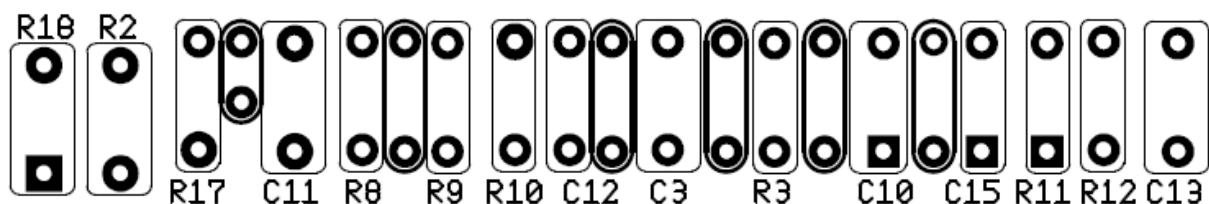


Sele 3.30 Toiteindikaatori LEDi paigutus

Toitepinge olemasolu indikaatori ülesannet täitev valgusdiod suunati elektroodide sisendi pistikuavasse. Kuna ava on pistikut läbiv, siis saab toitepinge olemasolus veenduda kui eemaldada pesast elektroodide pistik. Kuna toitepinge olemasolus veendumise näol on tegu erandliku olukorraga, siis on LEDi taoline paigutus põhjendatud. See võimaldas valgusdiodi paigutamist toite pistiku lähedale, millega optimeeriti radade paigutust.

3.3.3 Üleviikude kasutamine

Trükkplaadi projekteerimisfaasis võeti eesmärgiks disainida ühepoolne trükkplaat, st. vaserajad on ainult ühel trükkplaadi poolel. Selle eesmärgi peamiseks argumendiks on kulude vähendamine, sest ühepoolne trükkplaat on kahepoolsest odavam. Ühepoolse trükkplaadi tegemine ilma üleviikudeta on aga suuremate plaatide puhul väga raske. Kuna üleviikude tegemine oli vajalik, siis üritati need paigutada korrapäraselt ja võimalusel varjatud kohtadesse. Seel 3.34 on näidatud, kuidas üleviigud on paigutatud takistite ja kondensatoritega ühele reale, et tagada visuaalne terviklikkus. Selline komponentide ja üleviikude paigutus võimaldas vedada kõik vajalikud rajad mööda ühtset koridori ühest trükkplaadi servast teise.

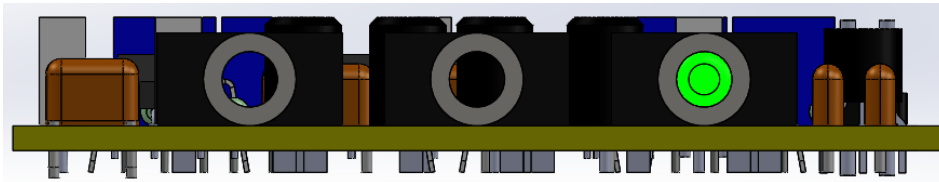


Sele 3.31 Üleviikude korrapärane paigutus trükkplaadil

Ülejäänud üleviigud paigaldati võimaluse korral teiste komponentide alla, mille puhul on elektriline isoleeritus komponendi ja selle all oleva üleviigu vahel tagatud.

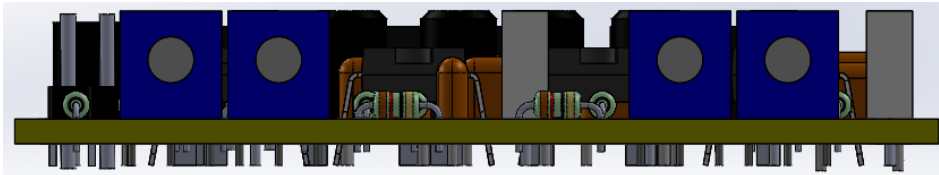
3.3.4 Projekteeritud trükkplaadi ülevaade

Peale trükkplaadi disaini valmimist tarkvaras *NI UltiBoard* eksporditi komponentide jalgade paigutus raalprojekteerimise programmi *SolidWorks* ning lisati seal komponentide 3D mudelid, et veenduda valminud trükkplaadi disaini korrektsuses ning saada trükkplaadist parem ülevaade. Vaade pistikupesadele on antud seel 3.35, millelt on näha ka eespool kirjeldatud LEDi paigutus.



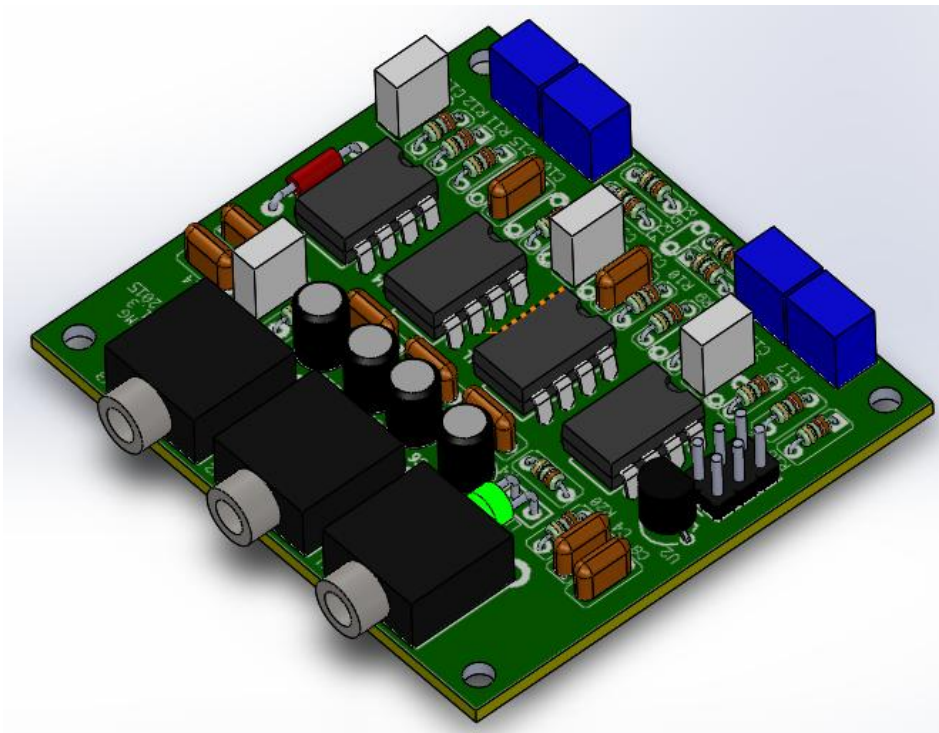
Sele 3.32 Projekteeritud trükkplaadi ülevaade pistikute poolt

Vaade korpuse teise otsapaneeli poolt on näidatud seel 3.36.



Sele 3.33 Projekteeritud trükkplaadi ülevaade potentsiomeetrite poolt

Projekteeritud trükkplaadi isomeetriline vaade on antud seel 3.37, millelt on näha komponentide kompaktne ning korrapärane paigutus.



Sele 3.34 Projekteeritud trükkplaadi isomeetriline vaade

3.3.5 Trükkplaadi tellimine tootjalt

Valitud trükkplaadi tarnijaks on Kamitra OÜ. Nendepoole eelistus failiformaatide osas on järgmine: Gerber formaadis failid erinevate trükkplaadi kihtide jaoks ning Excellon puurfailid läbivaukmontaaži avade jaoks.

Kamitra OÜ pakub trükkplaate nii hobikasutajale kui ka professionaalseks kasutamiseks. Kuna tegemist on prototüüpseeria väljatöötamisega, siis kaaluti ka odavamate hobikasutaja plaatide tellimist, kuid kuna nende puhul ei pakuta trükkplaadi välja freesimise teenust, siis otsustati trükkplaadid tellida tavahinnakirja alusel.

Peale trükkplaadi projekteerimist eksporditakse Gerber RS-274X formaadis failid trükkplaadi disainimise programmist Ultiboard järgmiste trükkplaadi kihtide jaoks:

- Trükkplaadi väljalõikejoon (*board outline*)
- Komponentide märgistus (*silkscreen top*)
- Alumine vasekiht (*copper bottom*)
- Alumine jootemask (*solder mask bottom*)

Seejärel kontrollitakse neid faile GerberViewer programmiga ning kui visuaalne vaatlus ning kihtide omavaheline võrdlus ühtegi probleemi välja ei too, siis saadetakse failid Kamitrasse. Kihtide omavahelisel võrdlusel on eriti tähtis jälgida, et märgistus ei jääks joodetava ala peale, sest sellisel juhul läheb märgitustel olev informatsioon kaduma. Samuti jälgitakse, et jootemaskis on iga jootekoha juures ava. Kui see puudub, siis on jootekoht kaetud joodist hülgava kihiga ning jootmine ei ole teostatav. Ülevaate EMG signaalitöötlusploki trükkplaadi olulisematest kihtidest leiab lisast 5.

Alumisele vasekihile on lisatud maa-kiht (*powerplane*), mis konstrueeriti vastava programmi käsu poolt automaatselt. Peale kihi lisamist kontrolliti, et maa kihti ei oleks jäänud väikeseid eraldatud saarekesi, mis takistavad trükkplaadi tootmist. [17]

Alumisele jootemaskile jäeti kinnitusavade äärde alad, mis ei ole jootemaskiga kaetud. See tagab trükkplaadi maa kihi ühenduse korpusega, mis antud signaalitöötlusploki puhul on eriti tähtis, sest kui korpus on ühendatud maa kihiga, siis käitub see Faraday puurina. See tähendab omakorda, et trükkplaat on paremini kaitstud elektromagnetlainete poolt tekitatud väliste häiringute suhtes.

3.4 Korpuse projekteerimine

3.4.1 Erinevate lahenduste väljapakumine

Korpus on EMG signaali töötlusploki juures oluline osa, sest korpus on see, mida lõppkasutaja igapäevaselt näeb ning katsub. Samuti pakub korpus trükkplaadile kaitset nii mehaaniliste mõjutuste kui ka ümbritseva keskkonna eest. Siinkohal on oluline välja tuua, et korpuse valikul ja projekteerimisel on arvestatud IP21 kaitseklassi tagamisega, sest prototüüpseeria pistikute valik ei võimalda EMG signaalitöötusploki paremat keskkonnakaitset pakkuda. Seega on trükkplaat kaitstud vertikaalselt langevate veepiiskade ning tahkete esemete eest, mille väikseim mõõde ületab 12 mm. [18]

Edasises töös analüüsitakse järgmiseid variante:

- **Ekstrudeeritud alumiiniumprofiili kasutamine**

Selle variandi puhul valitakse välja ostutoode, mis võib vajada vähesel määral töötlemist, et sobitada seda konkreetse trükkplaadi mõõtmete, sisendite ja väljunditega. Ekstrudeeritud alumiiniumprofiili pind on anodeeritud ja võimalik on valida erinevate värvitoonide vahel – see kõik võimaldab anda tootele professionaalse välimuse.

Ostutoote valik on alati seotud kompromissiga: ühelt poolt on ostutoote kasutamine lihtne ja enamasti ka soodsam viis trükkplaadile korpuse leidmiseks, kuid teiselt poolt ei pruugi ostutoode pakkuda piisavalt häid võimalusi korpuse trükkplaadi mõõtmetega sobitamiseks. Ka antud juhul tuli teha kompromiss, et tagada nii trükkplaadi korpusesse sobimine kui ka lähteülesandes formuleeritud kompaktsuse nõue.

- **Alumiiniumplaadist korpuse poolte väljafreesimine**

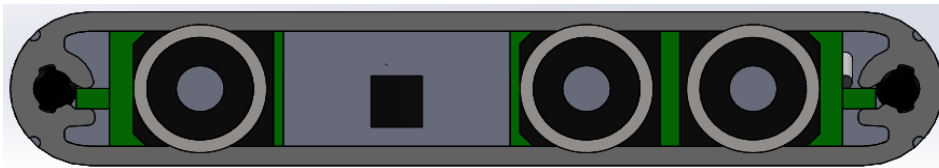
Selle variandi puhul on toormaterjaliks alumiiniumplaadid, mida lõiketöötuse abil rakenduse jaoks sobilikuks töödeldakse. Toorik on selle variandi kasutamise puhul võrreldes ekstrudeeritud profiiliga kindlasti soodsam, kuid töötusprotsesside läbiviimine ja samaväärse pinnaviimistluse tagamine on kulukam.

Samas tagab nullist trükkplaadi jaoks projekteeritud korpus maksimaalse korpuse trükkplaadiga sobitumise ning seeläbi on võimalik saavutada väiksemate gabariitmõõtmetega EMG signaalitöötusplokk.

Mõlemad uuritavad korpusevariandid on alumiiniumist, mis võimaldab prototüüpseeria katsetamise jooksul hinnata korpuse poolt pakutavat elektromagnetlainete vastast kaitset.

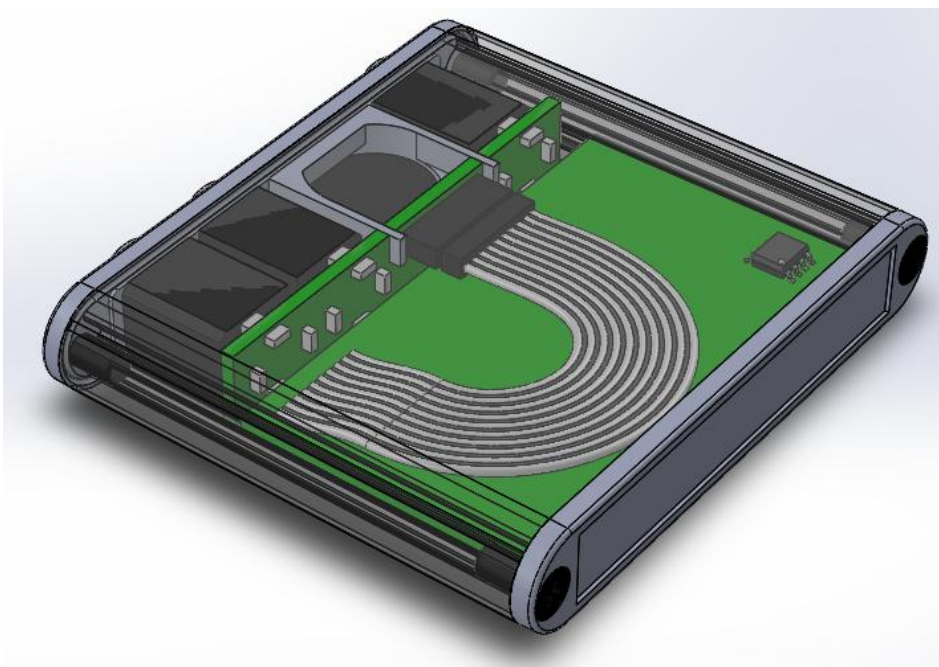
3.4.2 Ekstrudeeritud alumiiniumprofiili valik

Samaaegselt korpuse valimisele teostati ka elektroonikakomponentide mõõtmete uurimist, et tagada üheaegselt optimaalne korpuse valik kui ka sobilike elektroonikakomponentide välja-selekteerimine. Esmalt üritati minimeerida korpuse kõrgusmõõdet ning valiti edasise töö aluseks 12 mm kõrge alumiiniumprofiil. Sellise profiili puhul paigutub trükkplaat profiili keskel olevatesse soontesse (sele 3.38). Kuna trükkplaadile komponentide paigutamise tasapinna ning korpuse vahele jääb vaid 4,5 mm, siis on enamuste läbivaukmontaaži komponentide valik välistatud.



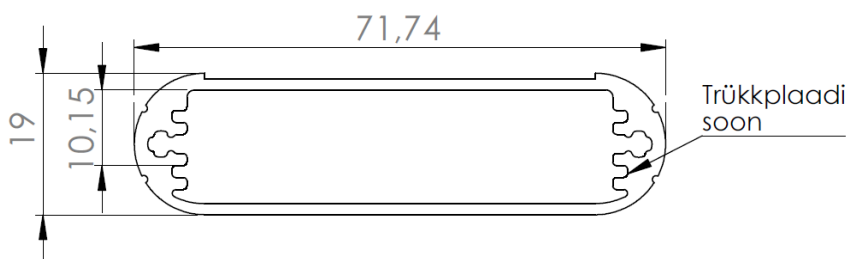
Sele 3.35 Madala alumiiniumprofiili profiilvaade

Kõige problemaatilisemaks oleks osutunud 3,5 mm pesade paigutamine, mis oleks nõudnud vertikaalset lisatrukplaati, mille kasutamine on näidatud seel 3.39. Sellisel kujul on mitme trükkplaadi kasutamine kõrgendatud tootmiskulude tõttu põhjendamatu ning korpuse väiksem kõrgusmõõde ei oleks piisav argument sellise süsteemi kasutamiseks. Samuti on näha seelt 3.39 kahte trükkplaati ühendavad juhtmed, mille paigaldamine võtaks koostamise käigus märkimisväärselt lisaega. Analüüsi ka juhtmete asemel erinevate pistikute kasutamise võimalust, kuid sobilikku lahendust antud korpuse mõõtmete juures ei leidunud.



Sele 3.36 Ülevaade vertikaalasetusega trükkplaadist

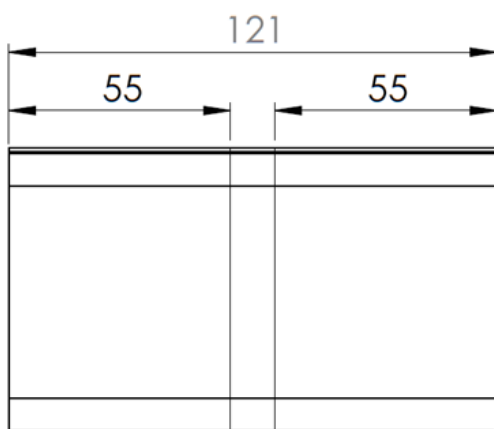
Kuna esmane lahendus ei sobinud, siis arvestati uue profiili valikul, et kasutusele võetaks üksik trükkplaat, millel olevad komponendid peavad olema kõik põhitrükkplaadi külge joodetavad. Sellisele kriteeriumile vastas Hammond Manufacturing poolt toodetav 1455 seeria trükkplaadi korpus, mille profiili mõõtmed on antud seel 3.40. See korpus on esialgu analüüsitud variandist 7 mm kõrgem, kuid kuna trükkplaate saab paigutada nii korpuse alakui ka ülaosas olevatesse soontesse, siis võimaldab valitud alumiiniumprofiil eesmärgiks võetud üksiku trükkplaadi koos sisend-väljund pesadega ära mahutada. Trükkplaadile komponentide paigutamise tasapinna ning korpuse vahele jääb 10,15 mm. Kõige kõrgema kasutatava elektroonikakomponendi kõrgusmõõde on 7 mm.



Sele 3.37 Valitud alumiiniumprofiili mõõtmed

Kuna nii trükkplaadi laiusele kui ka pikkusele sobivat korpust ei leidunud, siis valiti niipalju pikem profiil, et see oleks sobilik kahe korpuse valmistamiseks. Kuna ostutoote komplektis on 2 otsakaant ja 4 kruvi, siis tuleb tellida korpusepaari tegemiseks juurde kaks täiendavat otsakaant koos nende kinnitamiseks vajalike kruvidega, mis on kõik ostutootena ka saadaval.

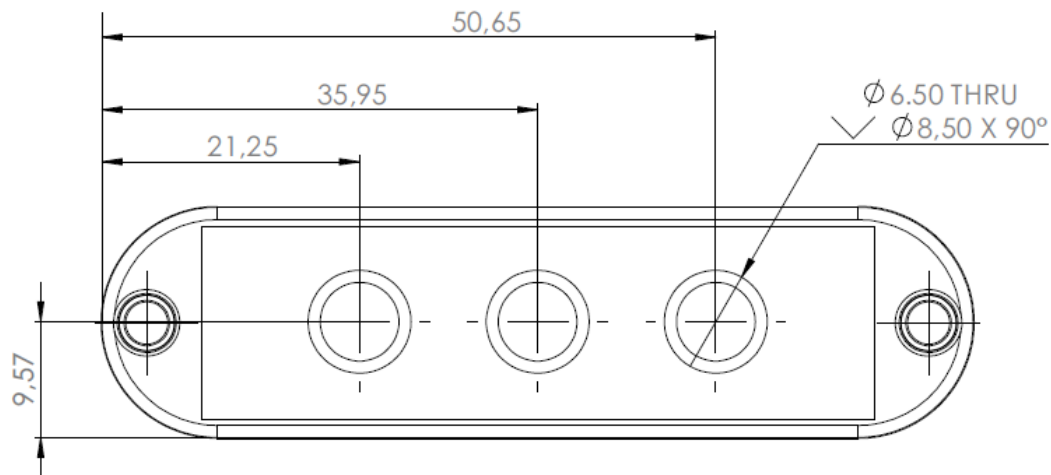
Ekstrudeeritud alumiiniumprofiili pikkus on 121 mm ning see on mõeldud 120 mm pikale trükkplaadile. EMG signaalitöötlusploki trükkplaadi mõõtmete minimeerimisel saavutatud PCB mõõtmed on 60 mm x 54 mm. Signaalitöötlusploki trükkplaadile korpuste valmistamise jaoks on seetõttu vaja lõigata profiil kaheks 55 mm pikaks jupiks, lõikeskeem on näidatud seel 3.41. Tekkiv alumiiniumi ülejääk suunatakse taaskasutusse.



Sele 3.38 Valitud alumiiniumprofiili lõikeskeem

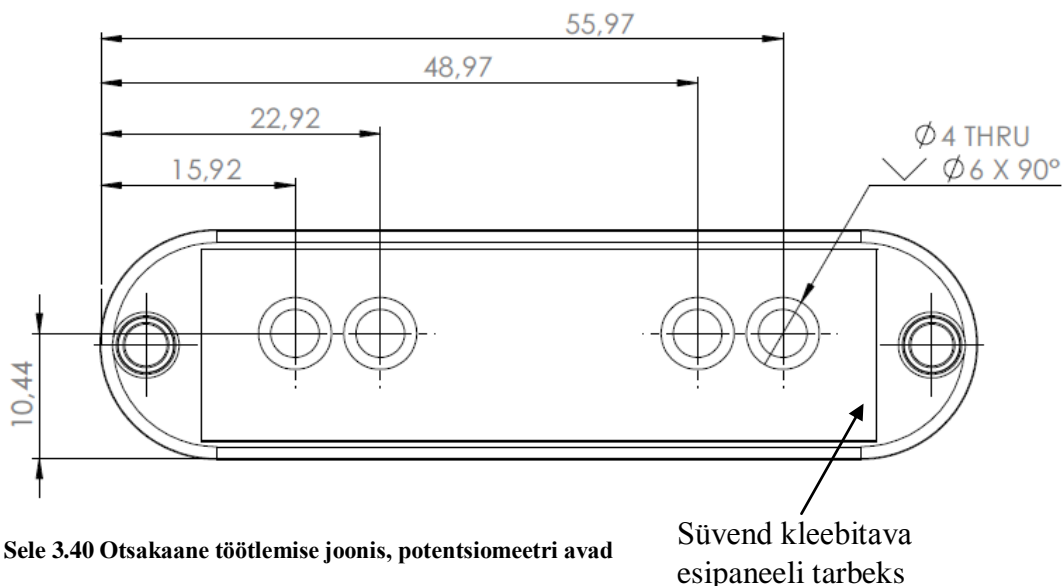
Trükkplaadi korpusesse paigutamiseks on vaja mõlema alumiiniumprofiili otsakaane sisse avad puurida. Kuna tegemist on plastmassi puurimisega, siis on see lihtsasti teostatav ning väikese tootmismahu juures on mõistlik kasutada toorikule avade märkimiseks šablooni. Protsessi teeb veel lihtsamaks otsakaane sees olev süvend, mille abil saab šablooni kiirelt ja täpselt paigutada.

Selel 3.42 on antud pistikuavade mõõtmed ning nende asukohad otsakaanel.



Sele 3.39 Otsakaane töötlemise joonis, pistiku avad

Selel 3.43 on antud pistikuavade mõõtmed ning nende asukohad otsakaanel.



Sele 3.40 Otsakaane töötlemise joonis, potentsiomeetri avad

Süvend kleebitava esipaneeli tarbeks

Edaspidiste arenduste käigus tuleb välja töötada ka disain kleebitava esipaneeli tarbeks, mille jaoks on otsakaanes juba süvend olemas. Esipaneel peaks sisaldama informatsiooni pistikute ning potentsiomeetrite kohta ning tegema nende identifitseerimise lihtsaks.

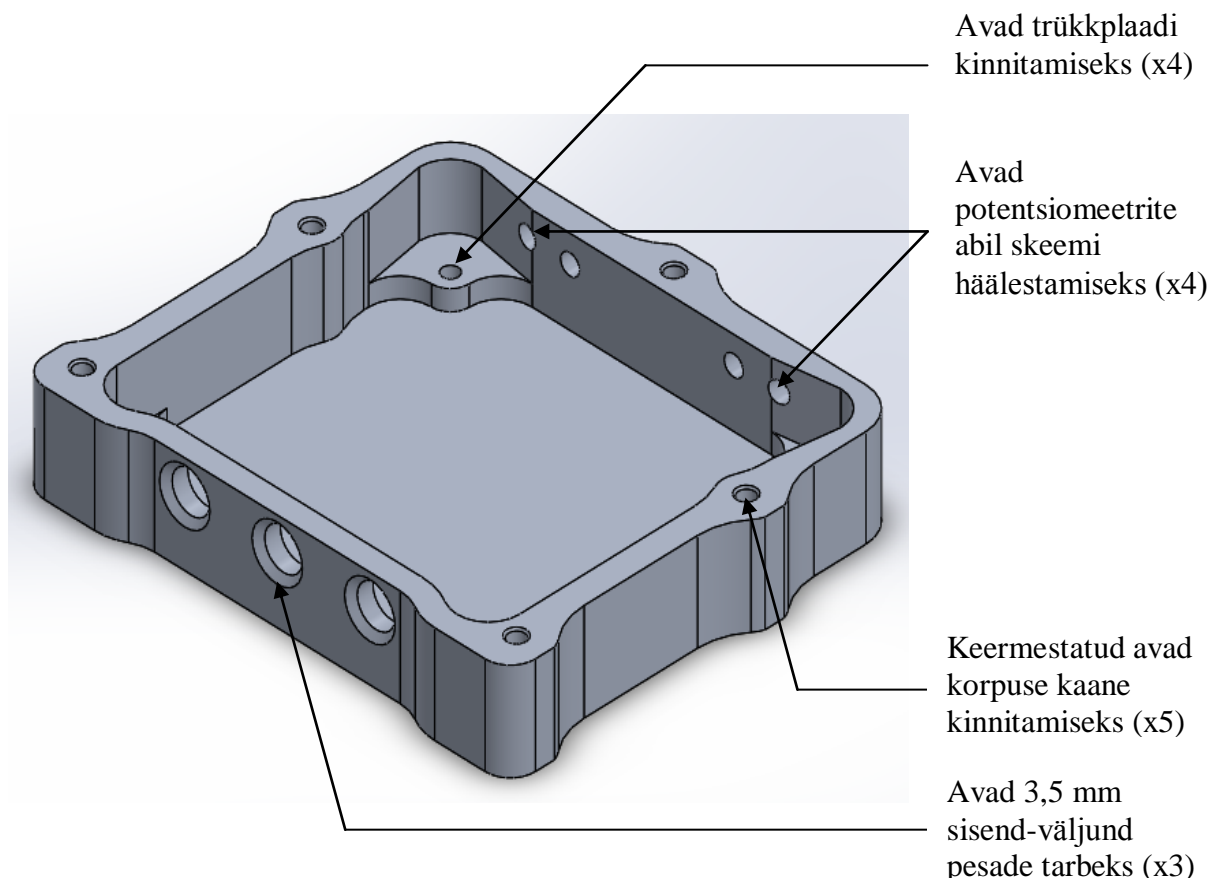
3.4.3 Lehtmaterjalist korpuse väljatöötamine

Lehtmetailist korpuse väljatöötamiseks valiti esmalt sobilikud alumiiniumplaadid.

Korpuse valmistamise toorikuks valiti 15 mm alumiiniumplaat ning korpuse kaane toorikuks 2 mm alumiiniumleht. Seetõttu on korpuse summaarne kõrgusmõõde võrreldes ekstrudeeritud korpusega vaid 2 mm võrra väiksem, mis näitab optimaalset ekstrudeeritud alumiiniumprofiili valikut, sest lehtmaterjalist freesitud korpus on tehtud täpselt trükkplaadi ja sellel olevate komponentide poolt etteantud piirmõõtmete järgi.

Korpuse väljatöötamisel arvestati, et ükski sisenurga raadius ei oleks alla 5 mm, sest selle tingimuse täitmisel on võimalik töödelda tervet detaili 10 mm freesiga, mis võimaldab ühelt poolt piisavalt detailset ja teiselt poolt piisavalt kiiret ning odavat töötlust.

Töödeldud korpuse isomeetriline vaade koos selgitustega on antud seel 3.44.

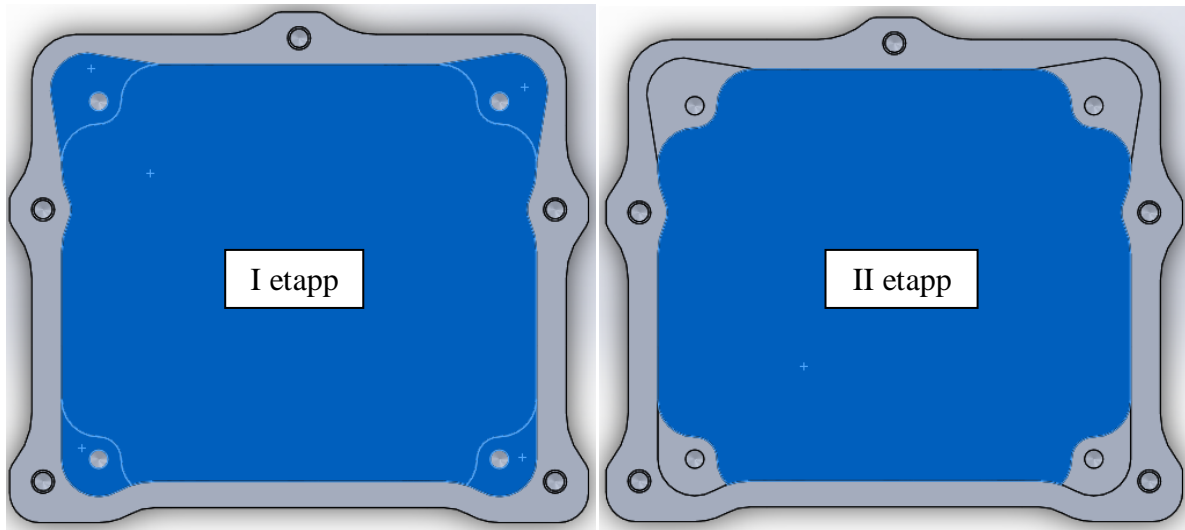


Sele 3.41 Alumiiniumlehest töödeldud korpuse isomeetriline vaade

Korpuses on keermestatud avad nii kaane kui ka trükkplaadi kinnitamiseks. Mõlemal puhul on kasutusel M3 x 3 sisekuuskant poldid, mis kaane kinnitamiseks on peitpeaga (DIN7991) ja trükkplaadi kinnitamiseks lameda peaga (DIN7984).

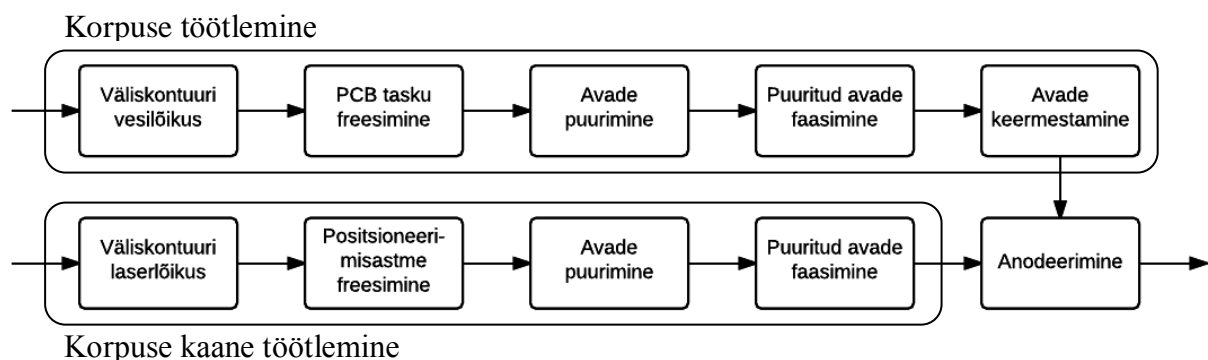
Korpuse töötlemise seisukohalt on sealt 3.43 näha, et trükkplaaditasku freesimine on teostatav kahes etapis. Need etapid on kujutatud seel 3.45.

- Esimeses etapis töödeldakse korpust kuni trükkplaadi kinnituspinnani, milleni jõudmiseks tuleb eemaldada 9,5 mm paksune materjalikiht.
- Teises etapis töödeldakse korpust trükkplaadi kinnituspinnast edasi ning selles töötlusfaasis tuleb eemaldada 3 mm paksune materjalikiht.



Sele 3.42 Freesimisel kasutatavad kaks etappi

Kuigi freesimine on kõige mahukam tötlusetapp, läbivad nii korpust kui ka selle kaas veel palju teisi lõiketötluse etappe, millest on antud ülevaade seel 3.46.



Sele 3.43 Korpuse väärtust lisavad töötlemise etapid

Ülevaates esitatud etappide täpsemaid tehnoloogilisi näitajaid selle töö käigus ei analüüsita ega CAM programmi mudeleid ei teostata, sest punktis 3.4.6 jõutakse järeldusele, et lehtmetailist valmistatud korpuse valik on nii kõrgema maksumuse kui ka oluliselt suurema keskkonnamõju tõttu põhjendamatu.

3.4.4 Korpuste majanduslik analüüs

Selles peatükis võrreldakse kahe erineva korpusevalmistamisemeetodi toorikute ja töötlemise maksumust – siin ei ole eesmärgiks korpuste omahinna arvutamine, seda tehakse peatükis 6.

Ekstrudeeritud alumiiniumprofiil on olemuselt ostutoode, mille minimaalne tellimishulk on 1 ühik ja tarnijat informeerides ületab maksimaalne tellimishulk olulisel määral prototüüpseeria valmistamiseks vajalikku hulka. Seejuures on võimalik saavutada ka mastaabisäästu: kui tellimishulk on üle 25, siis on ühe korpuse valmistamiseks vajaliku tooriku hind juba 25% soodsam. Selline tarnekoguse paindlikkus teeb antud profiili kasutamise prototüüpseeria puhul eriti sobilikuks.

Lehtalumiiniumist toorikute valmistamisel ei ole võimalik samalaadset tarnekoguse paindlikkust mitmel põhjusel saavutada. Esiteks, töötlemiseks kasutatavate alumiiniumlehtede mõõtmed on 1020 x 2020 mm, millest saab valmistada 336 korpust. Teiseks, suurte vesi- ja laserlõikuspinkidega lõiketeenuse pakkujad ei võtaks neile liialt väikeste koguste puhul tööd ette, sest see ei tasuks ära või oleks teiselt poolt teenuse tellijale liialt kallis. Kolmandaks probleemiks on töötlustevõtete vaheline transport, mis väikese koguse korral tõstaks tükihinda märkimisväärselt.

Samuti tuleb pikema tarneahela korral arvestada tarneahela juhtimiseks kuluva ajaga, mis on ka majanduslikus plaanis kulutus, sest tehtav töö tuleb palgana välja maksta.

Tabelis 3.5 on võrreldud korpusevalmistamisemeetodite maksumust ühe korpuse kohta, hindade aluseks on võetud 100 korpuse valmistamine. Osad tabelis välja toodud maksumused on hinnangulised, sest lõplik maksumus kujuneb paljude tegurite mõjul, mida ei ole üldise hinnangu andmiseks vajadust käsitleda.

Tabel 3.5 Korpuste hinnavõrdlus

Korpuse valik, valmistamisviis	Tooriku maksumus, €	Töötlemise maksumus, €	Korpuse maksumus, €
Ekstrudeeritud profiili kasutamine	4,3	0,5	4,8
Alumiiniumlehest korpuse töötlemine	1,1	7,8	8,9

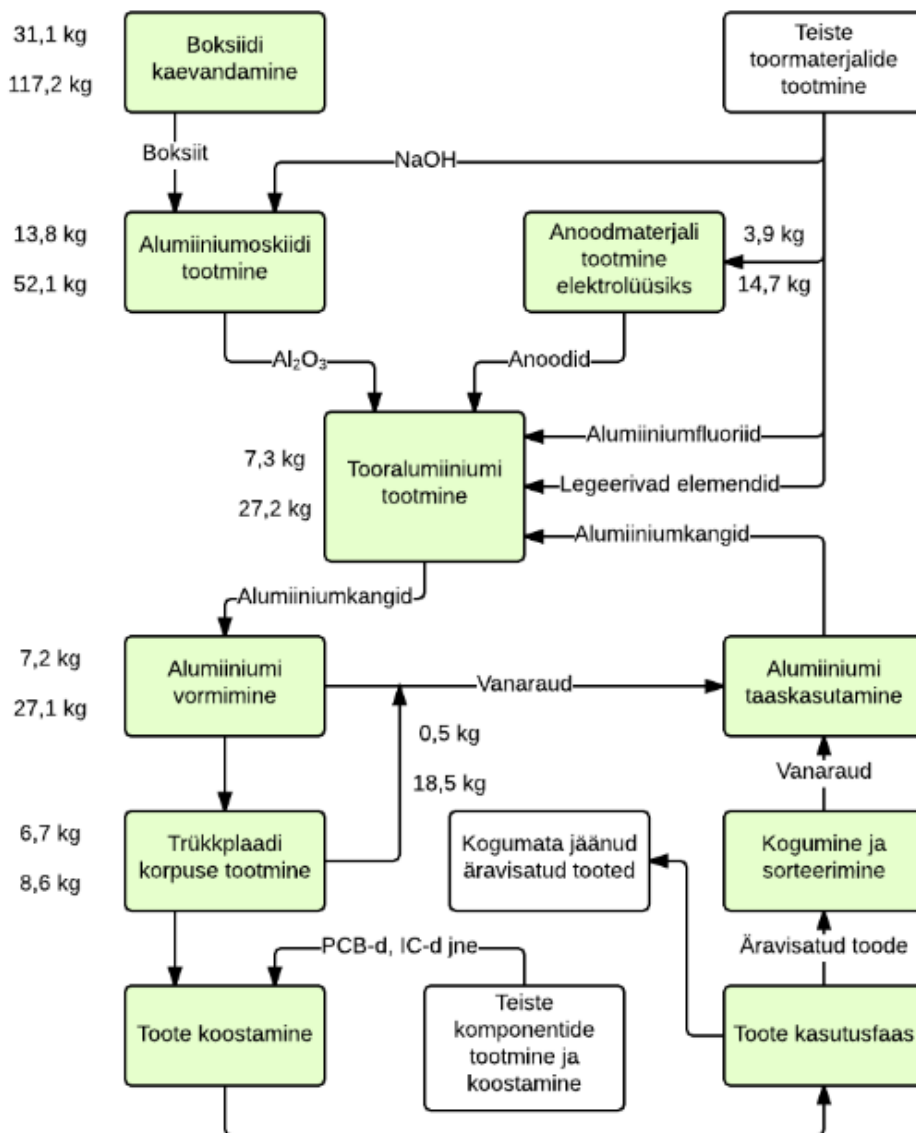
Kuna ekstrudeeritud korpus on keerulisema geomeetriga ning selle valmistamine maksab rohkem, siis on ka toorik võrreldes lehtmetalliga üle nelja korra kallim. Hinda lisab ka pinnaviimistlus, milleks on värviline anodeerimine. Samas on selle korpusevalmistamisemeetodi lõpphind ligi kaks korda madalam, sest ostutoote töötlemise vajadus on minimaalne. Majanduslikus plaanis on ekstrudeeritud profiili kasutamine igas mõttes põhjendatud.

3.4.5 Korpuste keskkonnaalane analüüs

Sissejuhatus keskkonnaanalüüsi

Peatükkides 3.4.2 ja 3.4.3 esitatud korpusevariantidele tehakse selles peatükis keskkonnaalane analüüs ja võrreldakse kumb korpuse tootmise viis on keskkonnasõbralikum. Lihtsustamise eesmärgil asendatakse peatükis 3.4.2 esitatud korpuse puhul plastmassist otsakaaned võrdväärsete alumiiniumist otsakaantega. Samuti tuleb lihtsustuse eesmärgil jätta arvestamata korpuste geomeetria eripärad ning võrrelda erinevaid protsesse korpuse massi alusel. Selline lihtsustus on tehtud ka Euroopa Alumiiniumi Assotsiatsiooni poolt koostatud alumiiniumi elutsükli käsitlevas juhendis [19], millele see peatükk üles ehitatud on.

EMG signaali tötlusploki lihtsustatud elutsükkel rõhuasetusega korpuse tootmisel on antud seel 3.47.

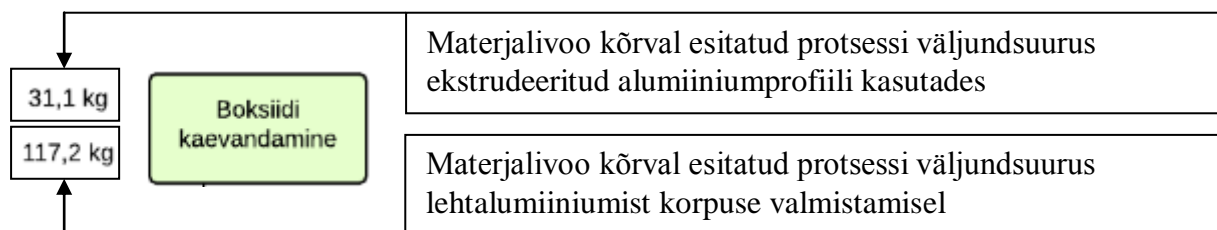


Sele 3.44 Korpuste lihtsustatud elutsükli ülevaade

Keskkonnanalüüsis hinnatakse seel 3.47 rohelistes kastides olevaid protsesse. Arvestamata jäetakse kõikide teiste toormaterjalide tootmine ning samuti ei kaasata analüüsi mitte ühtegi teist toote osa peale korpuse – sellega määratakse analüüsi piiritingimused. Kuna üksiku korpuse analüüsimisel oleksid mõõdetavad ühikud liiga väikesed (korpuse kaalub keskmiselt 75 g), siis lähtuti keskkonnanalüüsi läbiviimisel 100 korpuse valmistamise ja utiliseerimise keskkonnamõjude hindamisest. See tagab andmete parema võrreldavuse andmebaasides olevate näitajatega, sest nendes on antud enamasti keskkonnamõjud 1000 kg materjali tootmise kohta.

Materjalivoog toote elutsükli jooksul

Materjalivoog on lisatud seale 3.47 ning on esitatud järgnevalt:



Kui hakata materjalivoogu hindama alates valmis korpusest lõpetades toormaterjali kaevandamisega, siis saab ülevaatliku pildi kui palju tootmistehnoloogia valik kasutatavate maavarade hulka mõjutab.

100 valmis korpust kaaluvad ekstrudeeritud profiili kasutades 6,7 kg. Sama kogus lehtalumiiniumist valmistatud korpuseid kaaluvad 8,6 kg. Siinkohal on näha võimalusi lehtalumiiniumist korpuste disaini optimeerimiseks, kuid üldpildi hindamist see olulisel määral ei mõjuta. Vaatluse all olevate korpuste valmistamiseks tuleb kujuvormitud alumiiniumi (alumiiniumleht, ekstrudeeritud profiil) kasutada esimesel juhul 7,2 kg ning teisel juhul 27,1 kg. See tähendab, et 18,5 kg alumiiniumi tuleb lõiketötluse meetodeid kasutades eemaldada. Seda on üle kahe korra rohkem kui valmistoodete ise kaalub. Seetõttu kasutatakse ka erinevaid toormaterjale märkimisväärselt rohkem. Lehtalumiiniumist 100 korpuse valmistamiseks tuleb kaevandada 117,2 kg boksiiti – seda on 3,8 korda rohkem kui ekstrudeeritud korpuse valmistamiseks kaevandada tuleks. Seega on korpusevalmistamise meetodite sobiliku valiku puhul võimalik kokku hoida märkimisväärne hulk maavarasid, sest ka teisi toormaterjale kulub ühel juhul ligi 4 korda rohkem. Alumiinium on küll peaaegu täielikult taaskasutatav, kuid inimtegevuse keskkonnamõjude parim kontrolli all hoidmise võimalus on ebavajaliku toormaterjali kasutamise vältimine.

Elutsükli lühiülevaade ja keskkonnamõjude indikaatorid

Järgnevalt on antud EMG signaalitöötlemise korpuse elutsükli lühiülevaade. Selguse huvides on antud loetelust välja jäetud transport erinevate etappide vahel (kuid on kaasatud analüüsi).

- **Tooralumiiniumi tootmine**

- **Boksiidi kaevandamine**

Boksiit on peamine alumiiniummaak, mida leidub enamasti ekvaatori lähistel. See koosneb peamiselt alumiiniumoksiidist ja alumiiniumhüdroksiidist. Boksiiti kaevandatakse avakaevandustes, mis peale maagi ammendumist enamasti pinnasega täidetakse.

- **Alumiiniumoksiidi tootmine**

Selles tootmisetapis töödeldakse boksiit puhtaks alumiiniumoksiidiks. Seda tehakse Bayeri protsessi abil. Alumiiniumoksiidi tootmine on keskkonda koormav kuna selle käigus tekib suurtes kogustes punast muda.

- **Elektrolüüsi läbiviimine**

Elektrolüüsi etapis töödeldakse alumiiniumoksiid Hall-Heroult protsessi kasutades puhtaks alumiiniumiks. See protsess nõuab palju elektrienergiat ning sageli on elektrolüüsiga tegelevate tehaste lähedal spetsiaalselt selle tehase tarbeks ehitatud elektrijaam. Antud töös käsitletakse ka elektrolüüsi läbiviimiseks vajaliku anoodmaterjali tootmise keskkonnamõjusid.

- **Alumiiniumi valamine**

Selles tootmisetapis valatakse alumiinium suurtesse kangidesse, mida saab edasisse töötlemisse transportida. Valukojas toimub ka kogutud vanaraua taaskasutamine ning alumiiniumile legerivate elementide lisamine.

- **Alumiiniumi vormimine**

Selles etapis vormitakse alumiiniumikang vastavalt korpuse valmistamismeetodile kas ekstrudeeritud alumiiniumprofiiliks või alumiiniumleheks. Mõlemad vormimisprotsessid toimuvad kuum-mahtvormimise teel.

- **Korpuse töötlemine**

Korpuse töötlemise maht sõltub valmistusmeetodist. Ekstrudeeritud profiili kasutades on vaja töödelda korpust minimaalselt, lehtmaterjali kasutamise puhul rohkem. Tööde mahukust saab kaudselt hinnata ka eemaldatava materjali hulga järgi, mida on materjalivoo alapeatükis täpsemalt kirjeldatud.

- **Lõpptoote koostamine**

Lõpptoote koostamise faasis komplekteeritakse trükkplaat ning paigutatakse see korpusesse. Kuna korpusega seotud koostamise osa võtab ainult sajandiku tervele koostamisele kuluvast ajast, siis seda siin täpsemalt ei analüüsita.

- **Toote kasutamine tarbija poolt**

Korpus on toote eluea jooksul passiivne ning otseselt keskkonda ei mõjuta. Kui hinnataks EMG signaali töötlusloki keskkonnamõju selle kasutusaja jooksul, siis tuleks arvesse võtta ka trükkplaadi toiteenergia saamisel tekkivat saastet.

- **Toote kogumine, materjalide sorteerimine ja taaskasutamine**

Toote elutsükli lõppfaasis on ette nähtud korpuste suunamine taaskasutusse kuna alumiiniumi taaskasutamine võimaldab kokku hoida märkimisväärsel hulgal elektrienergiat. Nimelt saab saata taaskasutatud alumiiniumi otse valukotta ümbertöötlemisse ning seeläbi toota osa uuest alumiiniumist ilma energiamahukat elektrolüüsi protsessi läbimata.

Korpuste keskkonnamõjusid hinnatakse tabelis 3.6 antud indikaatorite alusel.

Tabel 3.6 Analüüsi keskmes olevad keskkonnaindikaatorid

Keskkonnaindikaator	Lühend	Ühik	Lühiseletus
Elutu loodusressursi ammendamine	APD*	kg Sb ekvivalent	APD mõõdab elutute loodusressursside kasutamist, nt. vesi, fossiilkütused, õhk, pinnas jms.
Hapestumise potentsiaal	AP	kg SO ₂ ekvivalent	AP mõõdab gaaside NO _x ja SO ₂ atmosfääri paiskamist, mille ühinemisel õhuniiskusega tekib happevihm.
Eutrofeerumise potentsiaal	EP	kg fosfaadi ekvivalent	EP mõõdab looduskeskkonna toiteinete rikastumise potentsiaali. Eutrofeerumine põhjustab veekogude kinnikasvamist.
Globaalse soojenemise potentsiaal	GWP	kg CO ₂ ekvivalent	GWP mõõdab kasvuhoonegaaside atmosfääri paiskamist, mis põhjustavad globaalset soojenemist.
Osoonikihi kahanemise potentsiaal	ODP	kg R11 ekvivalent	ODP mõõdab ühendi CCl ₃ F atmosfääri paiskamist, mis põhjustab maakera pooluste kohal osooniaukude teket.
Sudu tekkimise potentsiaal	POCP	kg C ₂ H ₄ ekvivalent	POCP mõõdab fotoooksüdantide paiskamist atmosfääri, mis päikesekiirguse mõjul tekitavad troposfääris sudu.
Magevee kasutamine	FWC	m ³	FWC mõõdab magevee kasutamist, mille kasutamiseks ligikaudu 800 miljonil inimesel võimalust ei ole.

* Elutu loodusressursi ammendamise näitaja puhul hinnatakse igat ressursi olemasolevate varude ja ressursi ammendamise tempo põhjal. Andmete võrreldavuse tagamiseks kasutatakse referentsina keemilise elemendi nr. 51 (antimon) APD näitajat.

Ülalkirjeldatud korpuse elutsükli ning defineeritud keskkonnaindikaatorite põhjal antakse lisas 10 korpuse poolt põhjustatud keskkonnamõjusid kirjeldav tabel.

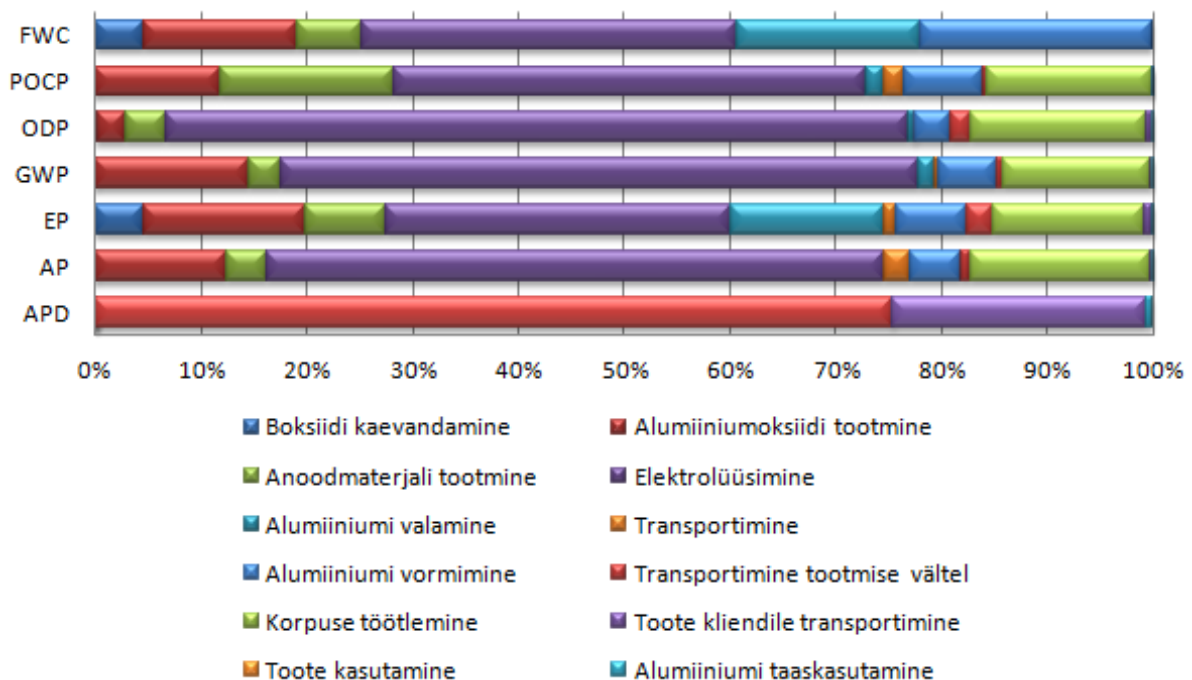
Korpuste keskkonnamõjude hindamise kokkuvõte ja analüüs

Järgnevalt hinnatakse keskkonnaindikaatorite alusel kahe erineva korpusetootmisemeetodi põhjustatavaid keskkonnamõjusid. Seda tehakse suhtelisel skaalal, mille abil saab hinnata iga elutsükli etapi panust toote poolt põhjustatavatele keskkonnamõjudele.

Alumiiniumlehest korpuse valmistamine

Alumiiniumlehest korpuse valmistamise keskkonnamõjud on näidatud seel 3.48.

Kõikide indikaatorite puhul peale APD on näha, et alumiiniumoksiidist alumiiniumi elektrolüüsimine põhjustab põhilise keskkonnamõjude komplekti. Nagu elutsükli kirjelduses mainitud, on elektrolüüsi protsess väga elektrienergiamahukas. Ühe tonni alumiiniumi saamiseks kulutatakse 14,9 MWh elektrienergiat []. Sama koguse elektrienergiat kulutavad 4100 keskmise elektritarbimisega kodumajapidamist (aluseks on võetud 300 kWh tarbimisega majapidamised).



Sele 3.45 Alumiiniumlehest valmistatavad korpuse keskkonnamõjude ülevaade

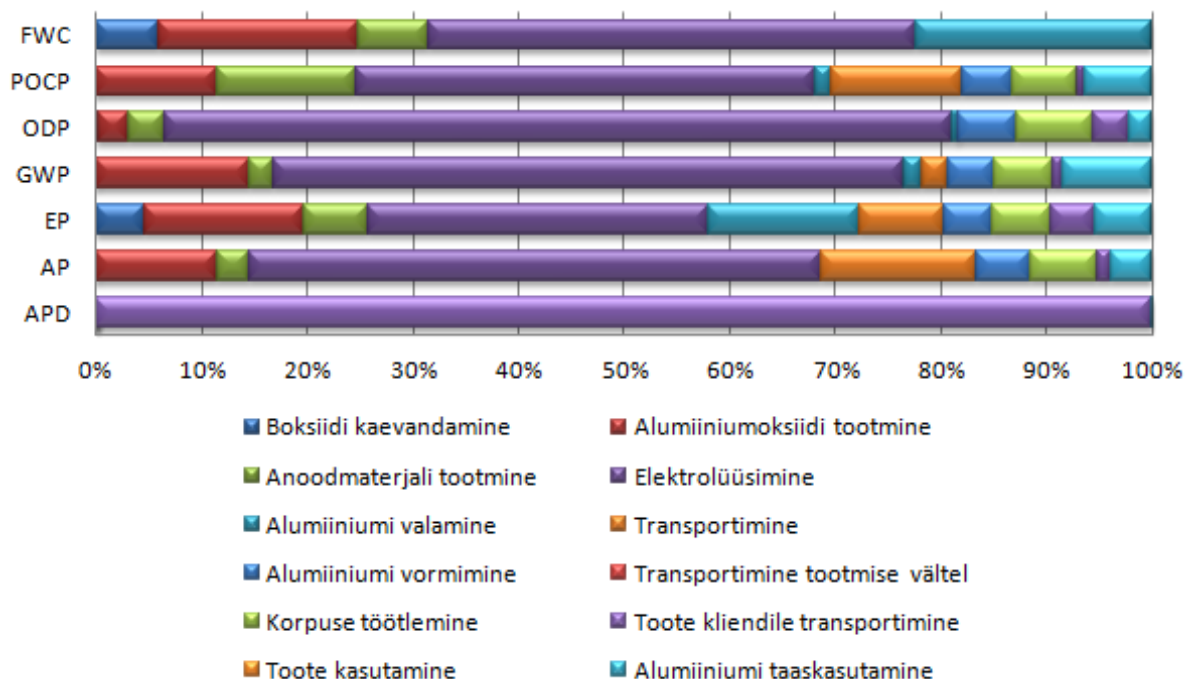
APD jaotused erinevad teistest etappidest märkimisväärselt. Suurima panuse selle keskkonnaindikaatori lõikes annab transportimine tootmise vältel, mille all mõeldakse erinevate firmade vahel korpuse (tooriku) transportimist. Keskkonnahinnangu aluseks on võetud transpordi maht 2,7 tkm (tonnkilomeetrit). Sellele järgneb samuti transport toote kliendini toimetamise näol, mis annab hinnanguliselt 25% APD kogusest. Mõlemal juhul on tegemist transpordiga mööda teed, mis on tonnkilomeetri kohta keskkonnale kõige koormavam.

Kõrged keskkonnakoormuse näitajad APD skaalal on maanteetranspordi puhul põhjendatavad mootorikütuse kasutamisega, mis on otseselt seotud nafta ammutamisega ehk elutu loodusressursi ammendamisega. Elektrienergiama huka elektrolüüsi puhul ei ole APD osakaal suur, sest andmed on antud Euroopa keskmise elektritootmise põhjal, kus on suur osa ka tuuma-, hüdro- ja tuuleenergiast.

Ekstrudeeritud alumiiniumprofili kasutamine

Ekstrudeeritud alumiiniumprofili kasutamise keskkonnamõjud on näidatud seel 3.49.

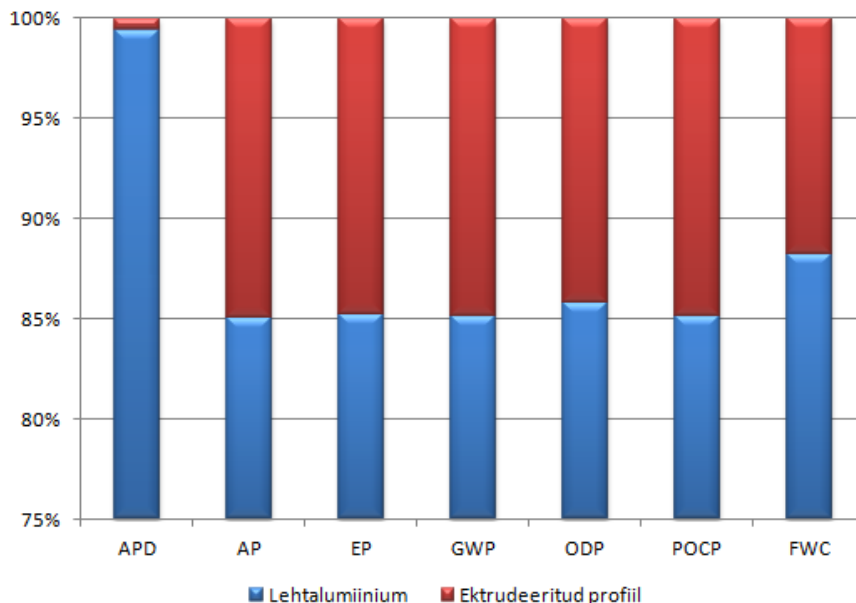
Ka selle variandi puhul domineerib elektrolüüsi poolt põhjustatud keskkonnamõju, kuid on näha, et väiksema alumiiniumikoguse ja korpuse lõpptöötlemise minimeerimise teel on saavutatud erinevate etappide vahel ühtlasem jaotus. APD on ka siinkohal omaette jaotusega kategooria, kus toote kliendile transportimine annab kogu selle kategooria keskkonnamõju.



Sele 3.46 Ekstrudeeritud korpuste keskkonnamõjude ülevaade

Korpuse valmistamismeetodite keskkonnanalüüs näitab, et lehtalumiiniumi kasutamine põhjustab suuremat keskkonnakoormust lisanduvate tootmisprotsesside, nendevahelise transpordi ning eelkõige märkimisväärselt suureneva toormaterjali vajaduse tõttu.

Meetodite graafiline võrdlus on antud seel 3.50. Sellelt on näha, et kui toodetakse 100 korpust lehtalumiiniumist ning 100 korpust ekstrudeeritud profiili kasutades, siis on summaarsetest keskkonnamõjudest ~88% põhjustatud lehtalumiiniumist toodetud korpustest.



Sele 3.47 Korpusevalmistamismeetodite keskkonnamõjude võrdlus

3.4.6 Analüüside kokkuvõte ja korpuse valik

Majanduslik analüüs näitas, et ekstrudeeritud korpuse valik on nii tarneahela juhtimise, paindlikkuse kui ka hinna poolest igas mõttes põhjendatud. Sama tulemuseni jõuti ka keskkonnanalüüsi tehes.

Valitud korpuseks osutus ekstrudeerimise meetodil saadud alumiiniumprofiil.

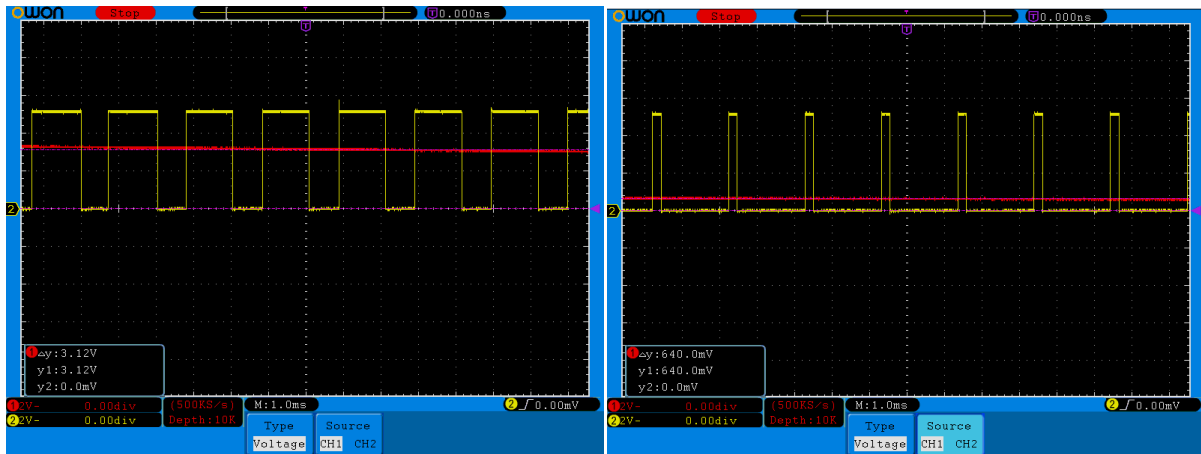
3.5 Signaalitöötlusploki digitaalväljundi realiseerimine

EMG signaalitöötlusplokk on kasutatav signaalitranslaatorina lihase ja analoog-digitaal konverteri vahel, mis võimaldab antud ploki kasutada mistahes signaali kuvamise ja analüüsimise seadmega, kuid signaalitöötlusploki sama tähtis väljund on ka selle digitaalväljund. See lihtsustab keskse protsessijuhtimise kontrolleri programmi ning võimaldab eraldiseisvalt ka signaalitöötluse ploki erinevate täiturite juhtimiseks kasutada.

Signaalitöötlusploki digitaalväljundit võib programmeerida täitma mistahes ülesannet, kuid põhiliste väljunditena nähakse ette diskreetset lülitust valitud signaali nivoost ning PWM väljundit. Valiku diskreetse lülituse või PWMi vahel saab teha süsteemi ülevaates näidatud

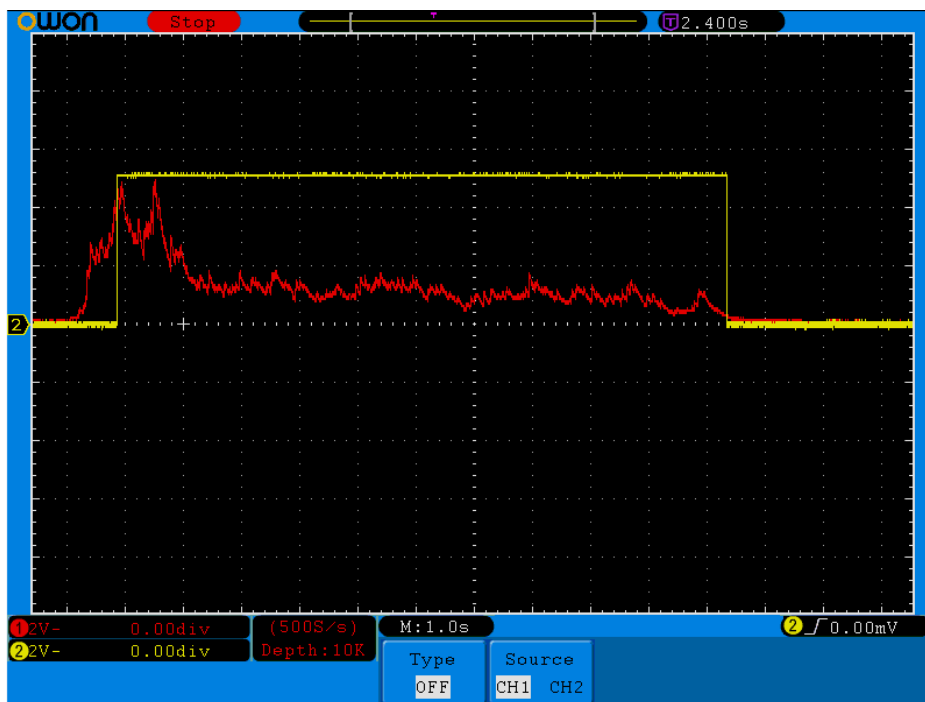
seadepotentsiomeetriga. Kui potentsiomeetri väljundis on pinge alla 0,4 V, siis on digitaalväljund kasutusel PWM väljundina. Kui potentsiomeetri väljundis on pinge üle 0,6 V, siis on väljund kasutusel diskreetse lülituse läbiviimiseks ning diskreetse lülituse nivoo on reguleeritav pinge edasise tõstmisega potentsiomeetri väljundis. Pingenivool 0,4 V...0,6 V on digitaalväljund madalal pingeniivool, et vältida üleminekupinge puhul tekkivaid ootamatuid ümberlülitusi.

Selel 3.51 on näha PWM signaali täituvus vastavalt lihaspingutuse nivoole.



Sele 3.48 PWM signaali täituvus vastavalt lihaspingutuse nivoole

Sele 3.52 näitab diskreetse väljundi lülitust 80 % lihaspingutuse täitumisel, misjärel on tänu süsteemi programmeeritud hüstereesile võimalik lihast lõdvemaks lasta. Kui soovitakse diskreetse väljundi nullnivoole lülitust, siis tuleb selleks lihas täitsa lõdvaks lasta.



Sele 3.49 Digitaalväljundi diskreetne lülitus koos hüstereesiga

4. HÄÄLESTAMISE ABISEADME PROJEKTEERIMINE

4.1 Lähteülesande paikapanemine

Peatükis 3 kirjeldatud EMG signaalitöötlusplokil on palju reguleerimisvõimalusi, mis tagavad optimaalse väljundsignaali nii analoog- kui ka digitaalväljundis. Laboritingimustes ei ole võimendi häälestamine probleem, sest vastav inventar on mitmekiire ostsilloskoobi näol olemas ning seetõttu on nii analoog- kui ka digitaalväljund on koos jälgitavad ja saadud tagasiside põhjal on võimalik teostada signaalitöötlusploki häälestamist. Kui lõpptarbijal tekib kodus vajadus võimendi tööd hinnata, vahetada mõõtmisteks kasutatavat lihast või teha korrekture vastavalt kasutatavatele elektroodidele, siis selle võimaluse loomiseks tuleb konstrueerida seade, mis võimaldab võimendi väljundeid graafiliselt kuvada.

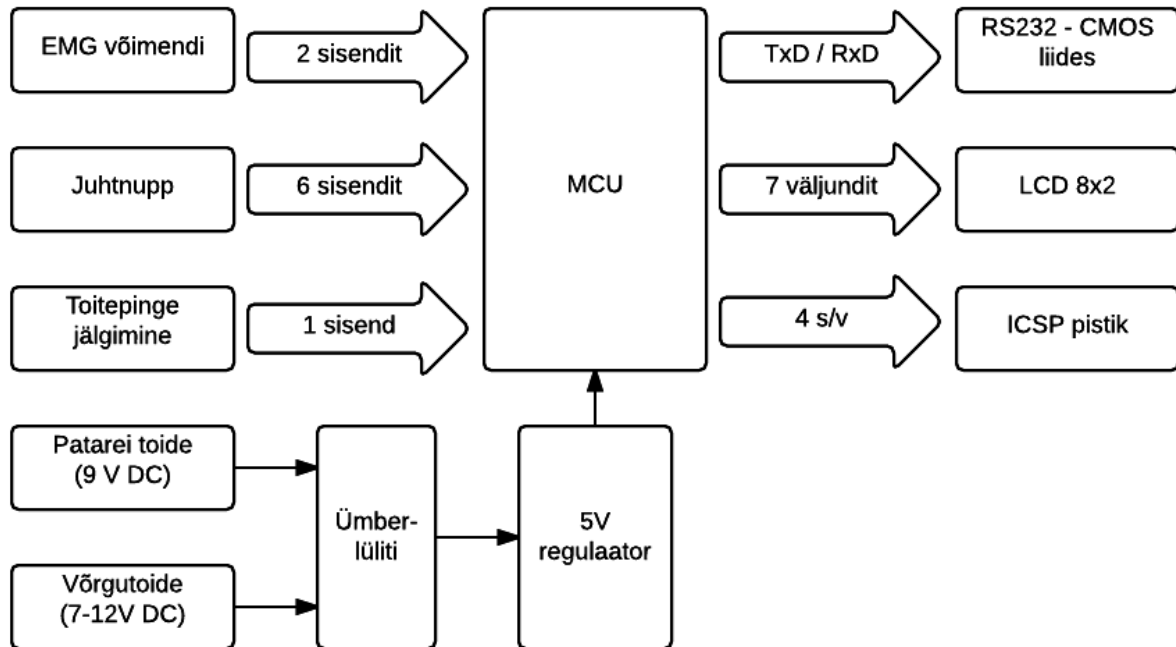
Järgnevalt tuuakse välja seadmele esitatavad nõuded:

- **Seade peab võimaldama signaalide kuvamist järgmiselt:**
 - **Sisseehitatud LCD ekraanilt**
Sisseehitatud LCD ekraan peab võimaldama signaali lihtsustatud graafilist kuvamist kui seadet on vaja kasutada kodust eemal.
 - **Arvutiekraanilt**
Seade peab olema liidestatav personaalarvutiga, et võimaldada ostsilloskoobile sarnasem kasutajakogemus ning sellevõrra täpsem reguleerimisvõimalus. See on kasulik ennekõike seadme esmasel kasutuselevõtul.
- **Seade peab olema mugavasti käes hoitav**
Seadmel peab olema ergonomiline korpus, seade peab olema piisavalt väike ja kerge, et seda mugavalt kaasas kanda saaks. Eelistatavalt peab seadme korpus olema tehtud plastmassist, et vähendada seadme kättevõtmisel külma ilmaga tekkivat ebamugavustunnet.
- **Seadme toide peab olema lülitatav autonoomse toite ja toiteploki vahel**
Kuna seadet kasutatakse ka kaasaskantavana, siis on oluline, et seadmel oleks autonoomse toite võimalus. Kui aga seadet kasutatakse statsionaarsena koos arvutiga, siis on patareide säästmise eesmärgil põhjendatud toiteploki kasutamine – seetõttu peab seadmel olema ka võrgutoite võimalus. Lõppkasutajal peab olema võimalus lülitada toidet nende kahe variandi vahel.
- **Seadme funktsioneerimine peab olema tagatud kuni -10 °C-ni.** Sellest madalamatel temperatuuridel tõenäoliselt signaalihäälestamist ei toimu.

4.2 Elektripõhimõtteskeemide koostamine ja testimine

4.2.1 Üldise põhimõtteskeemi koostamine

Järgnevalt tuuakse välja töötlusloki häälestusseadme plokk skeem (sele 4.1) ja selle koostamisel edasiseks tööks arvesse võetud kaalutlused.



Sele 4.1 Häälestusseadme plokk skeem

Mikrokontroller ja selle programmeerimine

Häälestusseadme südameks on MCU, mis vastavalt lähteülesandele peab olema võimeline nii seadmesse sisseehitatud LCD juhtimiseks kui ka arvutiga liidestamiseks. Mikrokontrollerit programmeeritakse läbi ICSP pistiku – see võimaldab peale skeemi valmimist lihtsat ja kiiret mikrokontrolleri programmeerimist. Samuti saab vajaduse korral tulevikus uuendada programmi ilma trükkplaati või sellel olevaid komponente seadmest eraldamata.

Mikrokontrolleri sisendid

Mikrokontrolleri sisenditeks on nii analoog- kui ka digitaalsignaali EMG võimendist (2 sisendit). Digitaalsignaali puhul jälgitakse, et kasutusele võetakse katkestust (*interrupt*) võimaldava MCU väljaviik – see võimaldab signaali täpsemat mõõtmist ja samuti on võimalik vähendada mikrokontrolleri koormust, sest signaali mõõtmisele vastavat programmi kutsutakse välja ainult siis kui signaal mikrokontrolleri sisendis muutub.

Samuti jälgib mikrokontroller skeemi toitepinget (1 sisend). See on eriti oluline kui skeemi kasutatakse autonoomse toitega – siis saab LCD ekraanil kuvada hoiatust, et patarei on tühjaks saamas ja kasutaja oskab planeerida edasist tegevust.

Kasutajaliidese loomiseks võetakse LCD kõrval kasutusele ka navigeerimist võimaldav juhtnupp. Sellega saab anda järgnevaid sisendeid: üles, alla, paremale, vasakule ja kinnitamine (nupuvajutus navigaatori nupuga). Sellise navigaatornupu suurim eelis on koos LCD ekraaniga saavutatav multifunktsionaalsus – nendega saab üles ehitada menüüpõhise navigeerimise. Projekteerimise faasis on seeläbi arvestatud ka võimaliku lisanduva (programmilise) funktsionaalsusega. Nupu optimaalseks mikrokontrolleriga kasutamiseks lisatakse viiele ülal loetletud sisendile veel sisend, mis on seotud kõikide nuppudega. See sisend võimaldab programmilise katkestuse kasutamist ja seeläbi kasutatakse mikrokontrolleri ressursi mõistlikumalt: nuppude sisendeid loetakse ainult siis kui üks nuppudest on vajutatud. Lisasisendi puudumise korral toimuks pidev nuppude oleku skaneerimine.

Andmeside häälestusseadme ja arvuti vahel

Häälestusseadme ja arvuti vahelise andmeside eesmärk on kuvada lõppkasutajale arvutiekraanil EMG signaali töötlusloki väljundeid. Kuna numbrijada arvutiekraanil ei oleks ülevaatlik, siis tuleb esitada need andmed graafilisel kujul. Lihtsaim moodus oleks selleks kasutada vabavaralist COM pordi ostsilloskoopi. Edasiste arenduste käigus võib kirjutada ka Visual Studio programmeerimiskeskonnas juba rakendusekeskse programmi. Ka sellisel juhul on jadaliidese kasutamine otstarbekas, sest Visual Studio pakub jadaliidese programmeerimiseks selle jaoks spetsialiseeritud tööriistade kogumit.

Programmide valik personaalarvutis määratleb ära, et mõistlik on kasutada jadaliidest (COM porti). Vanematel arvutitel on selle jaoks spetsiaalne pesa, mis on näidatud seel 4.2.



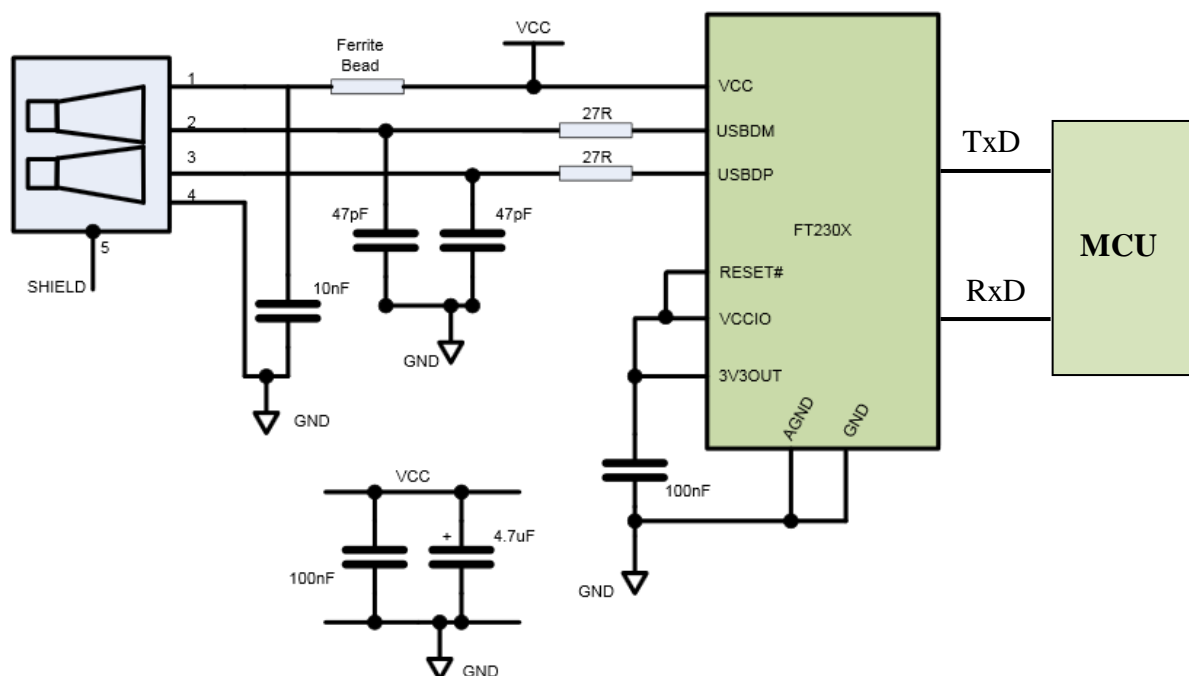
Sele 4.2 COM pordi pistik arvutipaneelil

Uuematel arvutitel enamasti sellist pesa ei ole ja seetõttu tuleb nende arvutite puhul kasutada virtuaalset COM porti. Sellisel juhul käib suhtlus häälestusseadme ja arvuti vahel tänapäeval levinud USB protokoll järgi. Ühenduskaablina saab kasutada tavalist USB kaablit – see on palju mugavam viis seadme ühendamiseks, sest kergema kaabliga on parem ümber käia ning kaablit saab jagada teiste seadmetega, mistõttu piisab mitme seadme peale ühest kaablist. Arvutisse tuleb USB kaabli kasutamise puhul installeerida virtuaalse COM pordi draiver. See

tõlgendab USB seadet COM pordina ning arvutis olev tarkvara saab suhelda USB seadmega justkui suhtleks standardse riistvaralise COM pordiga. Selliseid draivereid pakuvad USB-RS232 ja USB-UART signaalitraslaatorite tootjad, mistõttu on ühilduvus signaalitraslaatoriga garanteeritud ja ei kaasne lisavaeva draiveri otsimiseks.

Kõige odavam ja professionaalsem viis häälestusseadme ja arvuti liidestamiseks oleks kasutada USB2.0-UART signaalitraslaatorit. Sellise integraalskeemi rakendamisel saaks väheste lisakomponentide kasutamisega integreerida USB pordi otse trükkplaadile. Mikrokontroller suhtleks sellise ülesseade puhul FT230X signaalitraslaatoriga, mis toimib sillana MCU ja USB pordi vahel.

Kirjeldatud süsteemi elektripõhimõtteskeem on antud seel 4.3.



Sele 4.3 FT230X signaalitraslaatori rakenduskeem [20]

Sellise meetodi väikeseks puuduseks on riistvaralise COM pordi kasutusvõimaluse puudumine, kuid tänasel päeval ei ole see eriline probleem, sest kõik arvutid on varustatud USB portidega. Signaalitraslaatori FT230X kasutamise suureks plussiks on sellise lahenduse väike maksumus – traslaator FTDI FT230X maksab 1,92 €, millele lisandub üksikute väliste passiivkomponentide maksumus.

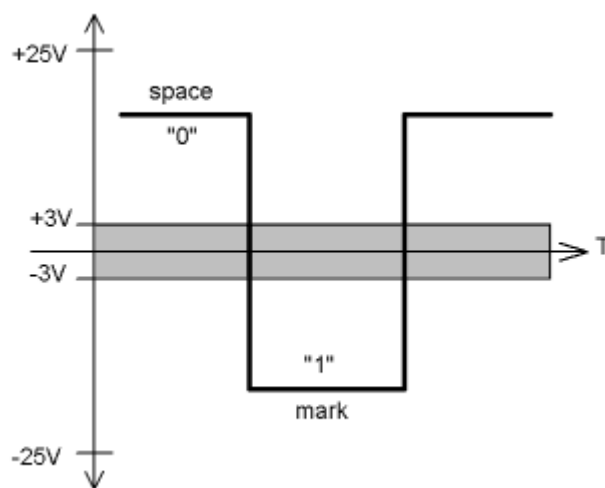
Antud signaalitraslaatori põhjalikumat käsitlemist selles töös ei tehta, sest USB-UART traslaatoreid on saada ainult pindmontaaž komponentidena, mis ei vasta töö sissejuhatuses püstitatud eemärkidele.

Andmesidelahenduste osas otsustati süsteemi ülesehituse kasuks, mis võimaldab kasutada vastavalt kliendi soovile kahte erinevat andmesidelahenduse ülesehitust. Järgnevalt on toodud mõlema süsteemi ülevaade.

Andmesidelahendus riistvaralise COM pordi kasutamise toega

Antud andmesidelahenduse puhul toimub esmalt mikrokontrolleri UART liidese signaalide konverteerimine MAX232 signaalitraslaatoris. Mikrokontrolleri UART liidese lubatud sisend- ja väljundpinged on võrdsed MCU toitepingega, mis enamusel juhtudel on 5 V või alla selle. Atmeli ATmega seeria mikrokontroleritel on loogiline „0“ defineeritud vahemikus -0,5 V kuni 0,3 V ja loogiline „1“ vahemikus 0,6 V kuni $V_{cc}+0,5$ V, kus V_{cc} tähistab toitepinget.

RS232 standard, mis kehtib ka personaalarvuti COM pordi kohta, töötab aga hoopis teistel pingeniivodel, millest annab ülevaate sele 4.4.



Sele 4.4 RS232 standardi pingeniivod [21]

RS232 standardi kohaselt on loogiline „0“ (*space*) defineeritud pingeniivoo vahemikus +3 V kuni + 25 V ja loogiline „1“ (*mark*) defineeritud vahemikus -3V kuni -25 V. Selline signaali ülesehitus teeb selle võrreldes CMOS või TTL pingeniivodel esitatava signaaliga palju häirekindlamaks.

MAX232 signaali konverterist läheb RS232 standardile vastav andmevoog DB9 pistikusse, mida tuntakse ka jadapordi pistikuna. Kuigi pistikus on kokku 9 viiku, siis kasutusel on nendest ainult kaks andmeedastusviiku ja maandus.

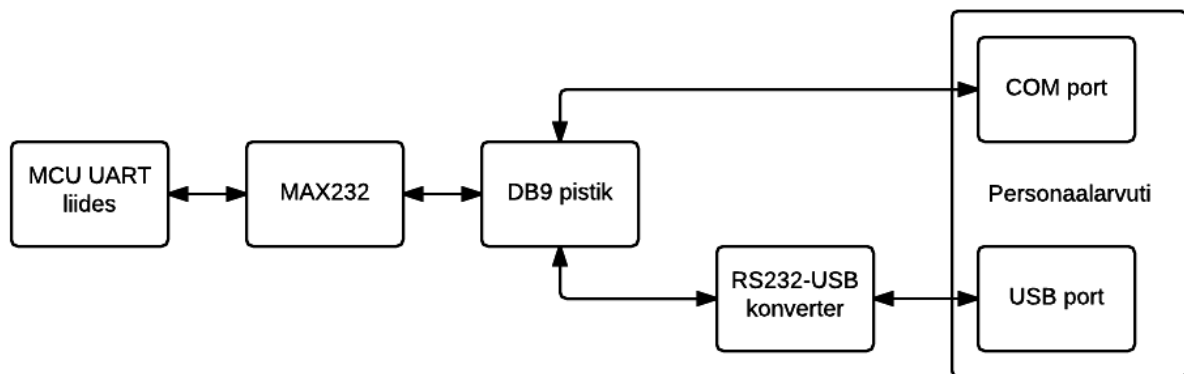
Siinkohal on vastavalt arvuti võimalustele võimalik valida, kas ühendus luuakse PC COM pordiga või USB pordiga. Kui ühendus luuakse COM pordiga, siis piisab ainult sobilikust kaablist ning ühendus häälestusseadme ja personaalarvuti vahel on loodud. See on ühenduse loomiseks ka kõige odavam variant, sest selline andmekaabel maksab sõltuvalt pesade konfiguratsioonist 4 € ümber.

Kui ühendus luuakse personaalarvuti USB pordiga, siis on selleks vaja RS232-USB konverterit, mis konverteerib signaali RS232 standardist USB andmevahetusstandardile ja vastupidi. Sellise konverteri ühenduspistikud on näidatud seel 4.5, millelt on välja jäetud juhtme osa, mida on saada erinevates pikkustes.



Sele 4.5 RS232-USB konverteri kaabli ühenduspistikud [22]

Ülal kirjeldatud andmesidelahendus on kokku võetud seel 4.6. Nagu jooniselt näha võib, siis on esimene pool skeemist (kuni DB9 pistikuni) mõlemal juhul sama. Seega sellise lahenduse maksumus varieerub vastavalt arvuti konfiguratsioonile – kui on vajalik lisaseadmena RS232-USB konverteri kasutamine, siis on ka maksumus kõrgem.



Sele 4.6 Andmesidelahenduse kokkuvõte

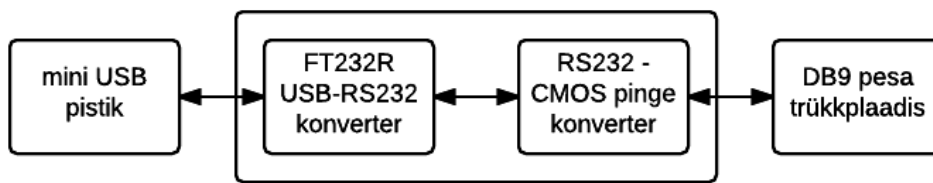
Andmesidelahendus ilma riistvaralise COM pordi kasutamise toeta

Selle lahenduse kesksel kohal on FTDI poolt pakutav USB-DB9 konverter, mis on näidatud seel 4.7. See sobib ilma trükkplaati modifitseerimata standardse DB9 pesa asemele ning pakub seeläbi võimalust lihtsalt andmesidelahendust moderniseerida.



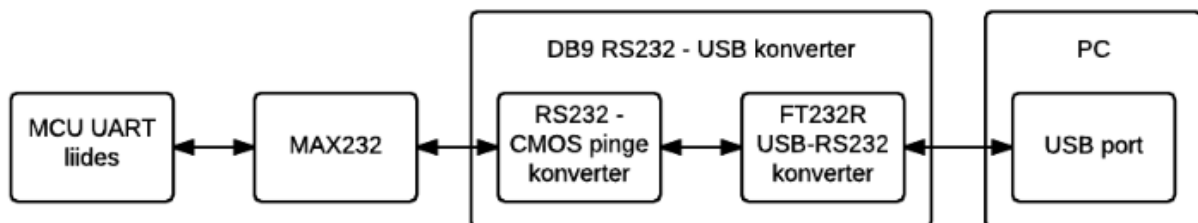
Sele 4.7 Trükkplaadile joodetav USB-DB9 konverter [23]

Selle konverteri plokkdiagramm on antud seel 4.8. Konverteris toimub nii signaali protokollide kui ka pingeniivode konverteerimine.



Sele 4.8 USB-DB9 konverteri plokkdiagramm [23]

Ülevaade ilma riistvaralise COM pordi toeta andmesidelahendusest on antud seel 4.9. Mikrokontrolleri UART liidesest läheb signaal ka selle konfiguratsiooni korral nivooide sobitamiseks MAX232 integraalskeemi. Sealt läheb signaal edasi DB9 pesa, kuhu on paigutatud seel 4.7 näidatud konverter. Ühendus konverteri ja personaalarvuti vahel on loodud USB kaablit kasutades.



Sele 4.9 Andmesidelahenduse plokk skeem

Kui analüüsida seel 4.9 antud plokk skeemi, siis on näha kahekordne pinge konverteerimine CMOS-RS232-CMOS kujul. Taoline konverteerimine on ebapraktiline, kuid prototüüpseeria valmistamisel tuleb selline kompromiss teha.

Andmesidelahenduste maksumuse hinnang

Vajalikud komponendid ja nende maksumus on antud tabelis 4.1. Kuna mikrokontroller ja MAX232 integraalskeem on kõikides tabelis loetletud lahenduste puhul kasutuses, siis jäetakse nende maksumus tabelis arvestamata (tabel on mõeldud ennekõike signaalitraslaatorite hinnavõrdluseks).

Kui kasutada andmesidelahendusena RS232 standardile vastavat jadaliidest, siis on süsteemi maksumuseks 5,3 €. Selline lahendus on suhteliselt odav, aga seab spetsiifilised piirangud arvuti nõuetele (COM pordi olemasolu). Kuna antud rakendust kasutades ei ole ühtegi täiendavat draiverit vaja installeerida, siis on see lõppkasutaja jaoks kõige lihtsam lahendusvariant.

USB lahendustest on odavam kaabliga integreeritud signaalitraslaatori kasutamine. Selline lahendus eeldab, et EMG signaali töötlusloki häälestuskeemil oleks jadaliidesele omane DB9 pesa. Samuti on vaja installeerida arvutisse virtuaalse COM pordi draiver, mis on ühekordne tegevus ning hilisemalt käib kaabel-signaalitraslaatori kasutamine ilma täiendavate tegevusteta (*plug-n-play*).

Kallim USB lahendus sisaldab endas trükkplaadile joodetavat DB9-USB konverterit ja mini USB-USB kaablit. Kuna sellise lahenduse hind on märkimisväärselt kõrgem, aga ei nõua trükkplaadi modifitseerimist, siis saab sellist lahendust esitleda kliendile valikulise lisana, mis ühelt poolt moderniseerib toodet ja teisest küljest tõstab hinda.

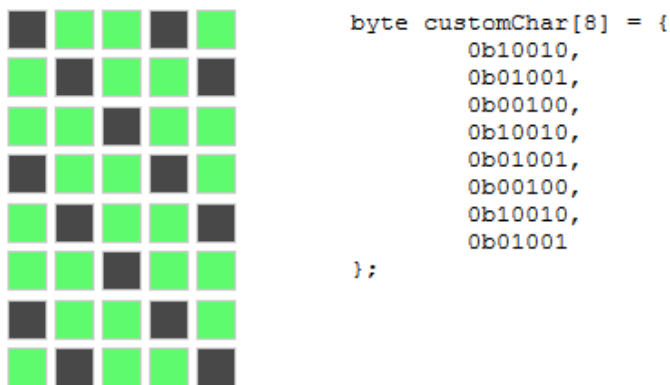
Tabel 4.1. Andmesidelahenduste maksumuse võrdlus

Andmesidelahendus		Pistik trükkplaadil	Signaali traslaator	Kaabel	KOKKU
Andmesidelahendus riistvaralise COM pordi kasutamise toega	COM	DB9 pistik (1,28 €)	-	Datakaabel DB9M/M (4 €)	5,28 €
	USB	DB9 pistik (1,28 €)	USB A-RS232 konverter (12 €)	-	13,28 €
Andmesidelahendus ilma riistvaralise COM pordi kasutamise toeta	COM	-	-	-	-
	USB	-	FTDI DB9-USB konverter (18,03 €)	USB-USB mini kaabel (3,5 €)	21,53 €

Kokkuvõttena saab öelda, et mõistliku kompromissina tuleb skeemile paigutada MAX232 signaalitraslaator ning jadaliidese pesa.

LCD ekraan

Kasutusele võetakse Hitachi HD44780 kontrolleriiga varustatud või selle kontrolleri-standardiga ühilduv LCD ekraan. See tagab võimaluse kasutada prototüübi katsetamise faasis kiiremaks programmeerimiseks Arduino LCD ekraani teeki. Mõistlikuks ekraani suuruseks on 8x2 tähemärki, kusjuures iga tähemärgi resolutsioon on 5x8 pikslit. Ekraan võimaldab kuvada standardseid tähti ja numbreid kuid saab kasutada ka sümboliredaktorit, et koostada konkreetseks rakenduseks sobilikud sümbolid. Ülevaade sümboliredaktorist, kus on koostatud viirutatud ala kirjeldav sümbol, antakse seel 4.10. Redaktori väljundiks on andmemassiiv, mida saab põhiprogrammi lülitada.



Sele 4.10 LCD ekraani sümboliredaktori ülevaade [24]

Toide

Toiteskeemi koostamise peamine kriteerium on lähteülesandes kirjeldatud järgnevalt: peab olema võimalus valida autonoomse patareitoite ja võrgutoite vahel. Seda on võimalik teha nii mehaanilise lülitiga kui ka integraalskeemiga.

Kuna tegemist ei ole seadmega, mis kogu aeg võrgus on ja ootamatu volukatkestuse korral vajab hetkelist autonoomse toite peale lülimist, vaid seadet kasutatakse üsna harva ja lühiajaliselt, siis ei ole keerulise toitejuhtimisskeemi lisamine põhjendatud – seda esmalt just lisanduva maksumuse tõttu.

Seetõttu võetakse kasutusele mehaaniline lüliti, millega saab valida patarei- ja võrgutoite vahel. Samuti on sellel lülitel ka keskmine asend, mille kasutamisel ei ole skeemi ühendatud mitte kumbki toiteallikas ning seeläbi on skeem välja lülitatud.

Kogu häälestaja toide läbib 5 V regulaatori, st. skeemi komponentide toitepingeks on 5 V.

4.2.2 Osaskeemide koostamine ja analüüs

Järgnevalt antakse osaskeemide kaupa detailne ülevaade komponentide valikust, skeemide koostamisest ja skeemi poolt täidetavatest ülesannetest.

Mikrokontroller

Lähteülesande nõuded ja üldises põhimõtteskeemis välja toodud sisendid-väljundid tegid mikrokontrolleri valiku üsna konkreetseks. Järgnevalt on välja toodud mikrokontrolleri valiku kriteeriumid:

- Mikrokontroller peab olema sobilik läbivaukmontaažiks, eelistatud korpuse tüüp on DIP (*DualInlinePackage*), mis võimaldab kontrolleri lihtsat skeemile montaaži.
- Mikrokontrolleri toitepinge peab olema 5 V. Kuna mikrokontrolleri valikul peab toiteskeemi minimeerimise eesmärgil arvestama ka teiste trükkplaadile paigutatavate komponentidega, siis on mõistlik valida toitepingeks läbivaukmontaaži integraalskeemidel standardiks saanud pinge.
- Mikrokontrolleril peab olema arvutiga liidestamiseks U(S)ART valmidus. See võimaldab kasutusele võtta punktis 4.2.1 välja toodud andmesidelahenduse.
- Mikrokontrolleril peab olema ICSP programmeerimise võimalus, mis eeldab SPI olemasolu. SPI on sünkroonne jadaliides, mida kasutatakse lühimaa andmesides, eelkõige ühe seadme piires.
- Mikrokontrolleril peab olema vähemalt 2 kanali ADC, mida kasutatakse EMG võimendi väljundi lugemiseks ja toitepinge jälgimiseks. Kuna tegemist on ühelt poolt ka mõõteseadmega, siis peab ADC resolutsioon olema piisav – kasutataval mikrokontrolleril peab olema vähemalt 10-bitine ADC .
- Mikrokontrolleril peab olema vähemalt 13 digitaalset sisendit-väljundit, mis on vajalikud nii juhtnupu olekute lugemiseks kui ka LCD ekraani juhtimiseks.
- Mikrokontroller peaks olema Atmeli toodang AVR mikrokontrollerite perekonnast. See ei ole küll absoluutselt jäik nõue, kuid kuna töö autoril on enamasti kogemus just Atmeli mikrokontrolleritega, siis see lihtsustab tööd. Väiksema püsivõimsusega AVR mikrokontrollerid on programmeeritavad „AVR Pocket programmer“-iga, mida on kirjeldatud ka EMG signaalitöötlusploki mikrokontrolleri valimisel.

Järgnevalt tehakse ülalootletud kriteeriumite põhjal mikrokontrolleri valik. Valiku tegemist lihtsustab kõiki neid tingimusi sisaldav Farnelli tootekataloogi filtreerimissüsteem

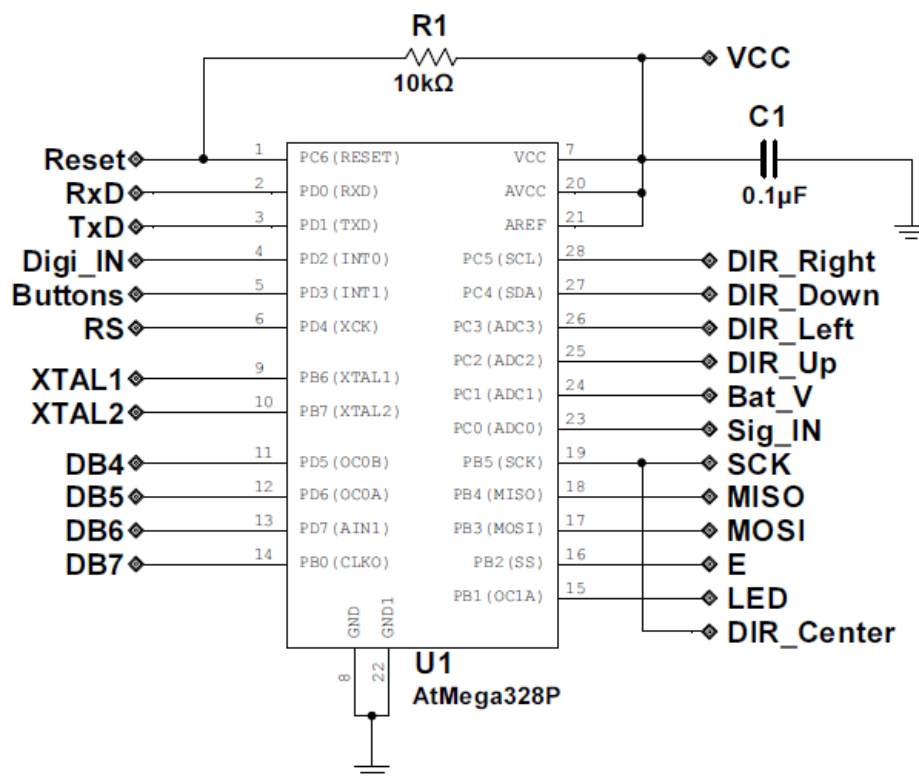
Peale mikrokontrollerite parameetrite alusel filtreerimise läbiviimist on valikus 2 mikrokontrollerit, mille põhiparameetrid on välja toodud tabelis 4.2.

Tabel 4.2 Mikrokontrollerite põhiparameetrite võrdlus

MCU	Mikrokontrolleri parameetrid					MCU hind
	Andmeside liidesed	Sisendeid-väljundeid	Väljaviike kokku	Programmi-mälu maht	Toitepinge (min-max)	
ATmega 162 [25]	SPI, UART	35	40	16 kB	2,7V 5,5 V	7,24 €
ATmega 328 [26]	I2C, SPI, UART	23	28	32 kB	1,8 V 5,5 V	2,58 €

ATmega162 omab antud rakenduse jaoks liialt palju väljaviike – see tähendab, et mikrokontroller võtab trükkplaadil põhjendamatult palju ruumi. Samuti on oluliseks kriteeriumiks programmimälu maht, mis on ATmega328 kontrollerial suurem. Ennekõike on programmimälu tähtis LCD ekraanil sümboliredaktoriga tehtud sümbolite salvestamiseks. Kuna mikrokontrolleritel on ka märkimisväärne hinnavahe, siis osutub valituks ATmega 328 MCU.

ATmega 328 mikrokontrolleril realiseeritud elektriskeem on näidatud seel 4.11. Takisti R1 on vajalik väljaviigu „reset“ kõrgel pingeniivol hoidmiseks – see tagab, et kontrolleri pin 1 on viidud madalale niivole ainult programmeerimise ajal. Kondensaator C1 on toitepinges olevate pingepiikide silumiseks, mis võivad MCU tööd häirida.



Sele 4.11 Mikrokontrolleri ATmega 328 kasutus häälestusseadmes

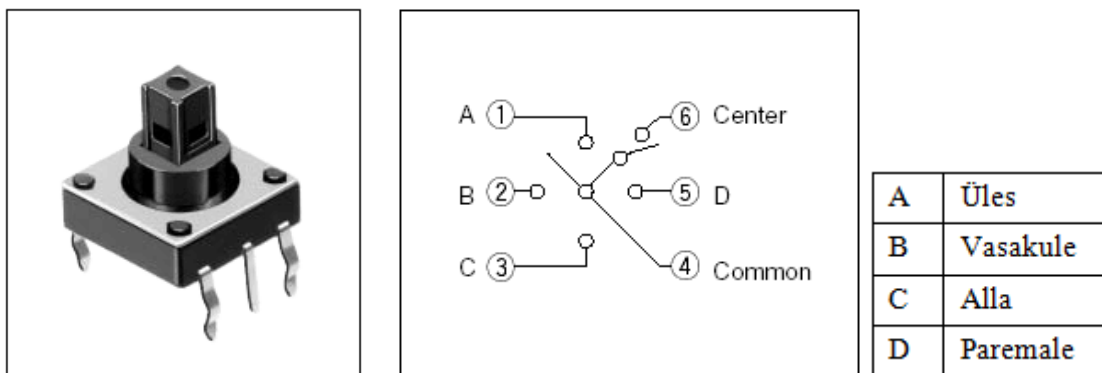
Detailne ülevaade mikrokontrolleri väljaviikude funktsioonidest ja nendele omistatud ülesannetest signaalialanalüsaatori elektriskeemis on antud tabelis 4.3.

Tabel 4.3 Mikrokontrolleri väljaviikudele omistatud ülesanded

Pin-i nr.	Pin-i funktsioon	Pin-i kasutus skeemis	Pin-i kasutuse selgitus
1	Reset	Reset	Mikrokontrolleri programmeerimisrežiimi viimine
2	PD0 (RxD)	RxD	USART liidese andmete vastuvõtmise <i>pin</i>
3	PD1 (TxD)	TxD	USART liidese andmete saatmise <i>pin</i>
4	PD2 (INT0)	Digi_IN	EMG digitaliseeritud signaali sisend
5	PD3 (INT1)	Buttons	Nuppude oleku indikaatorsisend
6	PD4 (XCK)	RS	LCD <i>RegisterSelect</i> kontroll-liin
7	Vcc	Vcc	Mikrokontrolleri toitepinge
8	GND	GND	Mikrokontroller maandus
9	XTAL1	XTAL1	MCU välise taktsagedusgeneraatori väljaviik
10	XTAL2	XTAL2	MCU välise taktsagedusgeneraatori väljaviik
11	PD5 (OC0B)	DB4	LCD andmesiini 4. liin (<i>DataBus 4</i>)
12	PD6 (OC0A)	DB5	LCD andmesiini 5. liin (<i>DataBus 5</i>)
13	PD7 (AIN1)	DB6	LCD andmesiini 6. liin (<i>DataBus 6</i>)
14	PB0 (CLK0)	DB7	LCD andmesiini 7. liin (<i>DataBus 7</i>)
15	PB1 (OC1A)	LED	LCD ekraani taustvalgustuse juhtimine
16	PB2 (SS)	E	LCD <i>Enable</i> kontroll-liin
17	PB3 (MOSI)	MOSI	MCU programmeerimisel kasutatav andmeliin (<i>MasterOutSlaveIn</i>)
18	PB4 (MISO)	MISO	MCU programmeerimisel kasutatav andmeliin (<i>MasterInSlaveOut</i>)
19	PB5 (SCK)	SCK; DIR_Center	MCU programmeerimisel kasutatav andmeliin (<i>SerialClock</i>), juhtnupu kasutus: valiku kinnitamine
20	AVcc	AVcc	Analoog-digitaal konverteri toide
21	Aref	Aref	Analoog-digitaal konverteri pingereferents konverteri resolutsiooni jagamiseks
22	GND	GND	Mikrokontrolleri maandus
23	PC0 (ADC0)	Sig_IN	Töödeldud EMG signaali analoogsisend
24	PC1 (ADC1)	Bat_V	Toitepinge mõõtmine pingeregulaatori sisendil
25	PC2 (ADC2)	DIR_Up	Juhtnupu kasutus: suund - üles
26	PC3 (ADC3)	DIR_Left	Juhtnupu kasutus: suund - vasakule
27	PC4 (SDA)	DIR_Down	Juhtnupu kasutus: suund - alla
28	PC5 (SCL)	DIR_Right	Juhtnupu kasutus: suund - paremale

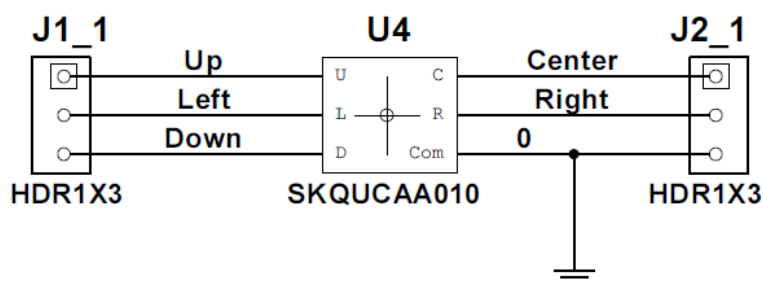
Juhtnupu sisendid ja nende olekuindikaator

Juhtnupuks osutus valituks navigatsiooninupp, mis võimaldab neljas suunas navigeerimist ja valiku kinnitamist nupuvajutusega. Juhtnupu valiku tegemise põhimõte on lahti seletatud punktis 4.2.1. Navigatsiooninupu isomeetiline vaade ja tööpõhimõte on antud seel 4.12. Tööpõhimõtet kirjeldaval seel olevate tähtede vasted on antud kõrvalasuvas tabelis. Kui nupuga valitakse mistahes suund (väljaviigid 1,2,3,5,6), siis nupu vajutusel ühendatakse vastav väljaviik ühise väljaviiguga (4). Selline tööpõhimõte on lihtsasti kasutatav mikrokontrolleriga rakendustes, kus mikrokontrolleri sisendit hoitakse kas sisemise või välimise *pull-up* takistiga kõrgel nivool ja nupuvajutuse peale jookseb mikrokontrolleri sisendist vool läbi nupu maandusesse (GND). Sellega viiakse mikrokontrolleri sisend madalale nivoole, mida saab registreerida nupuvajutusena.



Sele 4.12 Navigaatornupu ülevaade ning tööpõhimõtteskeem [27]

Kuna nupp on fikseeritud kõrgusega ning antud rakenduse puhul ei oleks nupu otse trükkplaadile jootmise puhul juhtnupu kõrgus korpuse suhtes õige, siis tuleb kasutusele võtta lisatrükkplaat, mis on sobilike distantspuksidega sobilikule kõrgusele tõstetav. Sellise trükkplaadi skeem on antud seel 4.13. Juhtnupu väljaviigid on ühendatud 2,54 mm jalavahega piikribadega, mistõttu on võimalik kasutada standardse 2,54 mm jalavahega pistikute seeriat. Pistikud J1_1 ja J2_1 on elektriliselt ühendatud seel X esitatavate pistikutega J1 ja J2, mis võimaldab signaale kanda lisatrükkplaadilt põhitrükkplaadile.



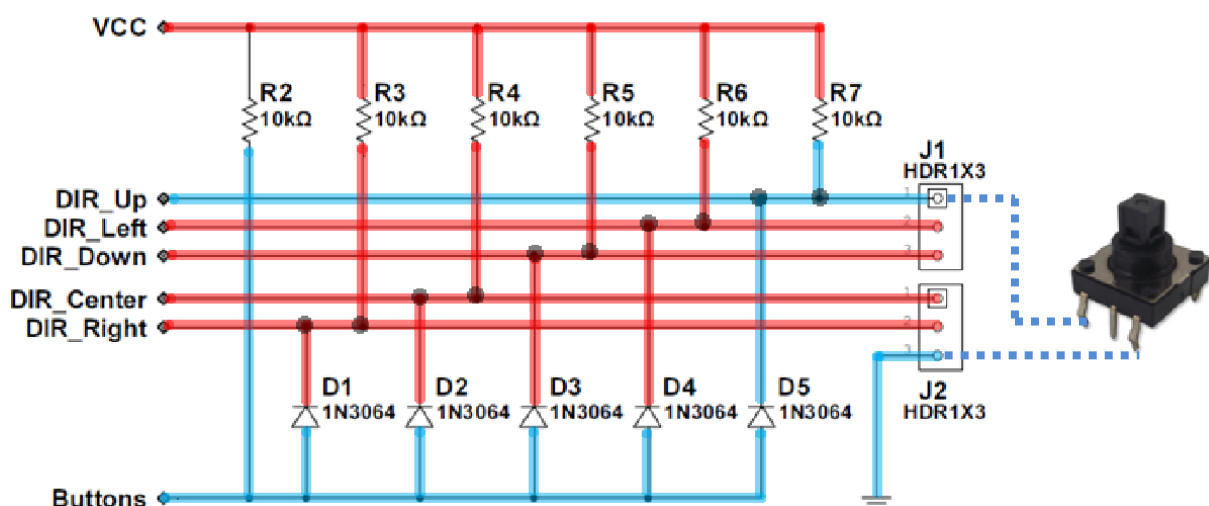
Sele 4.13 Navigaatori lisatrükkplaadi põhimõtteskeem

Järgnevalt antakse ülevaade juhtnupu kasutamise indikaatorsisendi tööpõhimõttest.

Kõik mikrokontrolleri sisenditesse minevad viigud on varustatud vastavate viidetega (*DIR_Up*, *DIR_Left*, *DIR_Down*, *DIR_Center*, *DIR_Right*, *Buttons*). Samuti on kõik eelpool nimetatud viigud *pull-up* takistitega kõrgele nivoole viidud. Kui toimub nupuvajutus (selel 4.14 toodud näite kohaselt vajutatakse nuppu üles suunas ja läbi nupu ühendatakse *DIR_Up* maandusega), siis diodi D5 katoodil langeb pinge 0 V-ni. Kuna viik „*buttons*“ on läbi takisti R2 viidud kõrgele pingeniivoole, siis tekib olukord, kus D5 anoodil on pinge kõrgemal nivool kui sama diodi katoodil ning diod tüürib viigu „*buttons*“ nullnivoole ehk ühendab maandusega.

Kuna juhtnupu ülejäänud suunad on läbi *pull-up* takistite viidud endiselt kõrgele nivoole, siis on diodide D1-D4 katoodidel pinge 5 V lähedal ja anoodidel on pinge 0 V – see tähendab, et diodid ei juhi ning ülejäänud viigud jäävad kõrgele nivoole.

Selle skeemi tulemusena läheb MCU väljaviik „*buttons*“ mistahes nupuvajutuse peale madalale nivoole. See võimaldab kasutada ISRi (*interrupt service routine*) – spetsiaalset funktsiooni, mis kutsutakse mikrokontrolleri programmis välja kui toimub väliselt juhitud katkestus (*interrupt*). Antud skeemi puhul saab väliseks katkestuseks defineerida langeva fronti esinemise viigul „*buttons*“ – see toimub kui vajutatakse mistahes nuppu ja selel 4.14 antud skeem tüürib antud viigu madalale nivoole. Katkestuse esinemisel skaneeritakse läbi kõik nuppudele omistatud viigud ning tuvastatakse millist nuppu kasutaja vajutas.



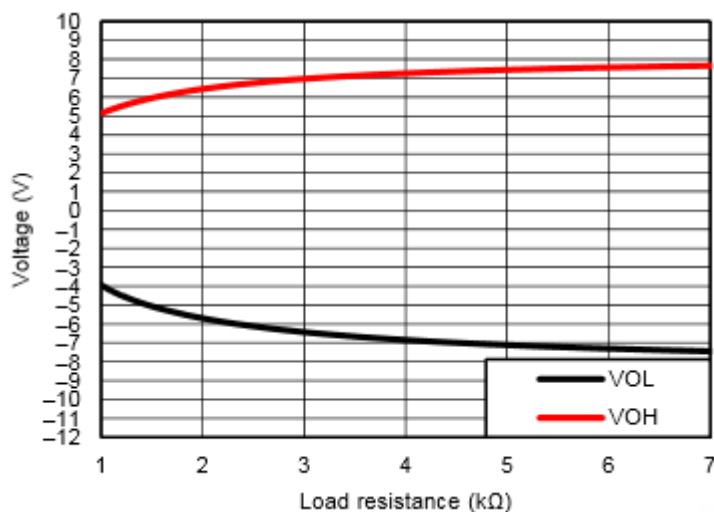
Sele 4.14 Nuppude lisaviigu tööpõhimõtte selgitus

Skeemil olevad diodid on valitud nii, et nende vastupinge taluvus ($V_{rrm\ max}$) oleks vähemalt 6V ning pärisuuna voolutugevus (I_f) vähemalt 40 mA, mis on mikrokontrolleri digitaalviigu teoreetiline maksimaalne voolutugevus, milleni antud rakenduses kindlasti ei jõuta.

MAX232 signaalitraslaator

MAX232 on signaalitraslaator, millega on võimalik kahe infokanali signaalide konverteerimine RS232 ja CMOS/TTL pingeniivode vahel. Pingeniivode nihutamine toimub väliste kondensaatorite abil, millega tehakse unipolaarsest 5 V toitest RS232 standardile vastavad pingeniivod. Nende pingeniivode tase sõltub välisest koormusest ning see sõltuvus on näidatud seel 4.15, kus *voltage* tähistab pingeniivod ja *load resistance* tähistab integraalskeemi väljundisse ühendatud skeemi poolt tekitatavat koormust.

Graafikul esitatav pingeniivoo V_{OH} tähistab loogilist „0“-i ja V_{OL} tähistab loogilist „1“-e. RS232 sisenditele rakendatav maksimaalne pinge on ± 30 V. []

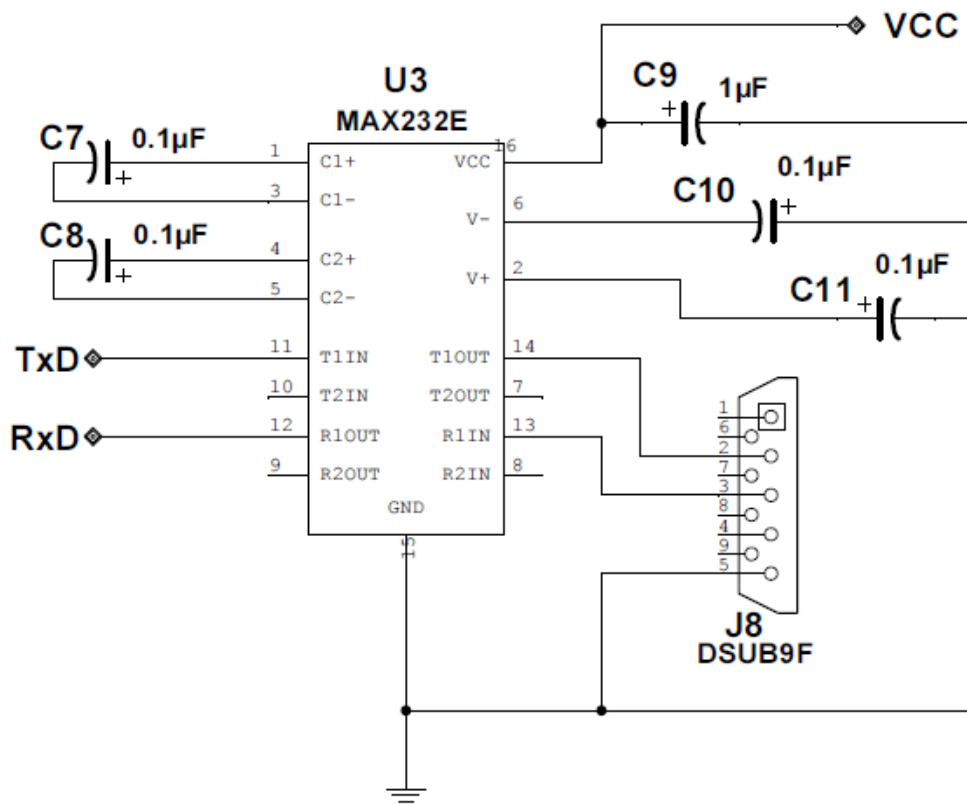


Sele 4.15 MAX232 translaatori poolt tekitatavad pinged RS232 standardiga ühildumiseks [28]

MAX232 integraalskeem eeldab väliste lisakomponentidena nelja kondensaatorit, mis on seel 4.16 tähistatud C7, C8, C10, C11. Tootja poolt soovitatud kondensaatori mahutavused on 0,1 μ F või 1 μ F. Valituks osutusid 0,1 μ F, sest trükkpaadi disainimisel ilmnenu asjaoludel, mida on pikemalt käsitletud peatükis 4.3, on mõistlik kasutada väiksema mahutavusega kondensaatoreid, kuna nende laadimisaeg on lühem. Antud rakenduses võib kasutada polariseerimata keraamilisi kondensaatoreid kui ka polariseeritud tantaal- ja elektrolüüt-kondensaatoreid, kuigi soovitatav on kasutada kas tantaal- või keraamilisi kondensaatoreid. Selle põhjuseks on ilmselt elektrolüüt-kondensaatorite piiratud eluiga.

Antud integraalskeemi voolutarve ei ole suur (kuni 10 mA), kuid kuna signaalide konverteerimisel tarbib integraalskeem voolu järsku, siis on mõistlik lisada toitepinge silumiseks kondensaator C9, mis on suurusjärgu võrra suurem võrreldes teiste vajalike kondensaatoritega, mida läbi kondensaatori C9 laetakse.

Mõistlik on valida kondensatoritele rakendatavaks lubatavaks pingeks vähemalt 30V, kuna skeemis sellest kõrgemaks pinget ei lähe.



Sele 4.16 MAX232 signaalitraslaator koos väliste abikomponentidega

Selel 4.16 näidatud komponent J8 on jadapordi datakaablitega ühilduv DB9 pistik, mille väljaviigud on lahti seletatud tabelis 4.4. Enamuste kontaktide kasutamiseks ei ole vajadust ning seetõttu on maanduse kõrval kasutusel ainult *receive data*, mis on ühendatud MAX232 väljaviiguga 14 ning *transmit data*, mis on ühendatud MAX 232 väljaviiguga 13.

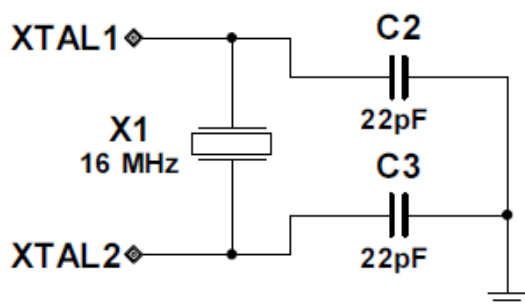
Tabel 4.4 DB9 pistiku väljaviigud ning nende kasutamine

Pistiku pin-i nr.	Funktsioon	Kasutusala antud rakenduses
1	<i>Data Carrier Detect</i>	-
2	<i>Receive Data</i>	Andmete vastuvõtmine PC-st
3	<i>Transmit Data</i>	Andmete saatmine PC-sse
4	<i>Data Terminal Ready</i>	-
5	<i>Signal Ground</i>	Maandus
6	<i>Data Set Ready</i>	-
7	<i>Request to Send</i>	-
8	<i>Clear to Send</i>	-
9	<i>Ring Indicator</i>	-

Mikrokontrolleri väline ostsillaator

Väline ostsillaator on vajalik mikrokontrolleri erinevatele osadele taktsageduse andmiseks. Selle eest kannab hoolt *AVR Clock Control Unit*, mis väljastab taktsageduse nii protsessorile kui ka teisele mikrokontrolleri osadele. Ostsillaatori elektriskeem on koostatud vastavalt tootja soovitudele: kasutada võib nii kvartskristalli kui ka keraamilist resonaatorit, kondensaatorid C2 ja C3 peavad olema võrdse mahtuvusega, mis 16 MHz taktsageduse puhul jääb vahemikku 12-22 pF. Viigud XTAL1 ja XTAL2 on ühendatud vastavate MCU väljaviikudega. Koostatud elektriskeem on näidatud seel 4.17.

Sageduse valikul oli esmaseks kriteeriumiks ühilduvus erinevate programmiliste teekidega, mis on enamasti kirjutatud 16 MHz taktsagedusega mikrokontrollerile.

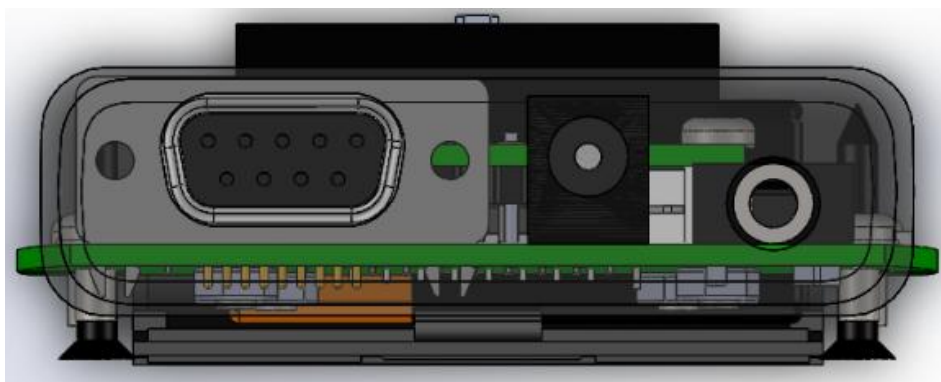


Sele 4.17 Ostsillaatori skeemi ühendamine

3,5 mm pesa (signaalide sisend EMG signaali töötlusploki)

Antud pesa ühendusviis kopeerib EMG signaali töötlusploki olevat ühendusviisi, et tagada signaalide korrektne liikumine ühest ploki teise.

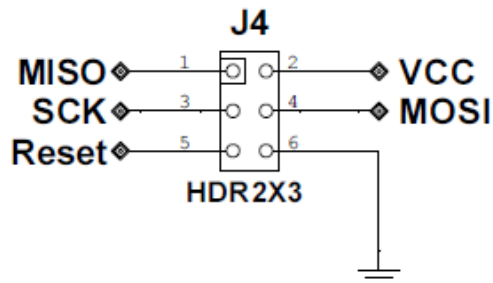
Kuna trükkplaadile joodetav pesa ei oleks taganud visuaalselt korrektset paneeli väljanägemist (komponendid ei olnud ühel joonel, vt. sele 4.18), siis tuli kasutusele võtta paneelile kinnitatav pesa.



Sele 4.18 Pistikute paigutus häälestaja otsapaneelil

ICSP pistik mikrokontrolleri programmeerimiseks

Antud pistik on ühendatud mikrokontrolleriga sellisel viisil, et see ühilduks seel 4.19 näidatud programmaatoriga. Pistik on realiseeritud 2,54 mm piikriba kasutades, millest lõigatakse välja kaks kolmest piigist koosnevat detaili ja joodetakse trükkplaadile.



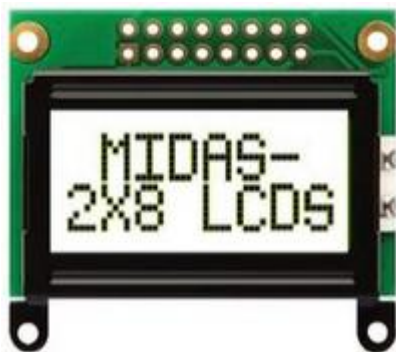
Sele 4.19 ICSP pistiku skeemi ühendamine

LCD ekraan

LCD ekraani valikul olid olulised järgmised kriteeriumid:

- LCD ekraani peab juhtima Hitachi HD44780 või selle standardiga ühilduv kontrolleri. Selline kontrolleri kasutab 16 viigulist ühenduspesa.
- LCD ekraani mooduli laius peab jääma alla 50 mm – see võimaldab mahutada ekraan mugavalt käes hoitavasse korpusesse.
- LCD ekraani taust peab olema neutraalselt valget. Valiku tegemisel osutus kõige sobilikumaks valge taustaga LCD ekraan.
- LCD ekraani tekst peab olema musta värvi.
- LCD ekraanil peab olema taustavalgustus.
- LCD ekraani hind peab olema põhjendatud ja mõistlik.

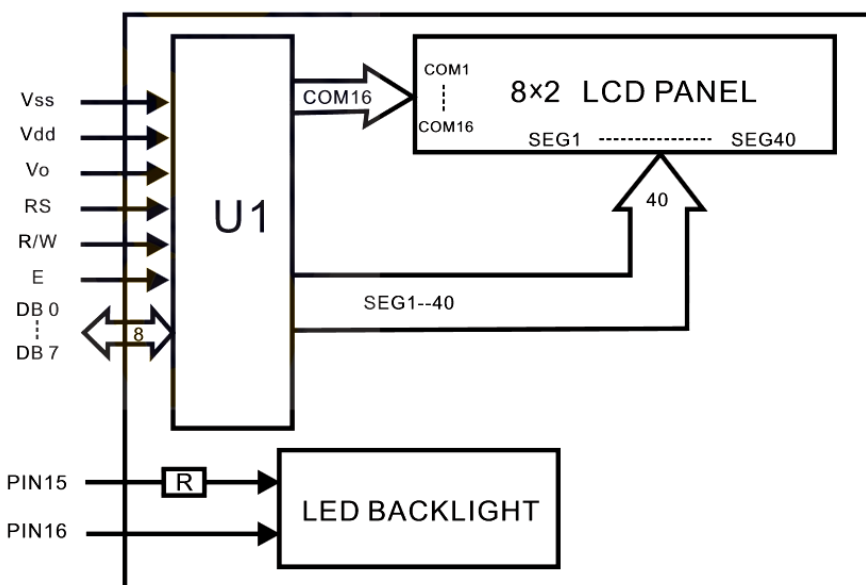
Sellistele tingimustele vastab MIDAS MC20805B6W-FPTLW LCD ekraan (näidatud seel 4.20), mis mahutab kaks rida sümboleid, mõlemasse ritta mahub 8 sümbolit.



Sele 4.20 Valitud LCD ekraani ülevaade [29]

Selel 4.21 on näidatud LCD kontrolleri sisendid ja väljundid. Sisendite ühendamist MCU-ga on kirjeldatud mikrokontrolleri valikut käsitlevas lõigus. Andmesiini viigud DB0-DB3 ei ole kasutusel, sest antud rakendusse vajalikud sümbolid saab edastada ka ilma neid viike kasutamata. Kuna väljaviik R/W, mis määratleb, kas infot kirjutatakse LCD-sse või loetakse LCD-st, on antud rakenduses pidevalt madalal nivool, siis MCU väljaviikude mõistlikumaks kasutamiseks ühendatakse viik R/W mikrokontrolleri asemel maandusega.

LCD taustvalgustust juhitakse energia kokkuhoiu mõttes mikrokontrolleriga, kusjuures valitud on mikrokontrolleri väljaviik, mis võimaldab ka PWMi rakendamist ja seeläbi saab LCD taustvalgustuse eredust sujuvalt muuta.



Sele 4.21 Valitud LCD ekraani plokk skeem [29]

LEDi ballasttakisti

Kuigi andmelehe järgi on taustvalgustusel sisemine takisti olemas ja LEDi saab toita 5 V-ga, siis on mõistlik paigutada toiteahelasse volutugevust piirav lisatakisti (sele 4.22, komponent R10), millega saab taustvalgustuse eluiga pikendada. Antud töö raames kasutatakse seal nulltakistit, mida on lõpliku skeemi katsetuste faasis võimalik välja vahetada mistahes väärtusega takisti vastu.

Transistori valik

Transistori valikul lähtutakse kollektor-emitter pingest, emitter-baas pingest, kollektorvoolust ning võimendustegurist. Antud rakenduses peavad näitajad olema vastavalt ülal loetletud nimekirjale vähemalt järgmised: 5 V, 5 V, 15 mA, 100. Valituks osutus NPN räni transistor BC547B, mis sobis antud rakendusse kõikide loetletud näitajate poolest.

Transistori baasiahela takisti arvutamine

Peale transistori valiku tegemist arvutati transistori baasiahela takistile sobilik väärtus. Seda tehti järgnevalt: transistori LEDi ahelas ehk kollektorahelas olev voolutugevus on 15 mA, transistori võimendustegur on 150 – seetõttu peab baasiahela voolutugevus olema 150 korda väiksem kui kollektorahelas. See on leitav järgmiselt:

$$I_b = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{15 \text{ mA}}{150} = 100 \mu\text{A}$$

Kus

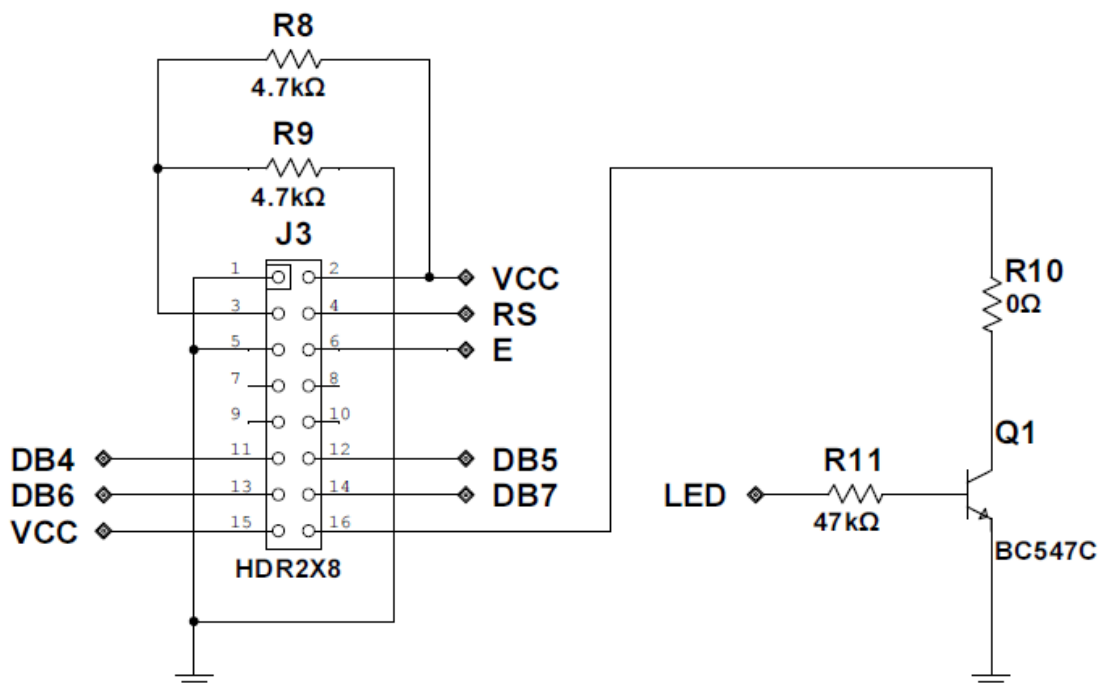
- I_b – baasiahelas tekkiv voolutugevus
- I_C – kollektorahela voolutugevus
- h_{FE} – transistori võimendustegur

Kuna nüüd on baasiahela voolutugevus ning pinge teada, siis tuleb arvutada sinna sobilik takisti, mida tehakse järgmiselt:

$$R_{11} = \frac{U_b}{I_b} = \frac{5 \text{ V}}{0,0001 \text{ A}} = 50 \text{ k}\Omega$$

Kus

- U_b – baasiahela pinge



Sele 4.22 LCD ekraani skeemi ühendamise põhimõtteskeem

Takistite standardreast on lähim sobilik väärtus 47 k Ω , mis ka takisti väärtuseks valiti.

LCD ekraani kontrasti reguleerimiseks kasutatavate takistite R8 ja R9 valik toimus selle alusel, et pingejagur jagaks toitepinge pooleks ning saadaks kontrasti reguleerimise sisendisse. Lõplikud takistite väärtused pannakse paika visuaalsete vaatluste baasil, mida hetkel ei saa komponentide puudumise tõttu teostada.

Toite skeem

EMG signaali häälestusploki toiteskeem on antud seel 4.23. Süsteemi toitenä kasutatakse kahte alternatiivset toiteallikat:

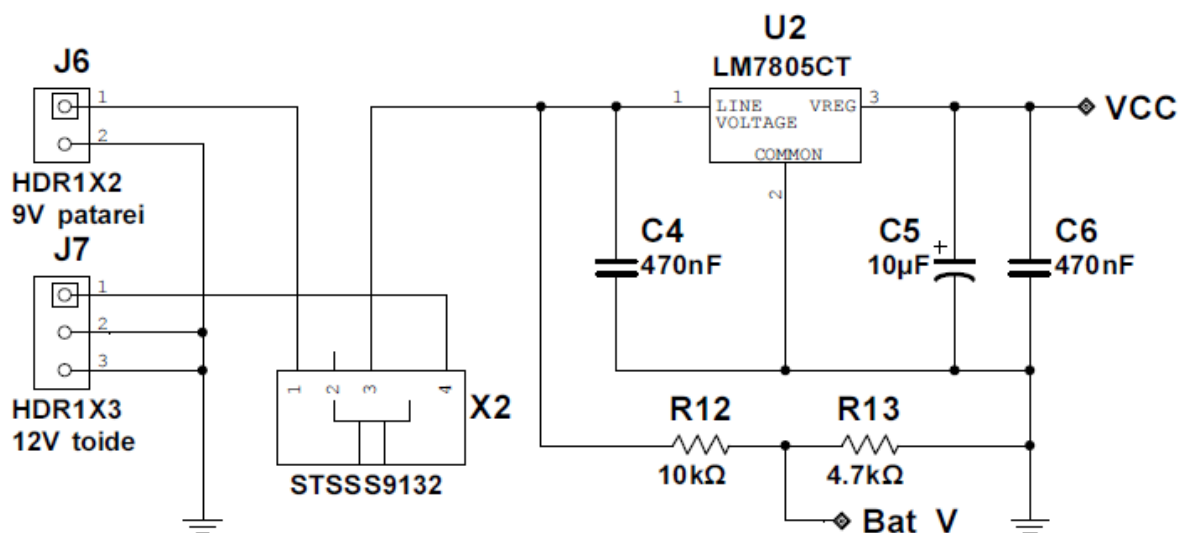
- Autonoomne patareitoide

Patareitoite puhul ühendatakse 9 V patarei häälestusploki toiteskeemi 2,54 mm jalavahega pistikuga. Aku juurest pistikuni veetakse toide juhtmetega. Seel 4.23 on näidatud autonoomse toite pistik tähisega J6.

- Võrgutoide

Võrgutoite puhul kasutatakse trükkplaadile joodetavat toitepesa. Seda saab kasutada kõikide levinud toiteadapteritega, mis teeb sellest universaalse toitelahenduse. Jälgida tuleb toitepinget ja pistiku polaarsust.

Sobiv nominaalne toitepinge jääb vahemikku 7 V – 12 V. Arvestatud on ka seadmevälise akutoite võimalusega, mistõttu skeem töötab ka 14,2 V-se sisendpingega, mis 12 V aku laadimisel tekib. Seel 4.23 on näidatud välise toite pistik tähisega J7.

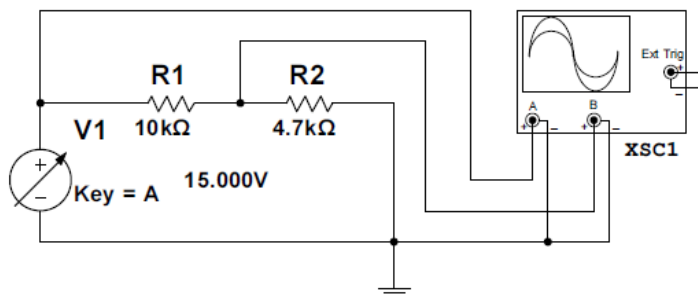


Sele 4.23 Häälestusseadme toiteskeem

Erinevate toiteallikate vahel saab valida lülitiga STSS9132. See on 3-positsiooniine SP3T kontaktide konfiguratsiooniga lüliti, mille toimimismehhanismi lahtimõtestamiseks sobib

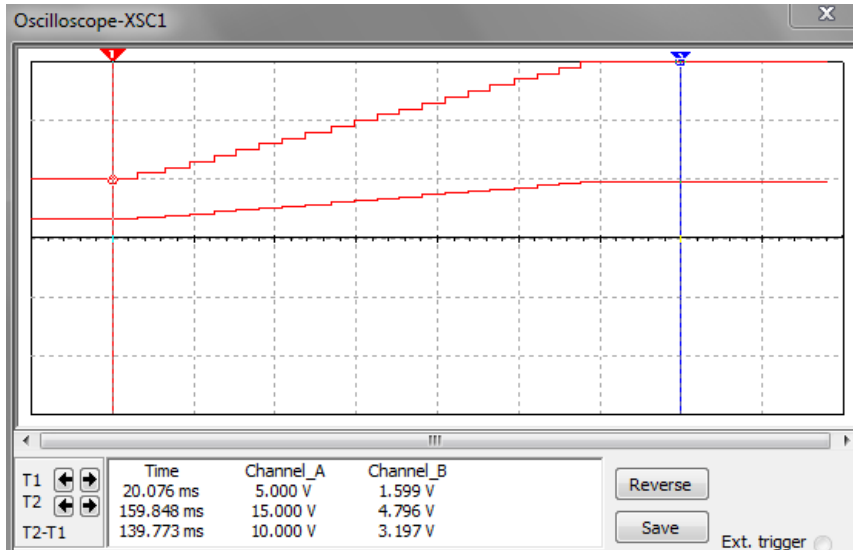
selel 4.23 esitatud lüliti tingmärk. Lüliti väljaviik nr. 3 on ühine, kuhu vastavalt lüliti asendile ühendatakse väljaviik 1 või väljaviik 4. Kui lüliti on keskasendis, siis ei ole lüliti sees olev valikukahvel ühenduses mitte kumbagi ülal nimetatud väljaviiguga ning seetõttu ei ole ka kumbi toitevariant valitud. See võimaldab ka EMG signaali häälestusploki väljalülitamist.

Takistusjaguriga (takistid R12 ja R13) saavutatakse mikrokontrollerile korrektne toitepinge tagasiside, st muudetakse pingeniivo iga toitepinge puhul mikrokontrolleri poolt mõõdetavasse vahemikku. Pingejaguri töö simuleerimiseks koostati selel 4.24 nähtav skeem.



Sele 4.24 Pingejaguri takistite valiku simulatsiooniskeem

Simulatsioon võimaldas lihtsalt leida sobiliku pingejaguri väljundpinged erinevate sisendpingete korral. Seda saab teostada selel 4.25 oleva ostsilloskoobi markereid kasutades.



Sele 4.25 Pingejaguri takistite simulatsiooni tulemus

4.2.3 Komponentide nimekirja koostamine

Komponentide koondtabel on antud lisas 2, milles antud näitajad on lahti seletatud punktis 3.2.6. Projekteeritud seadme garanteeritud töötemperatuuride vahemik on $-10^{\circ}\text{C} \dots 70^{\circ}\text{C}$, mis on kooskõlas lähteülesandega.

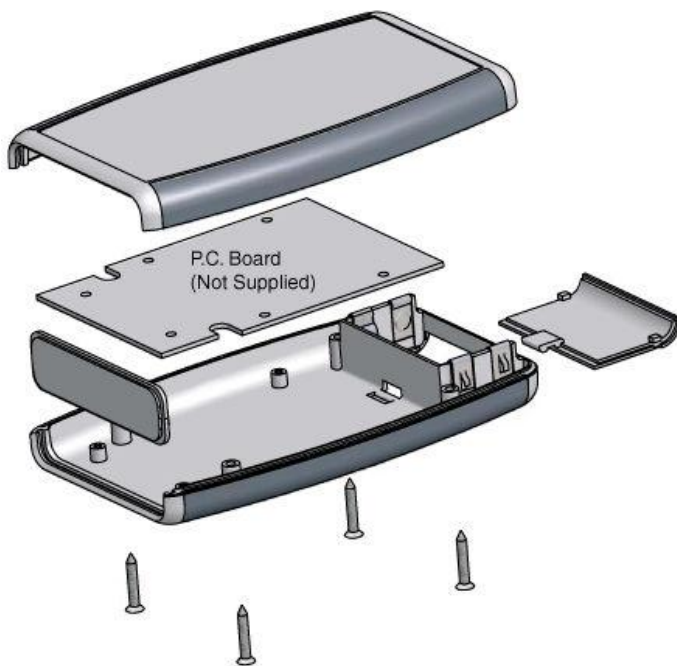
Komponentide summaarne maksumus on 23,2 €.

4.3 Trükkplaadi projekteerimine

4.3.1 Trükkplaadi mõõtmete määratlemine

Häälestusskeemi lähteülesandes on määratletud, et seade peab olema mugavalt käes hoitav ja eelistatavalt plastmassist. Nendele tingimustele vastavad käeshoitavatele seadmetele mõeldud korpuste toorikud, mis on valmistatud plastmassist survevalu meetodil. Kuna selliseid toorikuid valmistatakse masstootmises, siis on ka nende hind võimalikest variandidest madalaim. Seetõttu määratleb trükkplaadi välismõõtmed korpuse geomeetria.

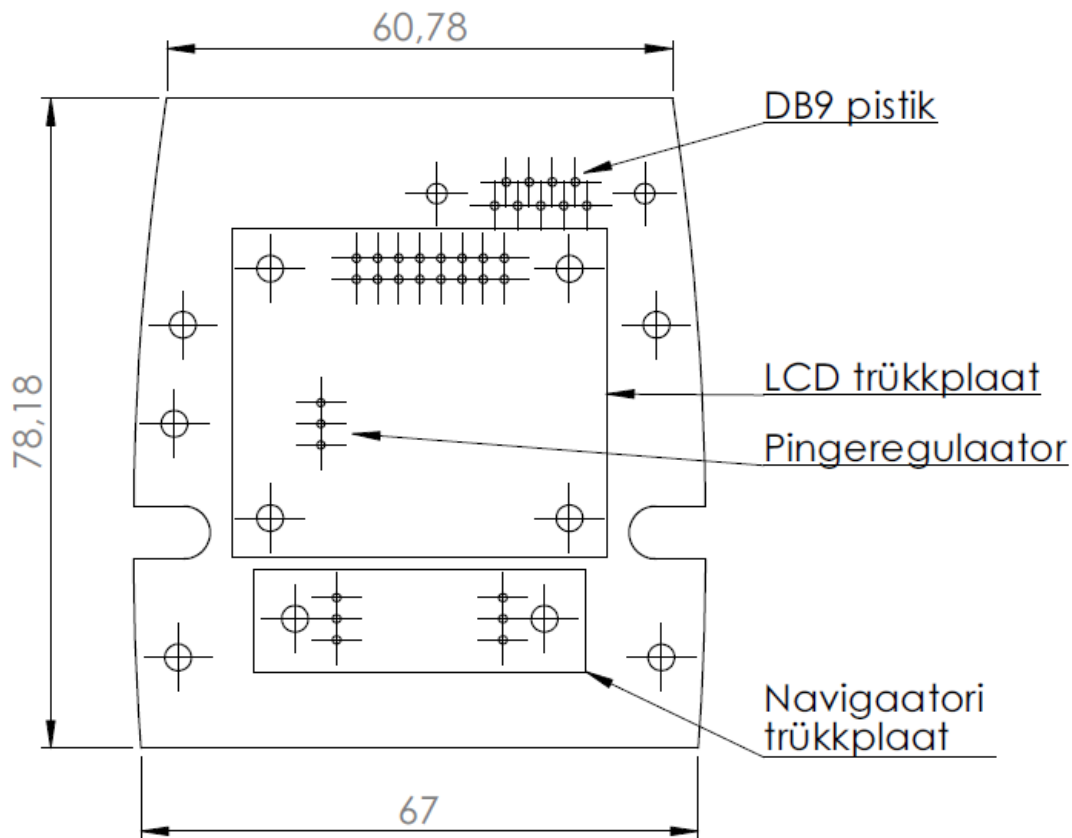
Valitud korpuseks osutus Hammond Manufacturing poolt toodetav korpus 1553BGYBAT, mille ülevaade on antud seel 4.26. Antud korpus on sobilik patareitoite kasutamiseks, võimalik on kasutada nii 2 x AA patareisid kui ka 9 V patareisid. Antud rakenduse jaoks jääb AA patareide jadaühendusel saadavast pingest väheks, et tagada mikrokontrollerile stabiilset 5 V toitepinget – patareide jadaühendusel saavutatav pinge on 3 V.



Sele 4.26 Valitud korpuse koostu plahvatusvaade [16]

Peale korpuse 3D mudeli valmimist SolidWorks projekteerimiskeskonnas oli võimalik teha sinna sobivast trükkplaadist DXF formaadis joonis, millele märgiti kõik trükkplaadi väljalõikejooned, trükkplaadi kinnitamiseks vajalikud avad ning ka nende komponentide paigutus, mis oli mõistlik projekteerimise alfaasis paika panna ning edaspidi mitte muuta, sest kõiki tingimusi arvesse võttes olid need seel 4.27 välja toodud komponentidele ainukesed sobilikud asukohad. Valminud joonis imporditi trükkplaadi disainimise programmi.

See võimaldas paika panna täpse trükkplaadi väljalõikejoone ja samuti sai selle abil paigutada ka elektroonikakomponente.



Sele 4.27 Trükkplaadi disainimise programmi eksporditud DXF joonis

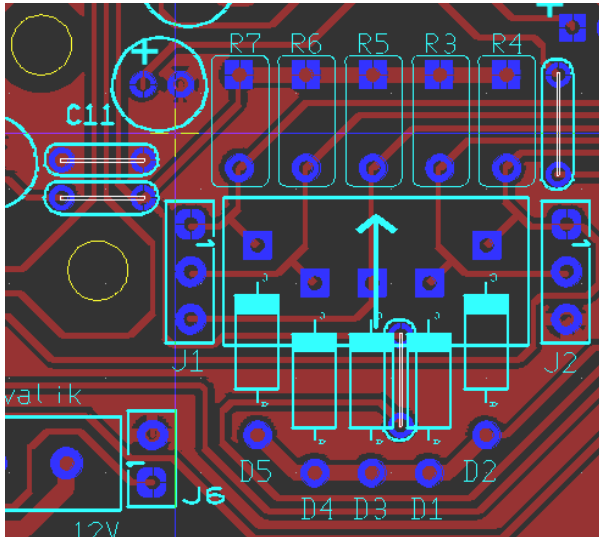
4.3.2 Komponentide paigutus

Selles alampeatükis tuuakse välja kaalutlused, mille põhjal paigutati trükkplaadile ülejäänud komponendid.

Peale punktis 4.3.1 välja toodud fikseeritud komponentide paigutamist oli suuruselt järgmiste komponentide paigutamine juba piiratud võimalustega. Mikrokontroller (DIP28 korpus) ja signaali translaator MAX232 (DIP16 korpus) sobisid oma mõõtmete poolest ainult LCD trükkplaadi alla.

Peale integraalskeemide paigutamist oli tähtis kaardistada komponendid, mis peavad paiknema integraalskeemide lähedal. Nendeks on mikrokontrolleri puhul väline ostsillaator ja signaaltranslaatori puhul selle välised kondensaatorid, andmelehe andmetel on eriti oluline paigutada integraalskeemi lähedale kondensaatorid C7 ja C8. Nende komponentide paigutus on arvestades piiratud paigutusvõimalusi rahuldav. Enamasti hakkavad piirama komponentide tihedamat paigutamist vasekihil olevad rajad, mis tuleb komponentide vahele mahutada.

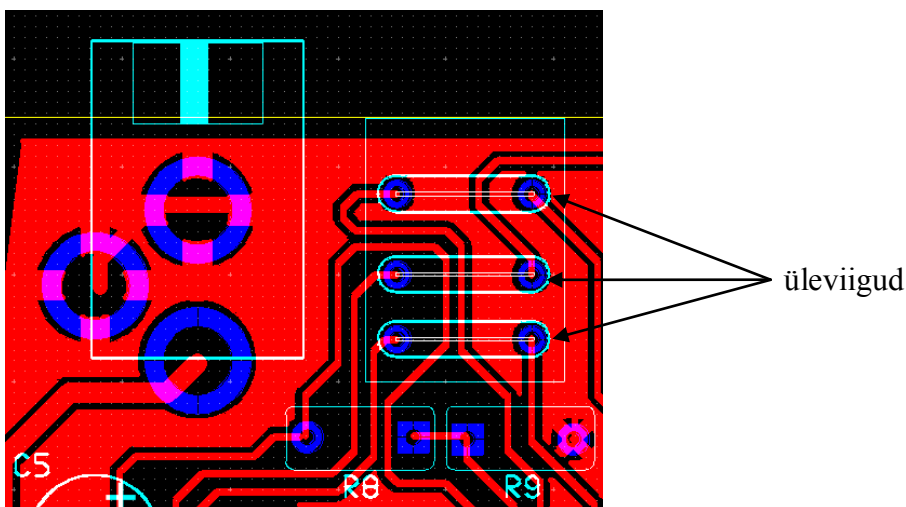
Ülejäänud komponentide paigutus ei ole nõnda piiritletud, kuid suurt rõhku pöörati optimeerimisele. Seel 4.28 näidatud komponentide optimaalse paigutusega juhtnupu trükkplaadi alla hoiti kokku väärtuslikku ruumi ning samuti minimeeriti summaarset radade pikkust. Samuti on takistid R4-R7 ja diodid D1-D5 korrapäraselt paigutatud. Vasemkihti on tumendatud märgiste loetavuse huvides.



Sele 4.28 Trükkplaadil kasutatud optimaalne radade paigutus

4.3.3 Üleviikude kasutamine

Trükkplaadi projekteerimisfaasis võeti eesmärgiks disainida ühepoolne trükkplaat, st. vaserajad on ainult ühel trükkplaadi poolel. Selle eesmärgi peamiseks argumendiks on kulude vähendamine, sest ühepoolne trükkplaat on odavam. Ühepoolse trükkplaadi tegemine ilma üleviikudeta on aga suuremate plaatide puhul väga raske. Kui üleviikude tegemine oli vajalik, siis üritati need paigutada korrapäraselt ja võimalusel varjatud kohtadesse. Näitena saab tuua seel 4.29 näidatud trükkplaadi vaate, kus üleviigud on peidetud signaalide ühenduspesa alla.



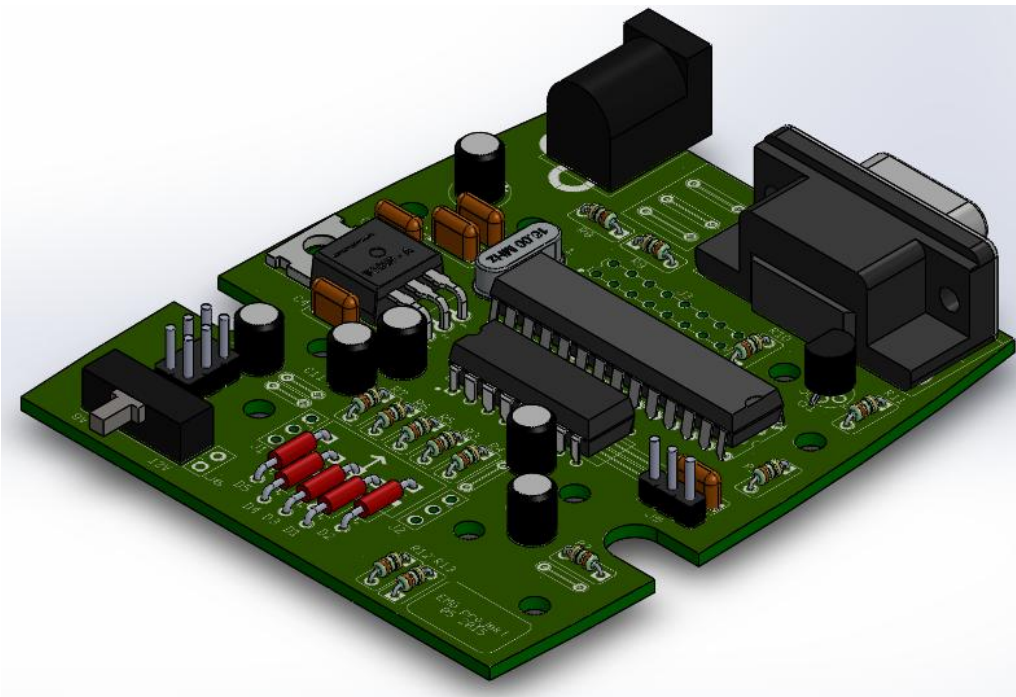
Sele 4.29 Üleviikude kasutamine

4.3.4 Projekteeritud trükkplaadi ülevaade

Trükkplaadi rajad tehti enamasti 0,4 mm laiad, sest sellise laiusega radasid on võimalik mahutada tihedalt elektroonikakomponentide vahele, kuid samas ei ole rajad nii kitsad, et peaks trükkplaadi tarnijat valima hakkama. Toiteskeemi rajad tehti 0,8 mm ... 1 mm laiad.

Projekteeritud trükkplaadi isomeetiline vaade on antud seel 4.30. Antud pildilt puuduvad paneeli külge kinnitatav 3,5 mm pesa, LCD ekraan koos pistikuga ning navigaatori nupp koos lisatrükkplaadiga – ühesõnaga tegu on valmis trükkplaadiga, millele lisatakse koostamise faasis tööks vajalikud lisad.

Seelt 4.30 on näha, et kui paneeli külge kinnitatav 3,5 mm pesa lisada, siis ei ole toite ümberlülitaja jaoks trükkplaadi otsapaneeli poolses ääres enam ruumi ning seetõttu ongi ümberlülitaja toodud teisele poole, mis teeb selle kasutamise küll märksa ebamugavamaks, kuid see ongi mõeldud pigem toiteallika ümberlülitina kasutamiseks. Vajaduse korral on võimalik ilma trükkplaati muutmata tuua akutoite lülituse võimalus esipaneelile, mida selle töö raames ei tehtud, sest seadet nähakse esmaste katsetuste vältel töötamas ennekõike võrgutoitel.



Sele 4.30 Projekteeritud trükkplaadi isomeetiline vaade

4.3.5 Trükkplaadi tellimine tootjalt

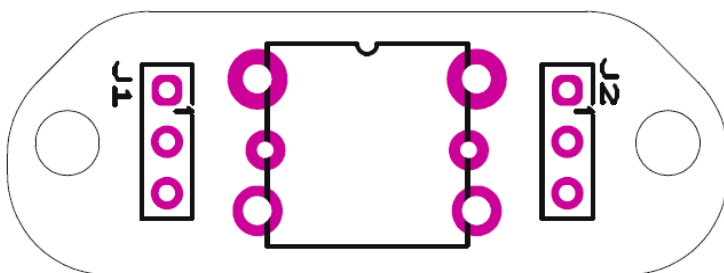
Ka selle trükkplaadi puhul kehtivad samad põhimõtted, mis punktis 3.3.5 välja toodi. Põhiliseks erinevuseks võrreldes EMG signaalitöötlusplokiga on keerulisem trükkplaadi väljalõikejoon ning rohkem kinnitusavasid.

Ülevaate häälestusskeemi trükkplaadi olulisematest kihtidest leiab lisast 6.

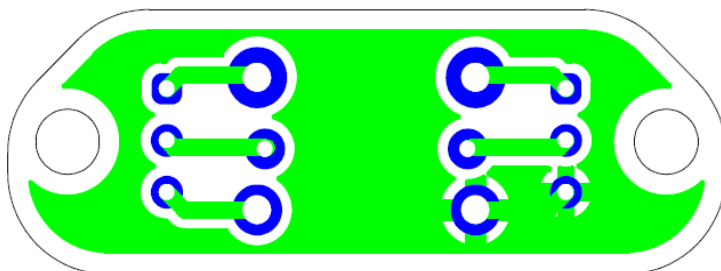
4.4 Navigaatornupu trükkplaadi projekteerimine

Navigaatornupu trükkplaadi projekteerimisel arvestati, et lisatrükkplaat võtaks minimaalselt ruumi ja oleks põhitrükkplaadile kinnitatuna igas suunas stabiilne, sest juhtnupuga navigeerimisel surutakse nuppu risti trükkplaadi pinna normaalliga. Stabiilsus saavutatakse sobiliku piikribade asetusega, mille puhul piikribad tagavad stabiilsuse ühes suunas ja trükkplaadi kinnituspoldid teises suunas.

Selel 4.31 on näidatud musta värviga trükkplaadi märgiste kiht ning lilla värviga avad jootemaskis. Selel 4.32 on antud rohelisega vasekihi kujutis ja sinisega komponentide jalgade paigutus. Vasekihil olevad rajad on 0,8 mm laiad.

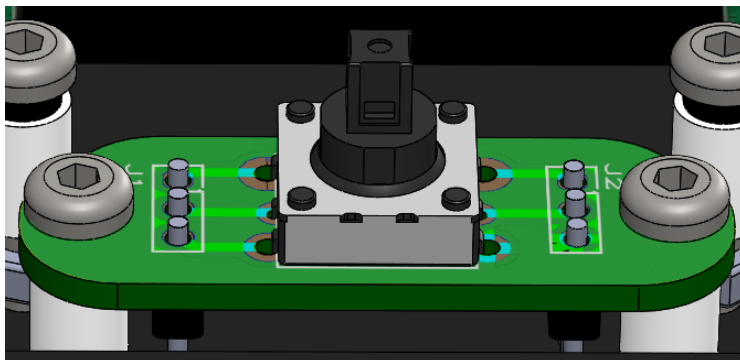


Sele 4.31 Navigaatori abiplaadi komponentide paigutus



Sele 4.32 Navigaatori abiplaadi vasekiht

Selel 4.33 on näidatud trükkplaadi koostu kolmemõõtmeline kujutis. Kuna juhtnupu jalgade asetused võimaldab ka ülalt poolt trükkplaati jootmist, siis joodetakse nii piikriba kui ka juhtnupp ühelt poolt, mis vähendab maksumust.



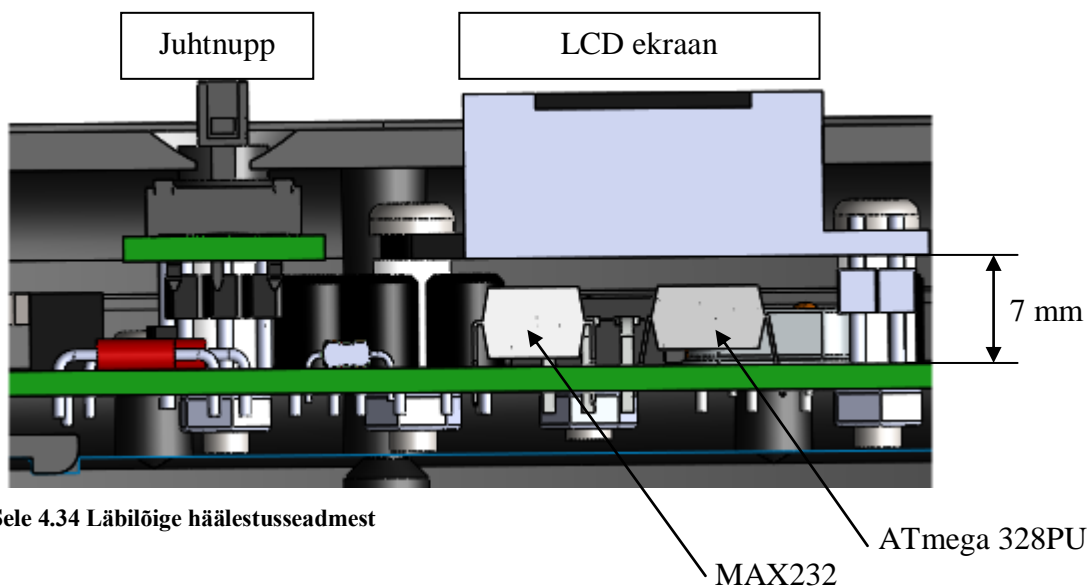
Sele 4.33 Navigaatori abiplaadi 3D mudel

4.5 Häälestusseadme koostamine

Kuna trükkplaadi mõõtmete määramise juures valiti juba korpus ära, siis ei hakata selles peatükis sellel pikemat peatuma, vaid keskendutakse häälestusseadme koostamisel esile kerkivate probleemide väljatoomisele.

Häälestusseadmele funktsionaalsuse andmiseks tuleb korpusesse lõigata avad juhtnupu, LCD ekraani, toite ümberlüli, signaalipesa, toitepesa ning kommunikatsioonipesa DB9 tarbeks.

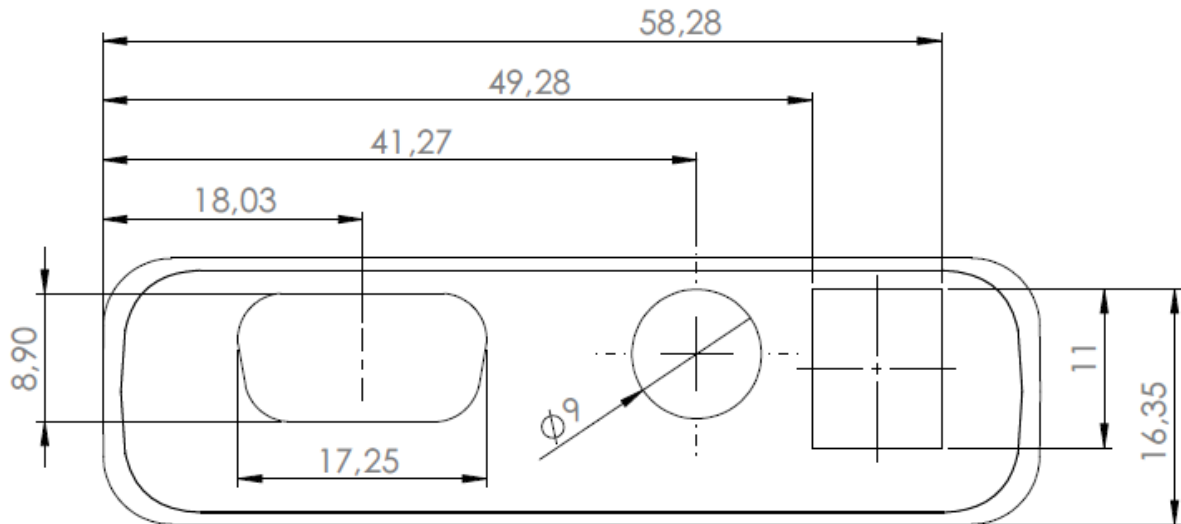
Järgnevalt vaadeldakse juhtnupu ja LCD ekraani jaoks avade töötlemist. Seel 4.34 on kujutatud läbilõige seadmest, kus on näidatud juhtnupu ja ekraani kõrguse sobitamist antud korpusega. Sobilik tulemus saavutatakse punktis 4.4 kirjeldatud navigaatori trükkplaadi ning 7 mm distantspuksidega, mis paigutatakse abitasapinna (juhtnupu ja LCD trükkplaadi tasapind) ning põhitasapinna (skeemi trükkplaat) vahele. Selline LCD ekraani tõstmine distantspuksidega võimaldab ekraani alla ära mahutada ka integraalskeemid.



Sele 4.34 Läbilõige häälestusseadmest

Korpuse esipaneeli lõigatavate avade asukohad ning nende mõõtmed on antud lisas 7. Navigaatorinupu jaoks ümara ava puurimine ei ole ka väikeseeriatootmise korral probleem, kuid ekraani jaoks ristküliku kujulise ava lõikamine on ilma CNC seadmeteta juba probleemilisem, sest referents ekraani serva näol on igal pool olemas ning iga eksimus on näha. Suuremate tootmismahutade juures oleks võimalik kasutusele võtta vesilõikus, mis võimaldab ilma pinda soojuslikult mõjutamata lõigata mistahes kujuga avasid.

Pistikute jaoks tuleb avad lõigata ka korpuse otsapaneeli sisse. Nende avade mõõtmed ning asukohad on antud seel 4.35.

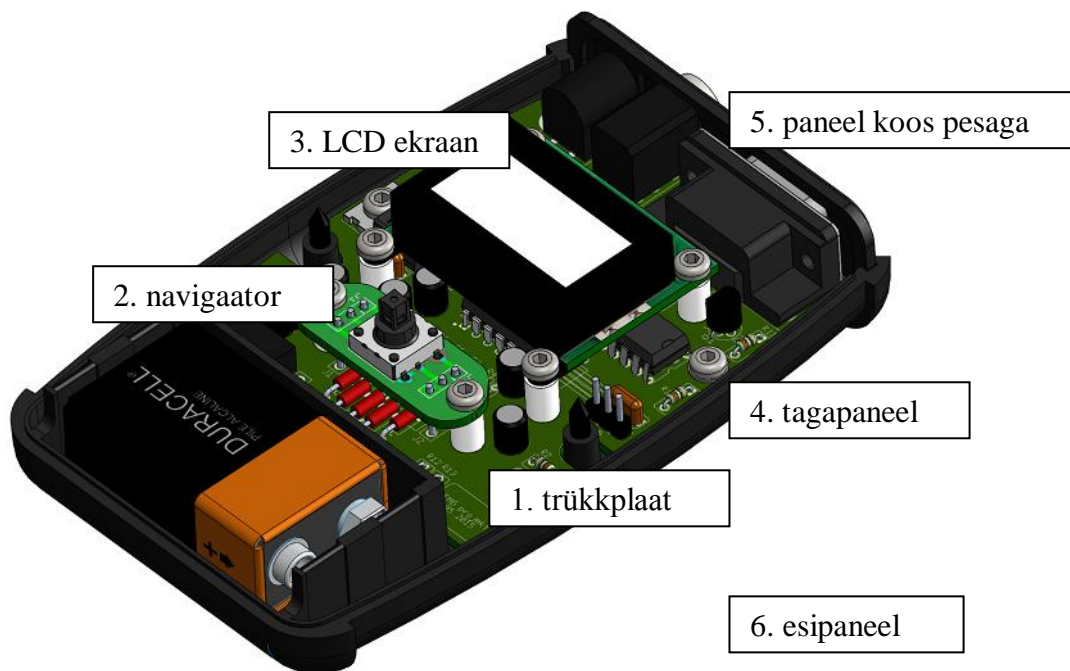


Sele 4.35 Otsapaneeli töötlemise joonis

Väljalõikejoon pesa DB9 jaoks on mõistlik väikeste tootmismahtude korral märkida toorikule šablooni abil ning seetõttu tuuaksegi seel 4.35 välja ainult avade põhilised mõõtmed.

Korpust tuleb töödelda ka ümberlüüti kasutamise võimaldamiseks. Selleks tuleb puurida trükkplaati ja patareid eraldava vaheseina sisse ava.

Signaali analüüsimise abiseadme koostamine toimub kindlas järjekorras, mis on näidatud seel 4.36. Esmalt koostatakse trükkplaat koos navigaatori ja LCD ekraaniga, seejärel kinnitatakse trükkplaat tagapaneeli külge, millele lisatakse otsapaneel koos pesaga. Koostamine lõpeb esipaneeli koostule lisamisega.



Sele 4.36 Häälestusseadme koostamise järjekord

5. VALMINUD SÜSTEEMI ÜLEVAADE

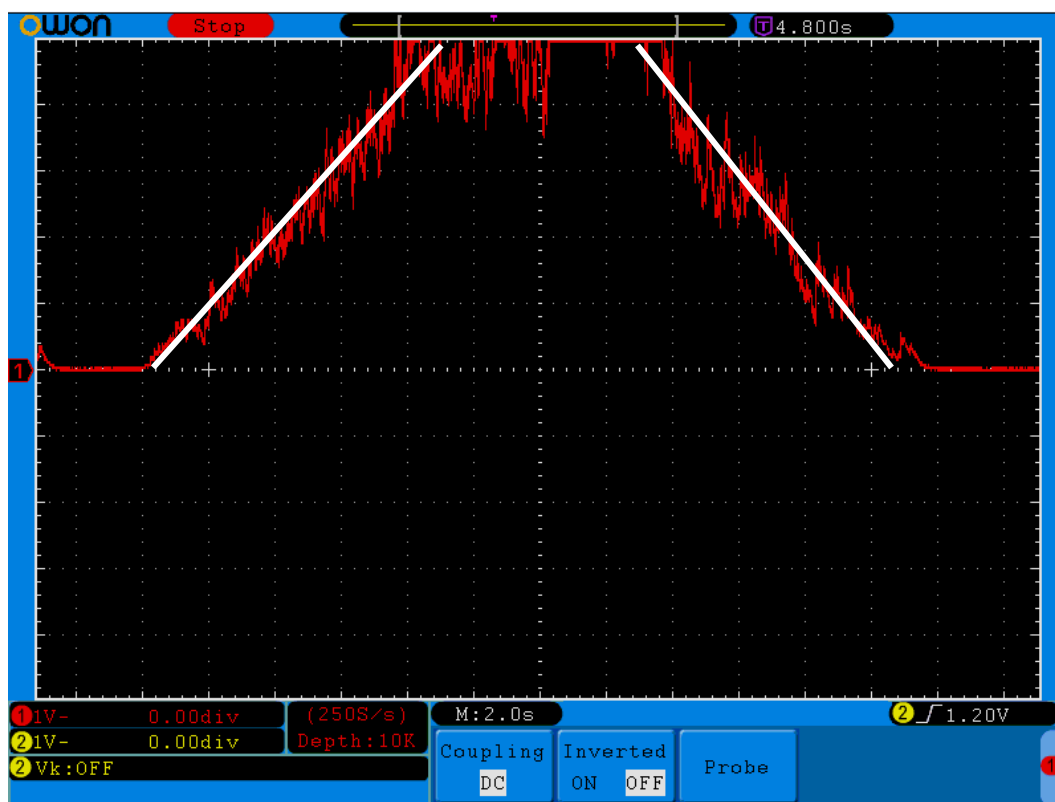
Tabelis 5.1 selgitatakse valminud seadme pistikute funktsioone. EMG signaalitöötlusploki ülemise poole tunneb ära korpuses oleva süvendi järgi.

Tabel 5.1 Signaalitöötlusploki ja häälestaja pistikute ülevaade

 <p>1 2 3</p>	<ol style="list-style-type: none">1. Väljundpesa. Väljastab skeemis töödeldud analoog- ja digitaalsignaali2. Toitepesa. EMG signaalitöötlusploki bipolaarne toide3. EMG sisend. Sisendpesa elektroodide kaablite ühendamiseks
 <p>1 2 3 4</p>	<ol style="list-style-type: none">1. I astme võimendusteguri häälestamise potentsiomeeter2. II astme võimendusteguri häälestamise potentsiomeeter3. III astme võimendusteguri häälestamise potentsiomeeter4. MCU digitaalväljundi lülituspunkti häälestamise potentsiomeeter
 <p>1 2 3</p>	<ol style="list-style-type: none">1. Toitepesa. Signaalihäälestuse abiseadme võrgutoite pesa välise toite jaoks2. Signaali sisend. Häälestamise faasis ühendatakse kaabli abil signaalitöötlusploki väljundpesaga3. Kommunikatsiooni pistik. Kasutatakse seadme ühendamiseks arvutiga. Tegu võib vastavalt kliendi soovile olla kas jadapordi või mini-USB pistikuga.

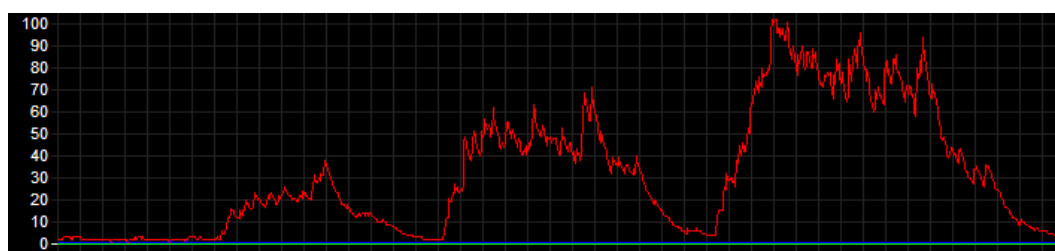
Valminud skeemi mürakindlus on juba prototüüplaadil väga hea, skeemi on katsetatud erinevatel lihastel ning erinevate inimeste poolt ning peale tabelis 5.1 näidatud seadepotentsiomeetritega väljundi paika reguleerimist on iga lihase ning iga inimese korral saadud tulemus piisavalt hea, et skeemi on võimalik kasutada usaldusväärse lihasingutuse mõõteskeemina.

Skeemi tundlikkus võimaldab biitsepsi peale paigutatud elektroodidega tuvastada sõrmede liigutusi ja randme keeramist, mis ei nõua suurt pingutust ning seetõttu võib julgelt öelda, et edasisi katsetusi erinevatel lihastel teostades on võimalik jõuda iga kasutaja puhul täpse juhtimissisendi andmiseni ilma lihast märkimisväärselt pingutamata. Seel 5.1 on näidatud 20 s jooksul teostatud lihase järk-järgulist pingutamist ning lõdvaks laskmist.



Sele 5.1 Valminud süsteemi analoogväljundi testimine

Seel 5.2 on näidatud PC vabavaralise COM pordi ostsillooskoobi [30] ekraanipilti. Y teljel on antud suhteline lihasingutus (%). Antud tarkvara õigustab ennast selles rakenduses täielikult.



Sele 5.2 Vabavaralise COM pordi ostsillooskoobi ekraanitõmmis

6. OMAHINNA ARVUTUS

Seadmete omahinna arvutamine tehakse eesmärgil saada teada komplekti ligikaudne maksumus. Kuna seadmed ei ole sellisel kujul müümiseks ette nähtud, siis müügiprognnoosi ei saa teha ning seetõttu äriplaani laadset majandusarvutust ei teostata.

Samal põhjusel jäetakse arvestamata ka seadmete amortisatsioon ja igasugused kaudsed kulutused (sh. turundus, hooned, kommunikatsioon jne.)

Omahinna arvutus on antud tabelis 6.1. Tabelis välja arvatud kõrge maksumus on portotüüpseeria puhul eeldatav. Suure panuse annab hinna kujunemisse trükkplaatide valmistamisel alustustasu (23 €). Eelkõige oleks nii majanduslikult kui ka kasutusmugavuse suhtes mõistlik häälestusseadme funktsionaalsus integreerida EMG signaalitöötlusplokki, kuid see põhjustaks kas arvestatava korpuse mõõtmete kasvu või eeldaks SMD komponentide kasutuselevõttu.

Tabel 6.1 Lahenduse omahind väikeseeria tootmise korral

Kuluartikkel	Maksumus, €
EMG signaalitöötlusplokk	
Korpus	5,6
Elektroonikakomponendid (lisa 1)	19,0
Jootmis- ja koostamistööd (1,5 h)	15,0
Korpuse töötlemine (0,3 h)	3,0
Jootetina	0,7
	43,3 €
Signaalihäälestamise abiseade	
Korpus	8,8
Elektroonikakomponendid (lisa 2)	23,2
Jootmis- ja koostamistööd (2 h)	20
Korpuse töötlemine (1 h)	10
Jootetina	0,6
Polt DIN7984 M3x6 (4 tk)	0,56
Polt DIN7984 M3x12 (6 tk)	0,90
Mutter DIN934-8 (10 tk)	0,08
	64,2 €
Trükkplaatide komplekt (3 PCBd)	44,1 €
KOKKU:	151,6 €

7. ELEKTRISEADME TÖÖSTUSOHUTUS

Iga elektroonikaseade peab vastavalt selle kasutusvaldkonnale ning seadme parameetritele vastama erinevatele elektroonikaseadmetele sätestatud nõuetele. Kuna antud juhul on tegu pigem prototüüpseeriaga, mida kasutatakse katsetuste tegemise eesmärgil, et välja töötada lõplik toode ja seda otseselt poodides ei müüda, siis analüüsitakse toote tööstusohutuslikke aspekte sellisel määral, et oleks kaardistatud edasise analüüsi suunad. Järgnevalt on välja toodud erinevad nõuded ning nende lühianalüüs EMG signaalitöötlusloki seisukohalt.

- 73/23/EEC madalpingeseadmete direktiiv [31]
Direktiiv kehtib seadmetele, mille sisendites-väljundites oleva alalisvoolu pinge jääb vahemikku 75 V...1000 V. Kuna antud seadmel on maksimaalne toitepinge 15 V, siis jääb see seade selle direktiivi reguleerimisalast välja
- 89/336/EEC elektromagnetilise ühilduvuse direktiiv [32]
Ühelt poolt: seade ise ei tekita märkimisväärseid elektromagnetilisi häireid, kuid teiselt poolt seade ise on tugevate elektromagnetiliste häiringute suhtes vastuvõtlik. Seda on küll seadme komponente valides üritatud minimeerida, kuid nõrkade signaalide korral on see probleem siiski aktuaalne
- 98/79/EC meditsiiniliste diagnostikaseadmete direktiiv [32]
Kui seadme edasise arendamise korral soovitakse seadet kasutada meditsiinilises diagnostika, siis peab seade selle direktiivi nõuetele vastama
- Energiamõjuga toodete ökodisaini nõuded [33]
Selle seaduse alusel paika pandud ökodisaini tähtaegade järgi peab selline elektrooniline seade tarbima ooteseisundis alla 0,5 W. Antud seade ei tarbi ühelgi juhul üle 0,1 W.
- 2011/65/EU RoHS direktiiv [34]
See ohtlike jäätmete kasutamise piiramiseks loodud direktiiv piirab plii, elavhõbeda, kaadmiumi, Cr6+, PBB ja PBDE kasutamist. Antud töös kasutatavate komponentide puhul on jälgitud, et need vastaks RoHS direktiivi poolt esitatud nõuetele

Üldkokkuvõttes on seadme projekteerimisel arvestatud selle keskkonnamõjude minimaliseerimisega ning lõppkasutajale ohutuse tagamisega. Seade ei ole ilma tööriistad kasutamata väiksemateks osadeks võetav, seadmel puuduvad teravad servad, seade töötab hääletult, seadmel ei ole valgusallikana kasutusel laserit, seade töötab ka õuetingimustes ohutu pinge pealt – see kõik tagab seadme ohutuse ka siis kui see satub nt. väikelapse kätte.

KOKKUVÕTE

Magistritöö ülesanne kasvas välja õppeainest „Tehnoloogiad erivajadusteks“, mille praktilises osas katsetati meeskonnatööna erinevaid lahendusi elektromüograafilise (EMG) signaali mõõtmiseks. Kursuse tulemusel koostati makettplaadil elektroonikaskeem, mis oli väliste häiringute suhtes väga tundlik, kuid mõõtis EMG signaali piisavalt hästi, et alalisvoolu-mootori pöörlemissagedust lihasingutuse taseme abil lineaarselt muuta. Seetõttu leidis töö autor, et sellesse teemasse rohkem süvenedes oleks võimalik projekteerida kõigis oludes toimiv seade.

EMG signaali kasutatakse paljudes valdkondades. Suurem osa nendest on seotud biomehaanilise või meditsiinilise uurimustööga, kuid EMG signaali saab kasutada ka juhtimisrakendustes. Näiteks võib tuua ratastooli juhtimise ja personaalarvuti kursori liigutamise, kuid sisuliselt on rakendusvaldkondi piiramatult. Kõige suuremat kasu pakub EMG signaali abil seadmete juhtimine nendele inimestele, kelle igapäevaelu kvaliteeti see märkimisväärselt kasvatab. Näiteks võib tuua nelja jäseme halvatusega inimesed, kes saaks EMG juhtimissüsteemi kasutades pea liigutamise teel ise ratastooli juhtida ning oleksid seeläbi palju iseseisvamad.

Kuna rakendusvaldkondi on sellisel süsteemil palju ja igale konkreetsele valdkonnale lahenduse välja pakkumiseks tuleks iga kord ülesandele natukene erineva nurga alt läheneda, siis otsustati luua antud töös lahendus, millega saaks kliendile demonstreerida EMG signaali mõõtmise protseduuri ning sellega saavutatavaid tulemusi ja pakkuda võimalust testperioodi vältel EMG signaali abil seadmete juhtimist proovida. Selline lahendus peab olema viisaka teostusega, funktsionaalne ja kasutatav iga skeletilihase peal. Kuna kõik lihased ei ole ühesugused, kuid hea mõõtetulemuse saamiseks peab signaal EMG signaalitöötlusploki väljundis olema iga lihase puhul samasugune, siis on magistritöö käigus projekteeritud signaalitöötlusplokk laias vahemikus reguleeritav. Samuti on arvestatud, et signaalitöötlusploki reguleerimist ei teostata alati laboritingimustes ning seetõttu projekteeriti ka EMG signaalitöötlusploki väljundite reguleerimiseks sobilik häälestamise abiseade, mis kuvab mõõdetud tulemusi sisseehitatud LCD ekraanil või arvuti monitoril.

Tööd alustati patendi- ja turuanalüüsiga, mille käigus leiti, et prototüüpseeria tasemel tehtavate EMG signaalitöötlusplokkide puhul patendikaitse probleeme ei teki. Samuti saadi ülevaade, et kui kliendiga koostöös hakatakse välja töötama rakenduspetsiifilist lahendust, siis tuleb tegelda patendiküsimustega põhjalikumalt, sest rakenduspõhiseid EMG alaseid patente on piisavalt.

Turuanalüüsi tehes jõuti järeldusele, et väljapakutav lahendus on piisavalt uudne. Turul on pakkuda EMG signaalide mõõtmiseks erinevaid arendusplaate ja teiselt poolt teadustöök suunatud mõõtekomplekte, kuid nende kahe äärmuse vahele paigutuvaid tooteid märkimisväärselt ei leidu.

Magistritöö teises osas antakse ülevaade EMG signaalitöötlusloki projekteerimisest. Selle projekteerimist alustati katsetusplaadil skeemi erinevate osade katsetamise ning ostsilloskoobi ekraanil analüüsimisega. „Tehnoloogiad erivajadusteks“ kursuseprojekti raames valminud skeemist ei kasutatud lõpplahenduses mitte ühtegi osa, kuid sellest saadud kogemustega koostati stabiilselt töötav skeem. Katsete tulemustena koostatud skeemi alusel disainiti trükkplaat ning valiti sobilik korpus, mille valiku põhjendamiseks tehti ka aine „Maksumus- ja keskkonnakeskne projekteerimine“ jooksul põhjalik keskkonnaanalüüs. Valik tehti ekstrudeeritud alumiiniumprofiili ning lehtalumiiniumist väljafreesitud korpuste vahel, millest esimene osutus viis korda keskkonnasõbralikumaks kui teine.

EMG signaalitöötlusloki väljunditeks on analoog- ja digitaalväljund. Nendest esimene on mõeldud kasutamiseks mistahes analoog-digitaal konverteriga ning seetõttu saab EMG signaalitöötlusloki kasutada väga erinevate rakenduste puhul. Digitaalväljund on mõeldud juhtimisülesande lihtsustamiseks erinevate süsteemide kesksetes kontrollerites ning samuti on see kasutatav ka eraldiseisvalt mõne lihtsa juhtimisülesande täitmiseks, st. ainult EMG signaalitöötlusloki kasutades saab koos sobiva jõuelektroonikaga juhtida erinevaid ühe signaali põhjal juhitavaid täitureid. Digitaalväljund on kasutatav nii diskreetse lülituse kui ka PWM režiimis, esimesel puhul on seadepotentsiomeetriga reguleeritav lülituspunkt, teisel puhul signaali täituvus.

Magistritöö teises osas antakse samalaadne ülevaade häälestusseadme projekteerimisest. Häälestusseadme puhul dikteeris projekteerimist valituks osutunud korpus, millele vastavalt tehti põhitrükkplaat ja ka lisatrükkplaat navigeerimise nupu paigaldamiseks. Valminud seadme esipaneelil on LCD ekraan ja juhtnupp. Otsapaneelil on erinevad signaali- ja toitepistikud. Seadme arvutiga liidestamiseks on võimalus valida, kas seade tellitakse COM pordi pesaga või USB pesaga. Mõlemal juhul kasutatakse signaali arvutis mõõtmiseks vabavaralist COM pordi ostsilloskoopi.

Samuti antakse magistritöös seadmete omahinna näol ülevaade töö majanduslikust poolest. Viimases peatükis kaardistatakse seadmete tööstusohutust käsitlevad direktiivid ning antakse töös projekteeritud seadmetest nende põhjal lühiülevaade. Projekteerimise käigus tagati seadme vastavaus RoHS direktiiviga.

Kuna töös käsitletud seadmete projekteerimisel tuli arvestada väikese tootmismahuga, siis on seade koostatud läbivaukmontaaž elektroonikakomponente kasutades. See piirab otseselt seadme mõõtmete minimeerimist, kuid olulisem veelgi on läbivaukmontaaž-komponentide pakutava funktsionaalsuse piiratus. Seetõttu nähakse edasise arendussuunana klientidega koostöös toote väljatöötamist, mida saaks hakata tootma piisavas mahus, et pindmontaaž komponente kasutades seadme mõõtmeid vähendada, kuid samas funktsionaalsust kasvatada. Näitena võib tuua, et pindmontaaž komponente kasutades oleks saanud töös projekteeritud kaks seadet paigutada ühte korpusesse.

Magistritöö alguses püstitatud eesmärk sai täidetud – katseplaadil valmis EMG signaali-töötlusloki esimene prototüüp, mis töötab iga skeetilihase ning iga inimese peal. Lõputöö esitamise hetkeks on trükkplaatide ning komponentide tellimused tehtud ning seetõttu võib öelda, et lõputöö saab valmis seadete näol ka praktilise lahenduse, mida on võimalik kaasas kanda ning põhjalikumaid katsetusi igapäevases elus teha.

ABSTRACT

Task of this master thesis originates from subject “Handicap technology”, where group of students had to design a system, which is capable of EMG signal measurement. After many experiments final design was good enough to linearly control speed of a DC motor, however, it was extremely receptive towards external interferences. Assumption was made that when design of an EMG signal measurement circuit is revised, then stable results will be achieved in any conditions and thus a it would lead up to a ready-to-use device for EMG signal processing. This assumption leads to this master thesis.

EMG signal is used in many application areas. Majority of those are involved with biomechanical or medical researches, however, EMG signal can be used in control applications as well. Some examples could be controlling direction and speed of a wheelchair or controlling a pointer on computer screen. In theory, there are unlimited possibilities for such kind of control tasks. EMG controlled devices could be the most beneficial to people, who suffer from tetraplegia (which means that all limbs are partially or fully paralyzed). These people could achieve a remarkable increase in life quality as they could use their head to control wheelchair or any other device and this leads to increased independence.

As there are many different applications areas for such device, then in this thesis a prototype device was designed, which can be used for demonstration and data collecting purposes to support further developments of this device. Further developments include cooperation with possible clients to better fulfil their needs. As the device will be lent out to customer for test period, it has to be functional and well put together, which was a target to achieve. There are different skeletal muscles, which mean that the EMG signal processing unit has to be widely adjustable, because it has to operate uniformly on any muscle. To support adjusting EMG signal processing unit out of laboratory conditions, a second device was designed to show signal levels on LCD or computer screen.

The first part of master thesis is patent and market analysis, which showed that device being designed in this thesis is unique enough and as long as it is universal device for demonstration and data collecting purposes, there will be no patent protection issues. There are different products for hobby users and professional researchers; however, there is no significant choice of products which are portable and can be adapted for different control tasks.

In the second part of this paper, engineering of EMG signal processing unit is explained. Firstly different signal processing approaches were tested on breadboard and analyzed with

oscilloscope. The best solution was converted into schematics and after that a PCB for EMG signal processing unit was made. The final solution was completely different from schematics made in subject “Handicap technology”, however, this subject gave experience, which was essential for completing this thesis. After that an enclosure was chosen. There were two options: choosing extruded aluminium profile or milling enclosure out of sheet aluminium. After in-depth environmental and economical analysis extruded aluminium profile was chosen as it is five times more environmentally friendly.

EMG signal processing unit has two outputs: analogue and digital. Analogue output is meant for connecting with any analogue-digital conversion device, which means this EMG signal processing unit can act as a signal interpreter between muscle and any microcontroller, computer or other analysing or plotting device. Digital output is designed to simplify control tasks by outputting discrete (adjustable switching point with hysteresis) or PWM (adjustable pulse length) signal. This means that this device can be independently used for controlling any actuator by muscle activity.

The third main part of this paper incorporates engineering device for signal graphing. Graphing device is necessary to support adjusting output of the EMG signal processing unit when this device is used by a client (and there is no oscilloscope to get feedback for adjusting signal levels). Communication port of this device can be COM port or USB port according to clients needs (using computer with USB ports only requires installing driver for virtual COM).

Last section of this paper gives overview of economical aspects as well as different EU directives, which has to be followed in order to sell this device on European market.

These devices will be produced in small batch production, which had to be taken into account during the engineering phase of this work. The main restriction was that THT components had to be used, which made PCBs larger in dimensions.

The aim of this master thesis was defined as following: provide EMG signal processing unit for control applications, which is capable of stable EMG signal output under various conditions. This aim is achieved as prototype of signal processing unit is tested on different muscles and on different people and it provides stable signal output.

This thesis has practical output as well as PCBs, components and enclosures are ordered and devices will be assembled.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Liis Sabre, „Epidemiology of traumatic spinal cord injury in Estonia. Brain activation in the acute phase of traumatic spinal cord injury“, [WWW]
https://dspace.utlib.ee/dspace/bitstream/handle/10062/31206/sabre_liis.pdf?sequence=1
2. Williams & Wilkins. (1985). „Muscles Alive“ (5 subedition). [On-line]. Chapter 3, [WWW]
<http://www.bu.edu/nmrc/files/2010/03/Muscles-Alive-Ch-3.pdf>
3. Euroopa patendiregistri kodulehekül, [WWW]
<https://register.epo.org/smartSearch?searchMode=smart&query=emg>
4. Olimex arenduskomplektide kodulehekül, [WWW]
<https://www.olimex.com/Products/Duino/Shields/SHIELD-EKG-EMG/>
5. Backyardbrains kodulehekül, [WWW]
<https://backyardbrains.com/products/emgSpikerboxBundle>
6. Thalmic Labs kodulehekül, [WWW]
<https://www.thalmic.com/en/myo/techspecs>
7. Delsys kodulehekül, [WWW]
<http://www.delsys.com/products/handheld-emg/>
8. Motion Lab Systems kodulehekül, [WWW]
https://www.motion-labs.com/prod_emg_systems_28.html
9. Mechail, 3,5 mm pesa pilt, [JPG]
https://mechail.files.wordpress.com/2013/04/electrodecable_3leadsnapconnectoraudiojack.jpg
10. MedSafe kaablite pilt, [JPG]
<http://ecx.images-amazon.com/images/I/41ZaZiXGEoL. SY300 .jpg>
11. Sparkfun kodulehekül: AVR Pocket Programmer, [WWW]
<https://www.sparkfun.com/products/9825>
12. Farnell tootekataloog: ATtiny45, [WWW]
<http://ee.farnell.com/atmel/attiny45-20pu/mcu-8bit-attiny-20mhz-dip-8/dp/1288352>
13. AllAboutCircuits veebileht, [WWW]
<http://sub.allaboutcircuits.com/images/03046.png>
14. Farnelli tootekataloog: INA126 andmeleht, [WWW]
<http://www.farnell.com/datasheets/1837576.pdf>
15. Electronics tutorial veebileht, [WWW]

- http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_5.html
16. Farnelli tootekataloog: 1455B1202RD andmeleht, [WWW]
<http://www.farnell.com/datasheets/1885429.pdf>
 17. Kamitra kodulehekülg, [WWW]
www.kamitra.ee
 18. The Engineering Toolbox, IP protection, [WWW]
http://www.engineeringtoolbox.com/ip-ingress-protection-d_452.html
 19. EAA LCA analüüs, [WWW]
<http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2011/10/Environmental-Profile-Report-for-the-European-Aluminium-Industry-April-2013.pdf>
 20. Farnelli tootekataloog: FT230X andmeleht, [WWW]
<http://www.farnell.com/datasheets/1738899.pdf>
 21. QSL veebileht: RS232 pingeniivood, [WWW]
<http://qsl.net/pa3ckr/bascom%20and%20avr/rs232/rs2321.gif>
 22. Oomipoe veebuleht , [WWW]
<http://www.oomipood.ee/product/cable-146/2/usb-a-rs232-konverter-2m-kaabel-usb-to-serial>
 23. Farnelli tootekataloog: USB-DB9 andmeleht, [WWW]
<http://www.farnell.com/datasheets/576664.pdf>
 24. LCD spetsiaalsümbolite generaator, [WWW]
<http://omerk.github.io/lcdchargen/>
 25. Farnelli tootekataloog: Atmel ATmega162, [WWW]
<http://ee.farnell.com/atmel/atmega162-16pu/mcu-8bit-atmega-16mhz-dip-40/dp/9171169>
 26. Farnelli tootekataloog: Atmel ATmega328, [WWW]
<http://ee.farnell.com/webapp/wcs/stores/servlet/ProductDisplay?catalogId=15001&langId=372&productId=65350318&storeId=10158>
 27. Farnelli tootekataloog: SKQUCAA010, [WWW]
<http://www.alps.com/products/WebObjects/catalog.woa/E/HTML/Switch/Tact/SKQU/SKQUCAA010.html>
 28. Farnelli tootekataloog: MAX232, [WWW]
<http://www.farnell.com/datasheets/1900600.pdf>
 29. Farnelli tootekataloog: Midas LCD, [WWW]
<http://www.farnell.com/datasheets/1485442.pdf>

30. COM pordi ostilloskoobi kodulehekülg, [WWW]
<http://www.x-io.co.uk/serial-oscilloscope/>
31. Tehnilise järelevalve amet, Madalpinge direktiivi juhendmaterjal, [WWW]
http://www.tja.ee/public/documents/Toostuohutus/Elektriohutus/100.Madalpinge_juhis1.pdf
32. Euroopa direktiivide CE tähistete kodulehekülg, [WWW]
<http://www.ce-marking.org/list-of-standards.html>
33. Tehnilise järelevalve amet, Ökodesaini nõuded, [WWW]
<http://www.tja.ee/seadmete-okodesaini-nouded/>
34. UTU Powell kodulehekülg, [WWW]
<http://www.utu.ee/keskkonna-kohustused/rohs>

LISAD

Lisa 1. EMG signaalitöötlusploki elektroonikakomponendid

Tellimus	Komponendi kirjeldus	Kogus	Märgistused	Temp., °C		Hind, €	
				Min	Max	Tk	Kokku
1217016	Audio, KLBR4	3	X1, X2, X3	-30	85	1,830	5,49
9843698	Diod, 1N4448	1	D2	-65	100	0,030	0,03
2212805	ESD kaitse, ESD5V0S2U	1	D1	-55	125	0,129	0,13
1100433	Kondensaator_K, 10nF	2	C12, C16	-55	125	0,187	0,37
1871004	Kondensaator_E, 10µF	2	C5, C18	-40	105	0,071	0,14
1871014	Kondensaator_E, 47µF	2	C6, C7	-40	105	0,043	0,09
2112909	Kondensaator_K, 0.1µF	8	C1, C2, C4, C8, C9, C10, C14, C15	-55	125	0,102	0,82
1679407	Kondensaator_K, 470nF	4	C3, C11, C13, C17	-55	105	0,160	0,64
1045505	LED_roheline, 3 mm	1	LED1	-40	100	0,140	0,14
1288352	MCU, AtTiny45	1	U3	-40	85	1,230	1,23
1417402	OpAmp, INA126	1	U1	-40	85	3,150	3,15
2323290	OpAmp, OPA177FP	1	U4	-40	85	1,560	1,56
1106010	OpAmp, RC4558P	1	U5	-40	85	0,113	0,11
1262363	Pingeregulaator, LP2950	1	U2	-40	125	0,290	0,29
1593417	Pistik, HDR1X3*	2	J1	-40	105	0,270	0,54
9354425	Potentsiomeeter, 10kΩ	4	R1, R6, R15, R19	-55	125	0,910	3,64
9342575	Takisti, 1.3kΩ	1	R20	-55	155	0,047	0,05
9342427	Takisti, 100kΩ	2	R11, R12	-55	155	0,043	0,09
9342419	Takisti, 10kΩ	1	R4	-55	155	0,045	0,05
9342400	Takisti, 1kΩ	1	R5	-55	155	0,043	0,04
9342435	Takisti, 1MΩ	1	R7	-55	155	0,044	0,04
9342818	Takisti, 20Ω	2	R2, R14	-55	155	0,013	0,03
9343113	Takisti, 36kΩ	3	R9, R10, R13	-55	155	0,033	0,10
9343253	Takisti, 4.7kΩ	2	R3, R8	-55	155	0,045	0,09
9343415	Takisti, 6.2kΩ	3	R16, R17, R18	-55	155	0,049	0,15

Summa kokku: 19 €

* ostukomponent on 10-ne piikriba, millest on kasutuses 60%

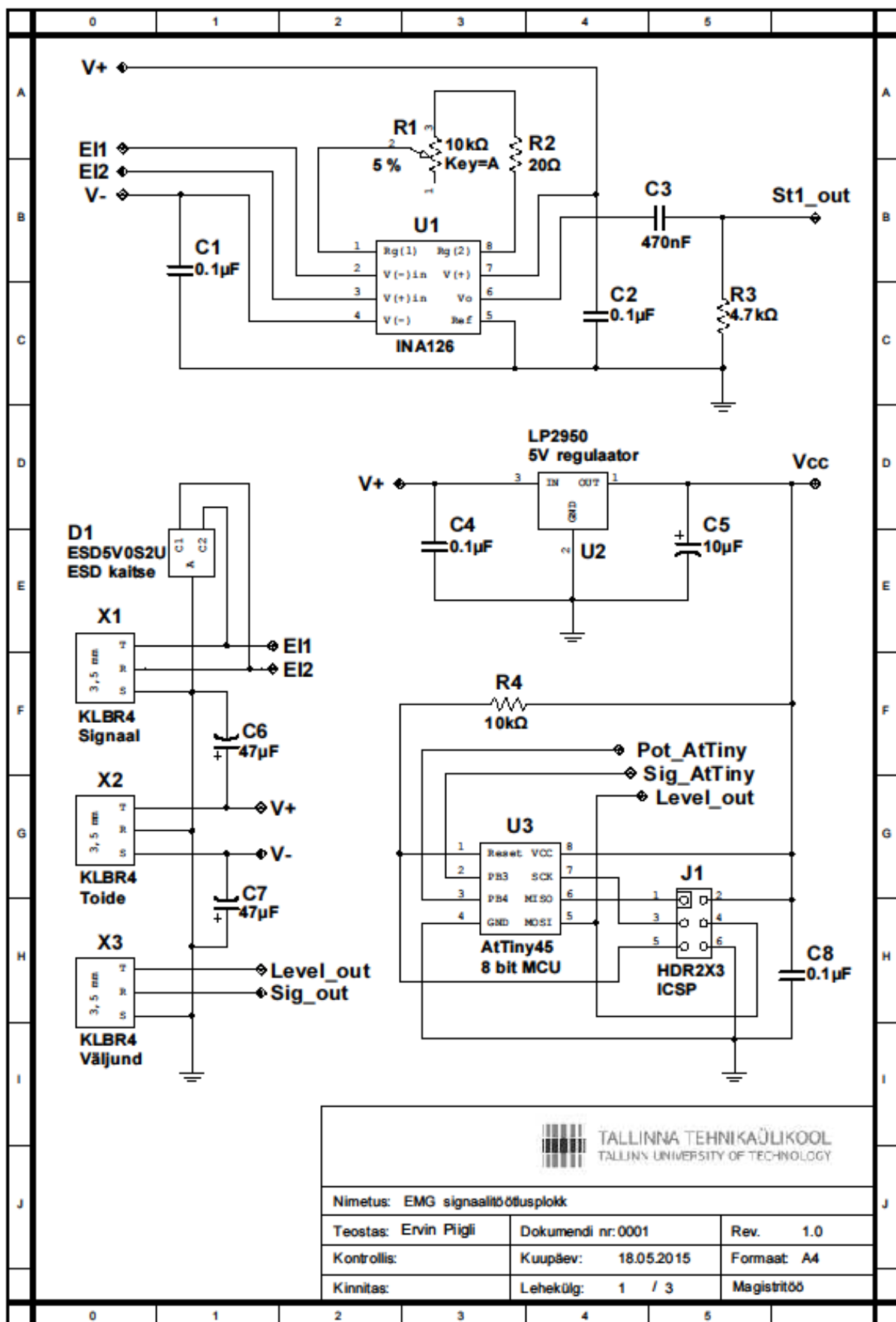
Lisa 2. Signaalihäällestuse abiseadme elektroonikakomponendid

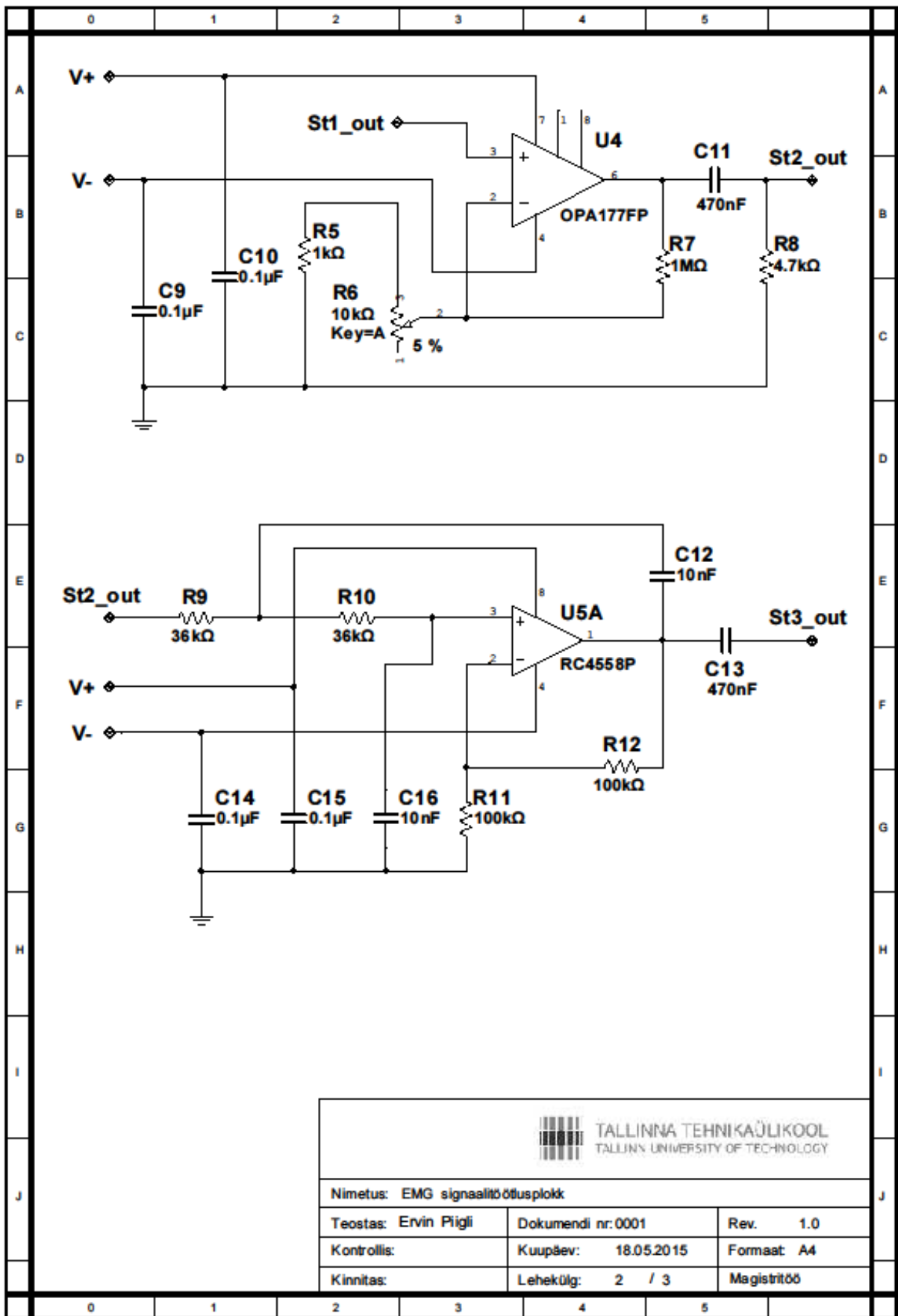
Tellimus	Komponendi kirjeldus	Kogus	Märgistused	Min	Max	Tk	Kokku
9843698	Diod, 1N4448	5	D1, D2, D3, D4, D5	-65	100	0,030	0,15
1870945	Kondensaator_E, 0.1 μ F	4	C7, C8, C10, C11	-40	85	0,194	0,78
1871015	Kondensaator_E, 1 μ F	1	C9	-40	105	0,062	0,06
1871004	Kondensaator_E, 10 μ F	1	C5	-40	105	0,071	0,07
9411887	Kondensaator_K, 0.1 μ F	1	C1	-25	85	0,146	0,15
9411674	Kondensaator_K, 22pF	2	C2, C3	-25	85	0,061	0,12
1679407	Kondensaator_K, 470nF	2	C4, C6	-55	105	0,160	0,32
1469640	Kristall, 16 MHz	1	X1	-10	70	0,640	0,64
2063168	LCD ekraan	1	puudub	-20	70	8,530	8,53
1972087	MCU, AtMega328P	1	U1	-40	85	2,580	2,58
1435775	Navigaator, SKQUCAA010	1	U4	-30	85	1,530	1,53
9558560	NPN transistor, BC547C	1	Q1	-55	150	0,091	0,09
2431939	Pesa paneelil, 3,5 mm	1	puudub	-30	85	0,460	0,46
7173989	Pingeregulaator, LM7805CT	1	U2	-20	85	0,510	0,51
8391289	Pistik, DSUB9F	1	J8	NA	NA	1,280	1,28
1593417	Pistik, HDR1X2	1	J6	-40	105	0,270	1,35
	Pistik, HDR1X3	7	J1, J1_1, J2, J2_1, J5, J4				
	Pistik, HDR1X8	2	J3				
9339027	Takisti, 0 Ω	1	R10	-55	155	0,029	0,03
9342419	Takisti, 10k Ω	8	R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R12	-55	155	0,045	0,36
9343253	Takisti, 4.7k Ω	3	R8, R9, R13	-55	155	0,045	0,14
9343261	Takisti, 47k Ω	1	R11	-55	155	0,046	0,05
1737246	Toitepesa, MJ-179PH	1	J7	NA	NA	0,640	0,64
1648737	TTL to RS232, MAX232E	1	U3	-40	85	1,120	1,12
1123881	Ümberlülit, STSSS9132	1	X2	-40	85	1,650	1,65
1733405	Distantspuksid	6	puudub	NA	NA	0,089	0,53

Summa kokku: 23,2 €

Pistikute HDR1X2, HDR1X3, HDR1X8 valmistamiseks kasutatakse sama ostutoodet, milleks on 2,54 mm 10-st piigist koosnev piikriba – seetõttu on lahtrid ühendatud.

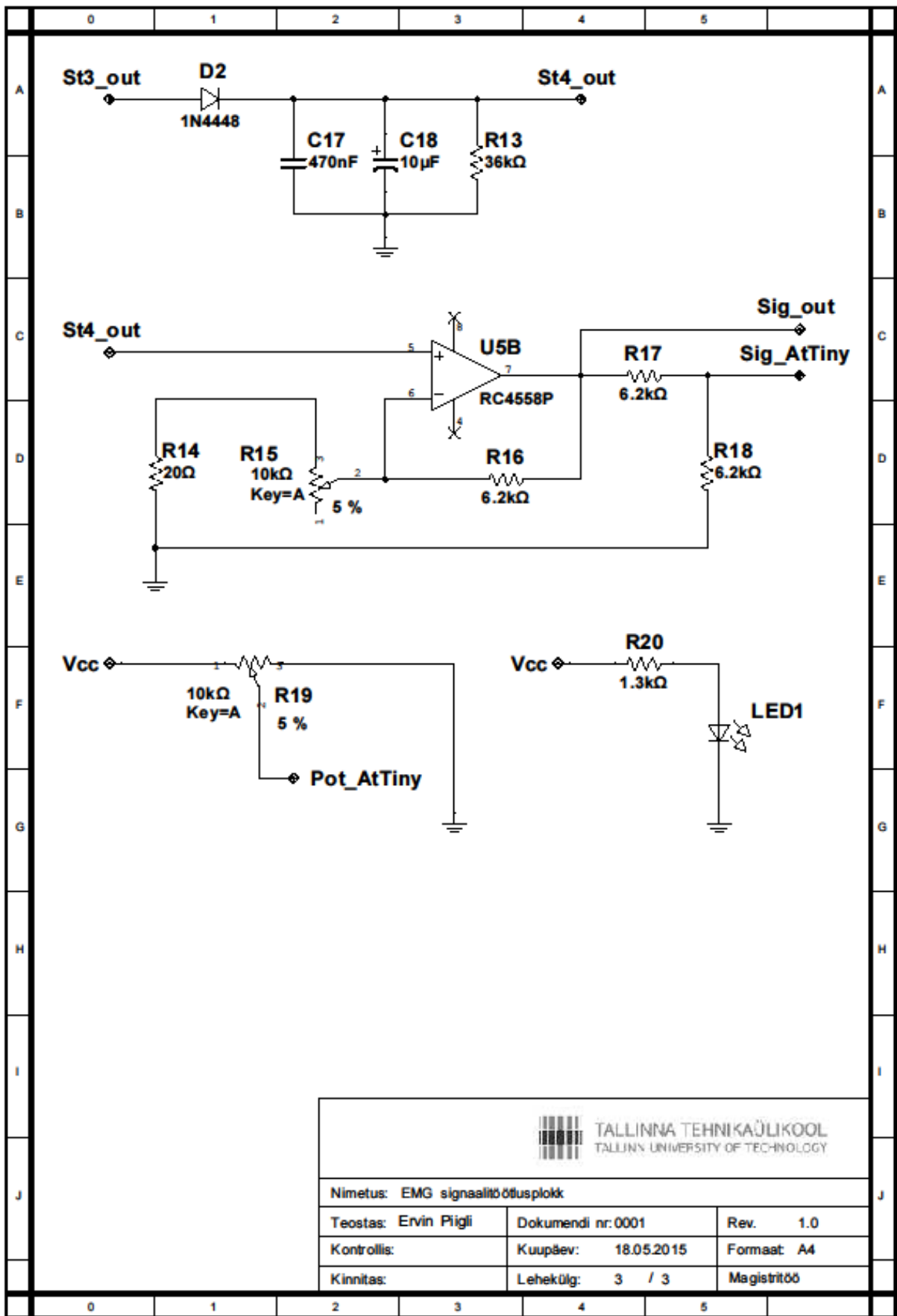
Lisa 3. EMG signaalitöötlusploki elektripõhimõtteskeemid





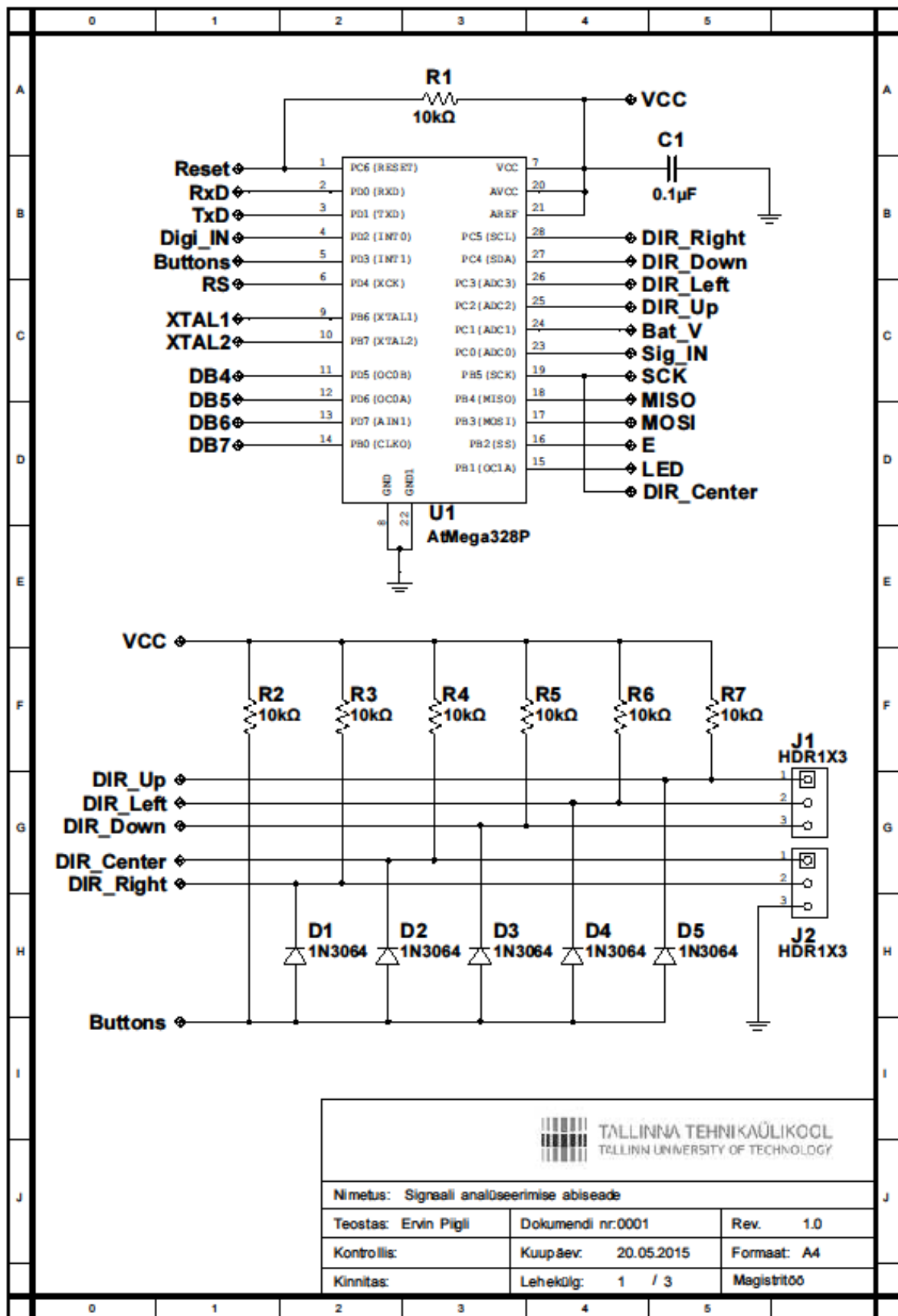
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

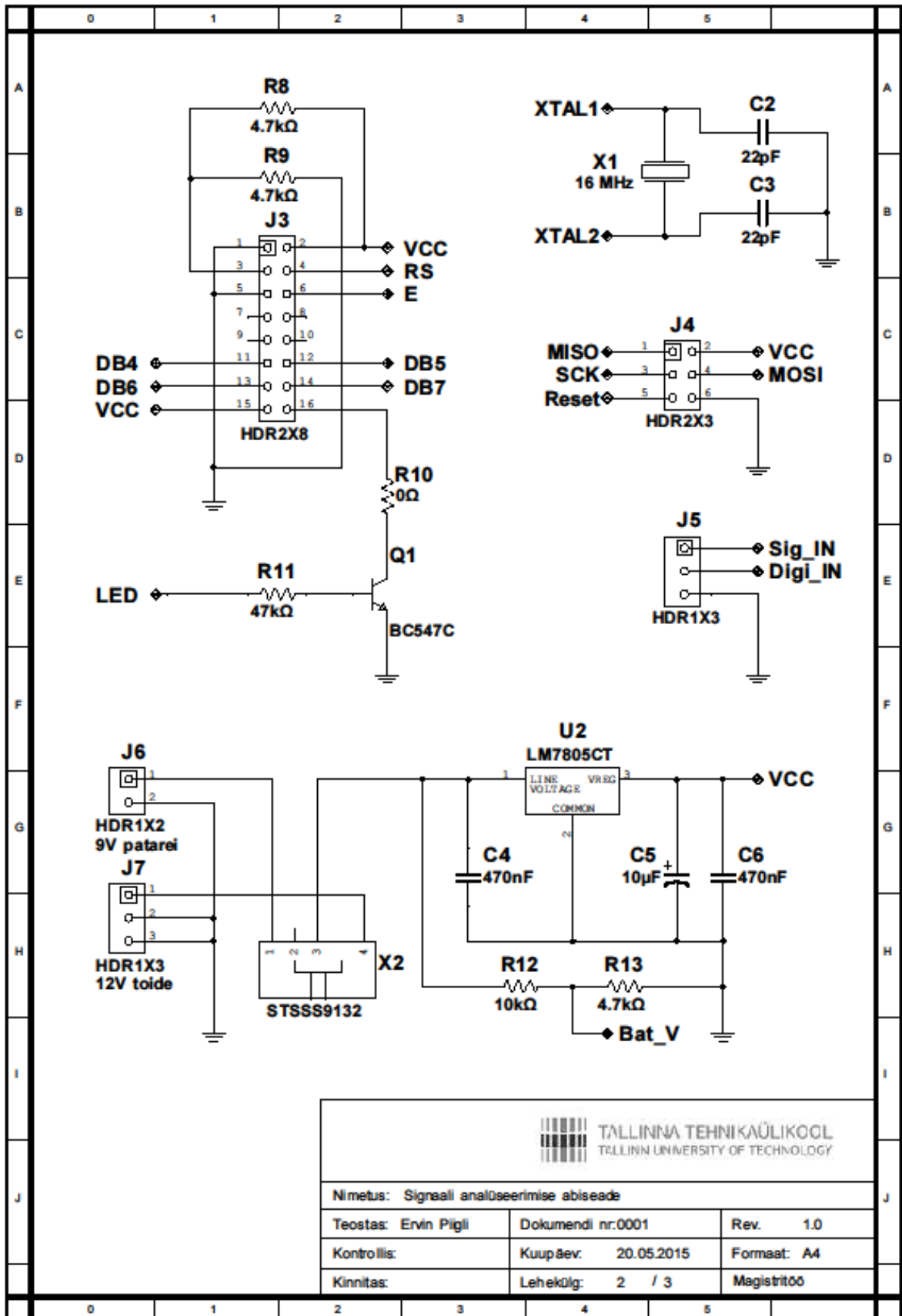
Nimetus: EMG signaalitöötlusplakk		
Teostas: Ervin Pigi	Dokumendi nr: 0001	Rev. 1.0
Kontrollis:	Kuupäev: 18.05.2015	Formaat: A4
Kinnitas:	Lehekõlg: 2 / 3	Magistritöö



 TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY		
Nimetus: EMG signaalitöötlusplakk		
Teostas: Ervin Pliigi	Dokumendi nr: 0001	Rev. 1.0
Kontrollis:	Kuupäev: 18.05.2015	Formaat: A4
Kinnitas:	Lehekõlg: 3 / 3	Magistritöö

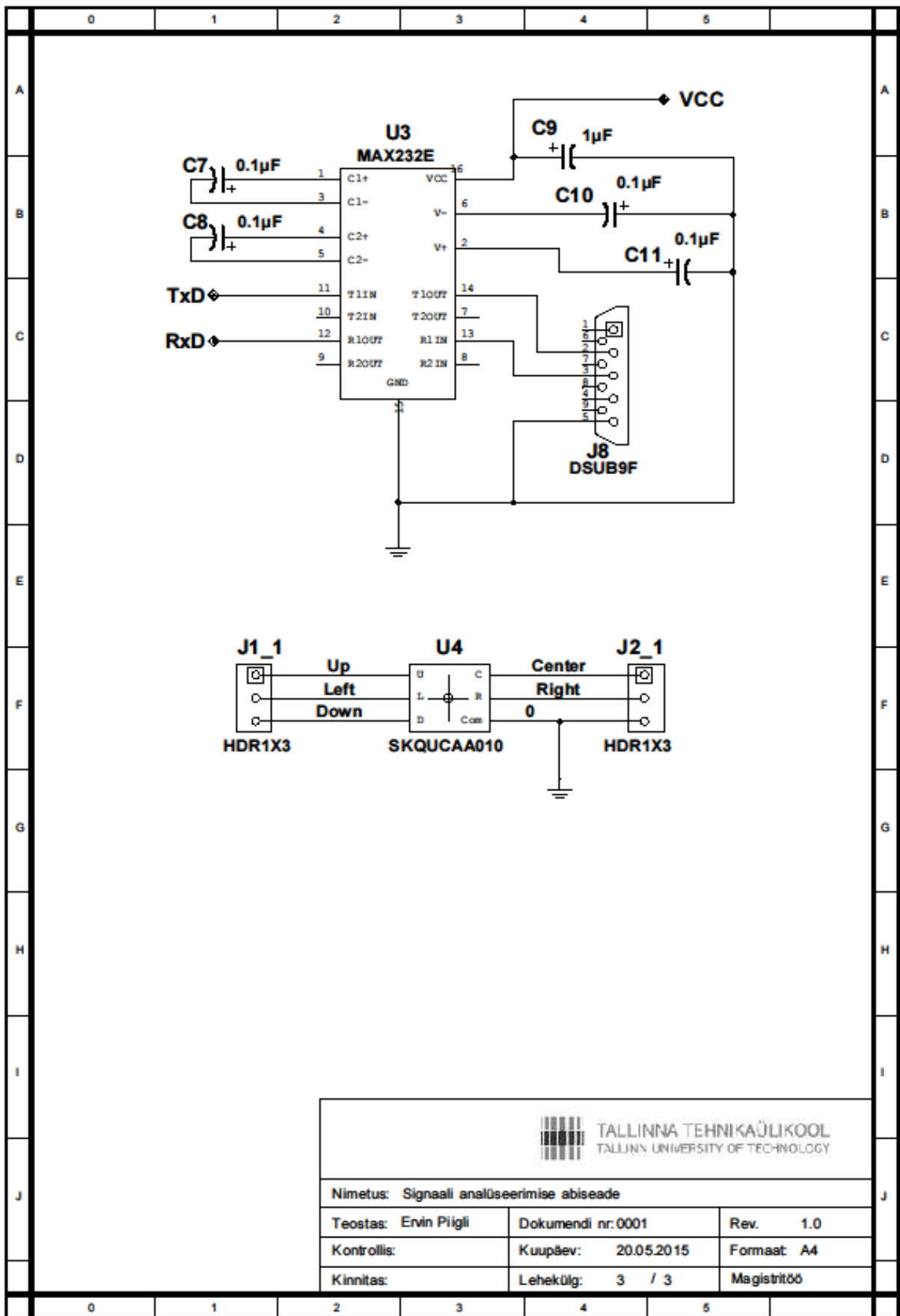
Lisa 4. Signaalihäällestuse abiseadme elektripõhimõtteskeemid





TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Nimetus: Signaali analüüsimise aliseade		
Teostas: Ervin Pigi	Dokumendi nr:0001	Rev. 1.0
Kontrollis:	Kuupäev: 20.05.2015	Formaat: A4
Kinnitas:	Lehekõlg: 2 / 3	Magistritöö



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Nimetus: Signaali analüüsimise abiseade

Teostas: Ervin Piigli

Dokumendi nr: 0001

Rev. 1.0

Kontrollis:

Kuupäev: 20.05.2015

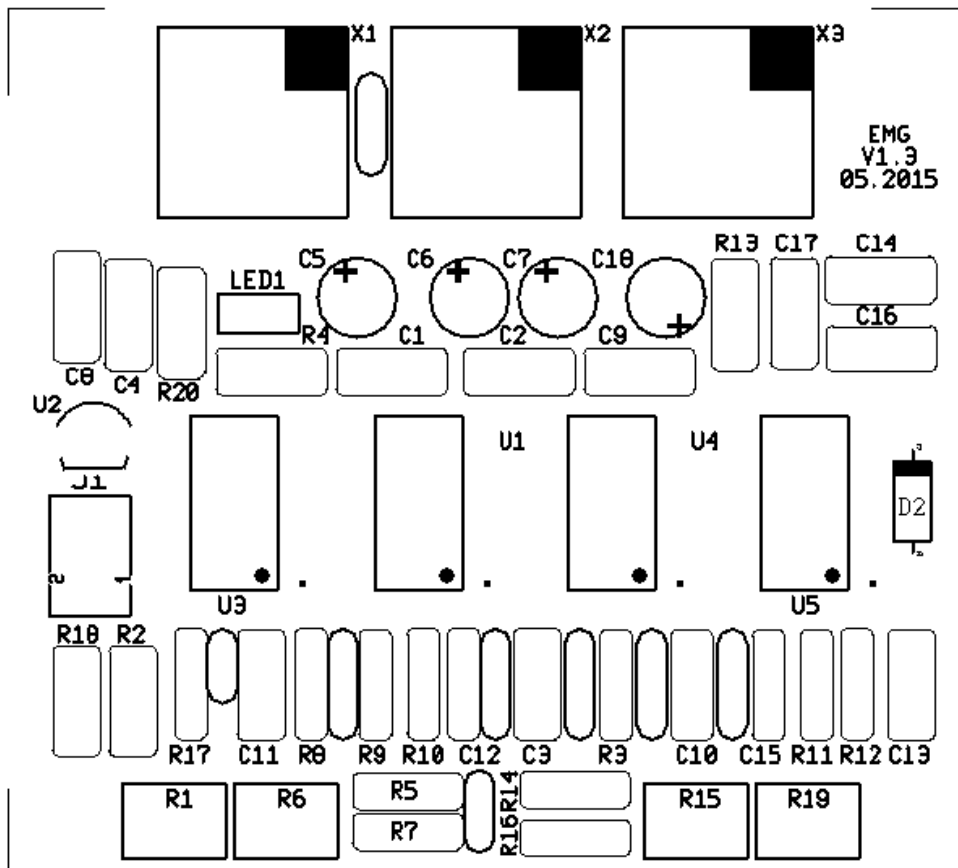
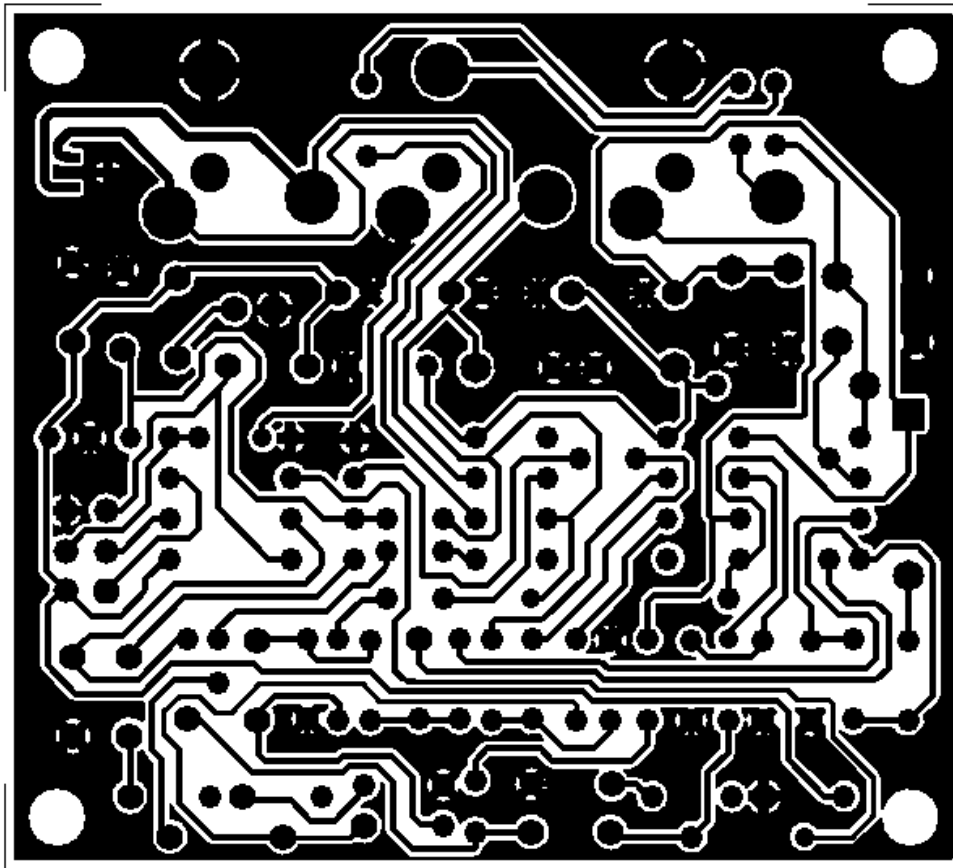
Formaat: A4

Kinnitas:

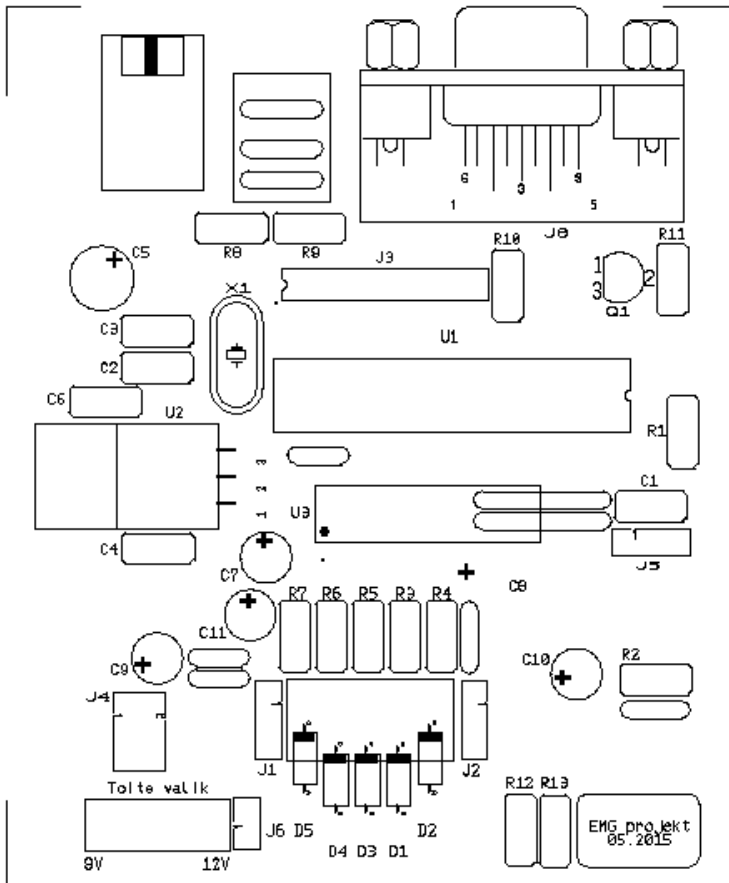
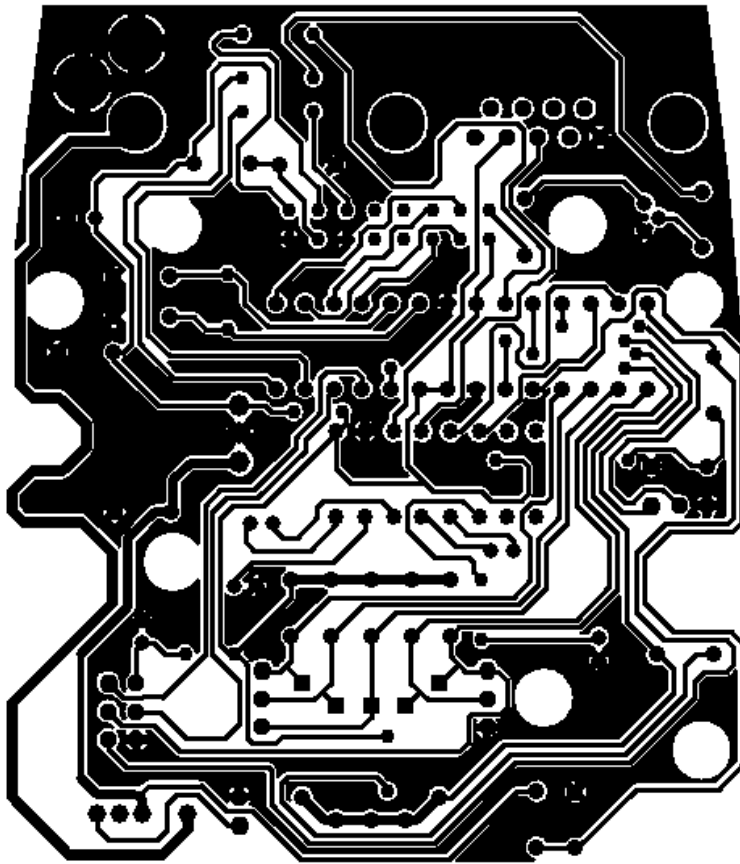
Lehekülg: 3 / 3

Magistritöö

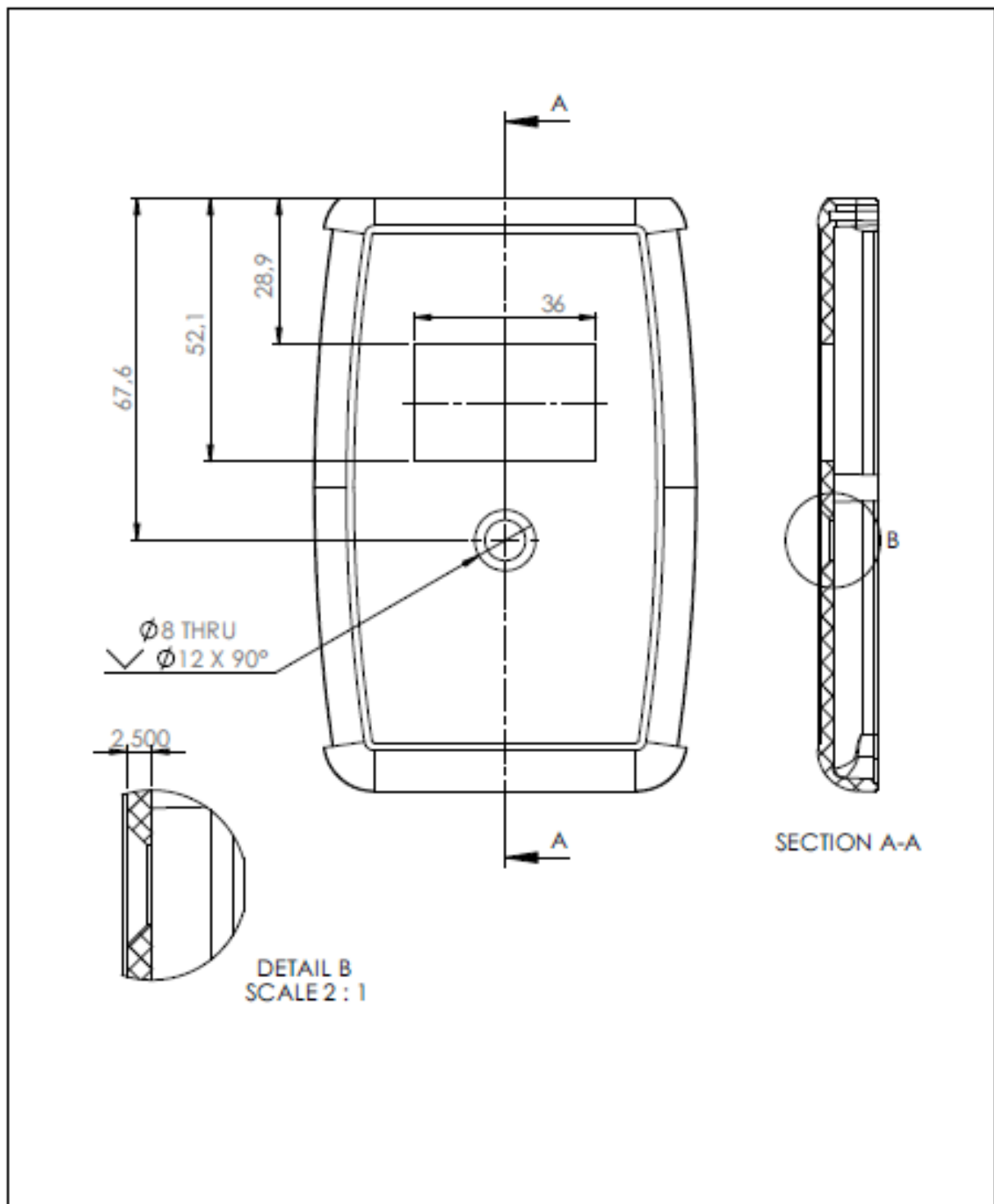
Lisa 5. EMG signaalitöötlusploki vasekiht ja märgistuse kiht



Lisa 6. Signaalihäällestuse abiseadme vasekiht ja märgistuse kiht

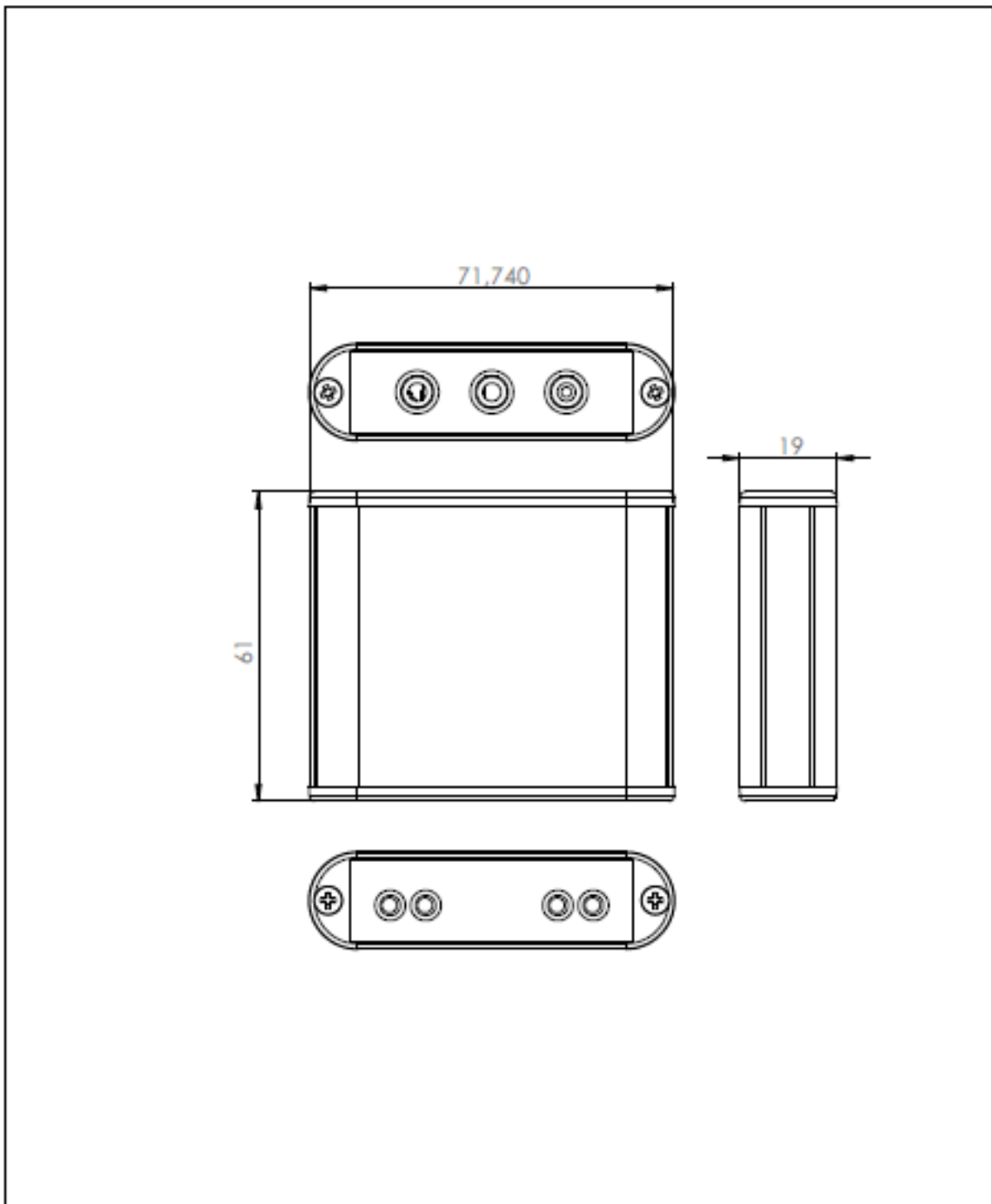




Lisa 7. Signaalihäälestuse abiseadme korpuse esipaneel



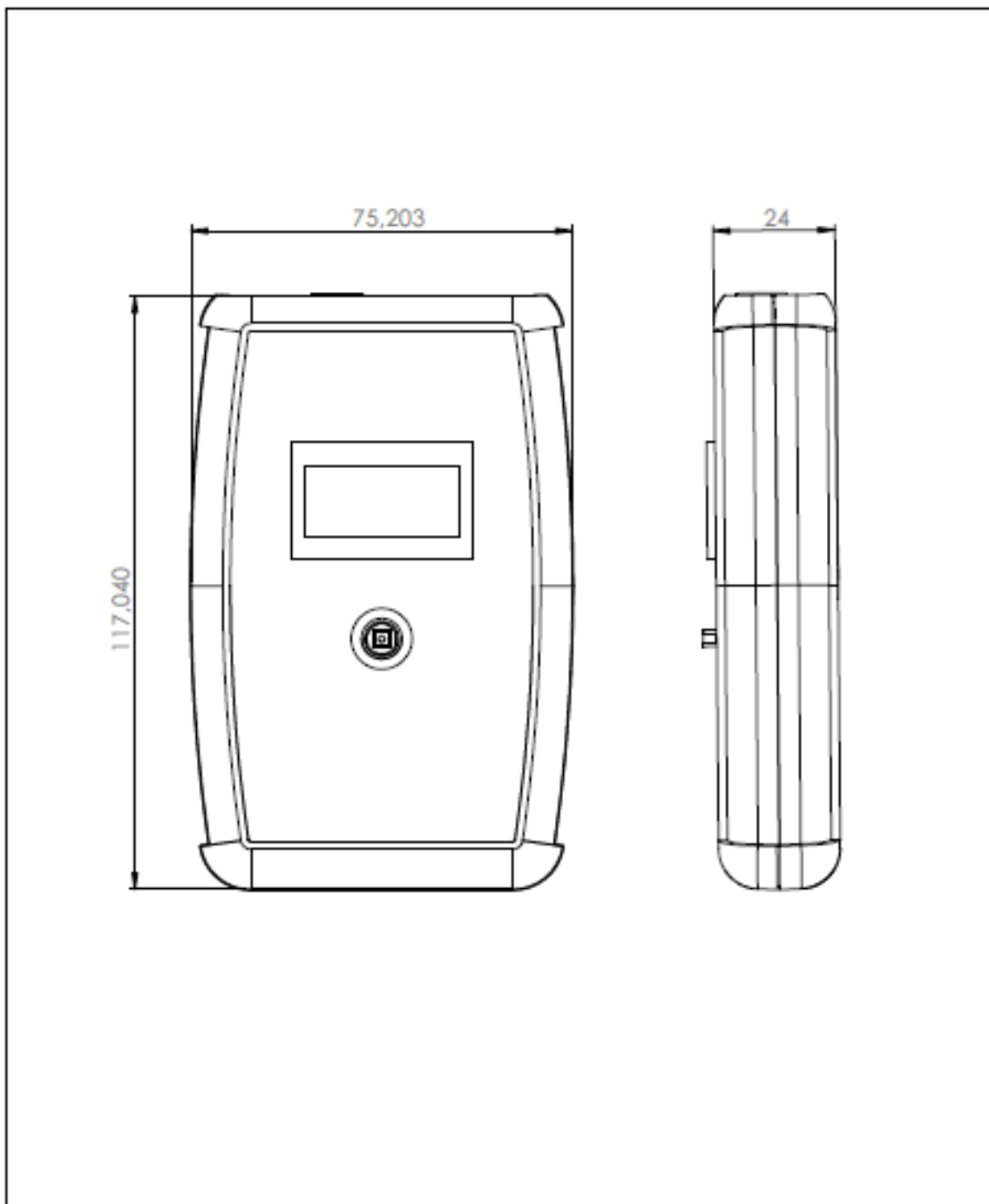
	Materjal: ABS plastmass	Märkused:	Mas: 0,023 kg	Mõõt: 1:1 (A4)
Teostas	Ervin Piipli	Nimetus: Signaalihäälestuse abiseadme esipaneel		
Kontrollis		Projekt: Magistritöö		
Kinnitas		Tähis:		
	Mehatronika Instituut	Kuupäev: 20.05.2015	Leht: 1/1	Revision: Rev.1



Lisa 8. EMG signaalitöötlusploki gabariitmõõtmed



	Materjal:	Märkused:	Mass:	Mõõt: 1:1 (A4)
Teostas	Ervin Piipli	Nimetus: EMG signaalitöötlusploki gabariitmõõtmed		
Kontrollis		Projekt:	Tähis:	
Kinnitas		Magistritöö	Leht:	Revision:
	Mehhatroonikainstituut	Kuupäev: 20.05.2015	1/1	Rev.1

Lisa 9. Signaalihäällestuse abiseadme gabariitmõõtmed

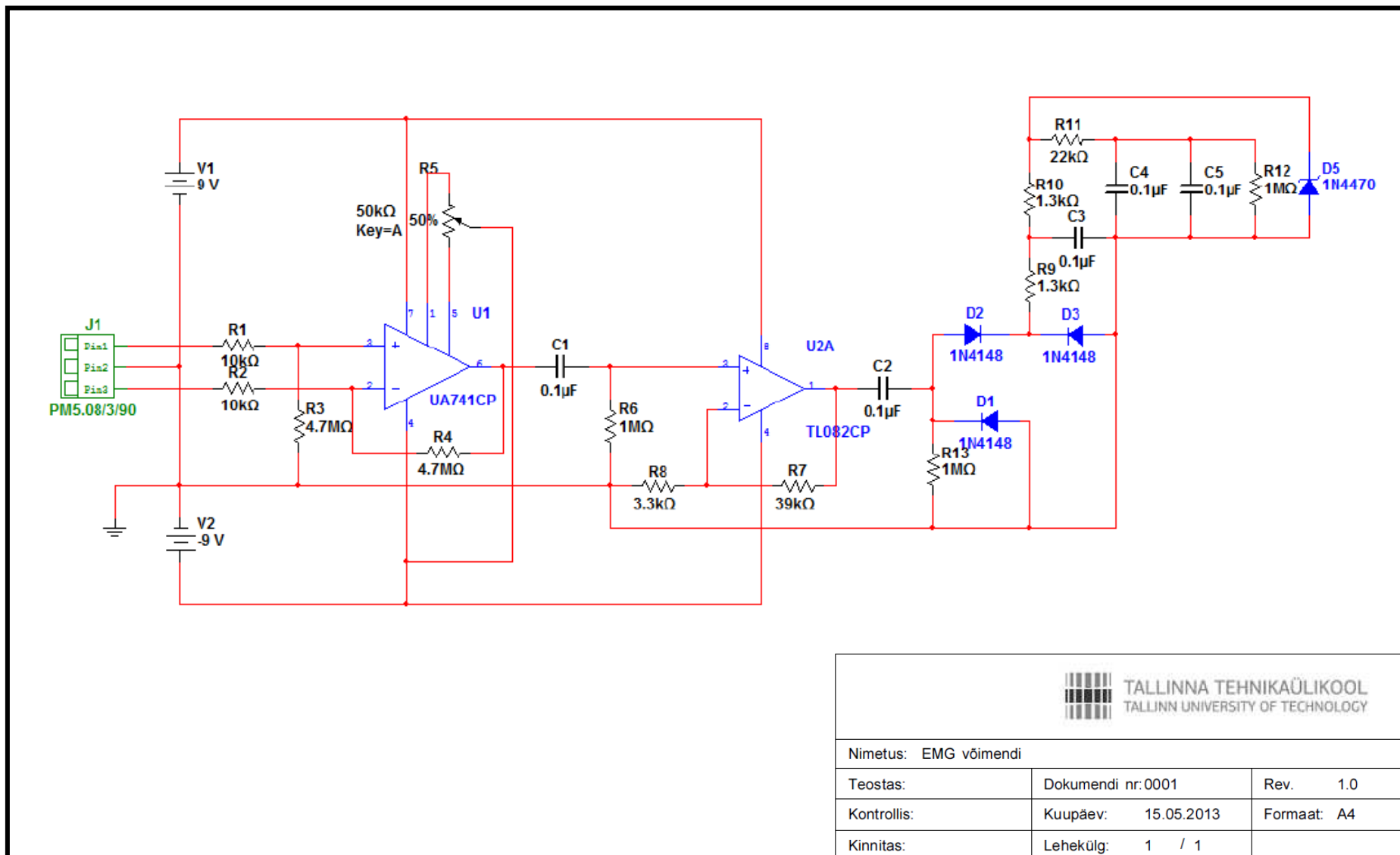


	Materjal:	Märkused:	Mass:	Mõõt: 1:1 (A4)
Teostas	Ervin Pügli	Nimetus: Signaalihäällestuse abiskeemi gabariitmõõtmed		
Kontrollis				
Kinnitas		Projekt: Magistritöö	Tähis:	
 130198	Mehhatroonikainstituut	Kuupäev: 20.05.2015	Leht: 1/1	Revision: Rev.1

Lisa 10. Korpuste keskkonnaanalüüsi indikaatorite koondtabel

Keskonna- indikaator	Boksiidi kaevandamine	Alumiinium- oksiidi tootmine	Anoodmaterjali tootmine	Elektro- lüüsimine	Alumiiniumi valamine	Transportimine	Alumiiniumi vormimine	Transportimine tootmise vältel	Korpuse töötlemine	Toote kliendile transport	Alumiiniumi taaskasutamine	Kokku
Korpuse valmistamine lehtalumiiniumi töötlemise teel												
APD	4,45E-07	2,23E-05	1,79E-05	6,83E-05	2,34E-06	5,95E-07	3,33E-06	1,22E-01	3,25E-06	3,89E-02	1,05E-03	1,26E-01
AP	8,90E-04	1,22E-01	3,84E-02	5,79E-01	0,00E+00	2,40E-02	4,83E-02	8,10E-03	1,69E-01	2,58E-03	6,99E-05	6,02E+00
EP	2,95E-03	9,76E-03	4,79E-03	2,08E-02	9,23E-03	7,90E-04	4,22E-03	1,62E-03	9,08E-03	5,16E-04	1,40E-05	4,80E-01
GWP	2,30E-01	4,12E+01	8,48E+00	1,71E+02	4,60E+00	1,05E+00	1,54E+01	1,76E+00	3,96E+01	5,61E-01	1,52E-02	3,14E+03
ODP	3,60E-08	4,20E-07	6,07E-07	1,10E-05	9,62E-08	1,83E-09	5,29E-07	3,04E-07	2,58E-06	9,68E-08	2,62E-09	5,46E-05
POCP	5,58E-05	7,80E-03	1,10E-02	2,97E-02	1,06E-03	1,28E-03	5,03E-03	2,70E-04	1,03E-02	8,60E-05	2,33E-06	5,90E-01
FWC	5,89E-02	1,88E-01	8,08E-02	4,60E-01	2,23E-01	NA	2,86E-01	NA	NA	NA	NA	1,32E+00
Korpuse valimine ostutoodete seast (ekstrudeeritud alumiiniumprofiil)												
APD	6,80E-08	3,40E-06	2,21E-06	1,04E-05	3,57E-07	5,95E-07	1,56E-07	X	2,01E-07	3,03E-02	4,99E-06	7,11E-04
AP	1,36E-04	1,86E-02	4,75E-03	8,82E-02	0,00E+00	2,40E-02	8,11E-03	X	1,04E-02	2,01E-03	6,39E-03	1,06E+00
EP	4,50E-04	1,49E-03	5,93E-04	3,16E-03	1,41E-03	7,90E-04	4,37E-04	X	5,60E-04	4,02E-04	5,30E-04	8,31E-02
GWP	3,51E-02	6,28E+00	1,05E+00	2,60E+01	7,02E-01	1,05E+00	1,91E+00	X	2,45E+00	4,37E-01	3,65E+00	5,47E+02
ODP	5,50E-09	6,41E-08	7,51E-08	1,67E-06	1,47E-08	1,83E-09	1,24E-07	X	1,60E-07	7,54E-08	4,98E-08	9,04E-06
POCP	8,52E-06	1,19E-03	1,36E-03	4,52E-03	1,62E-04	1,28E-03	4,95E-04	X	6,35E-04	6,70E-05	6,66E-04	1,03E-01
FWC	9,00E-03	2,87E-02	1,00E-02	7,00E-02	3,40E-02	NA	5,43E-01	X	NA	NA	NA	1,76E-01

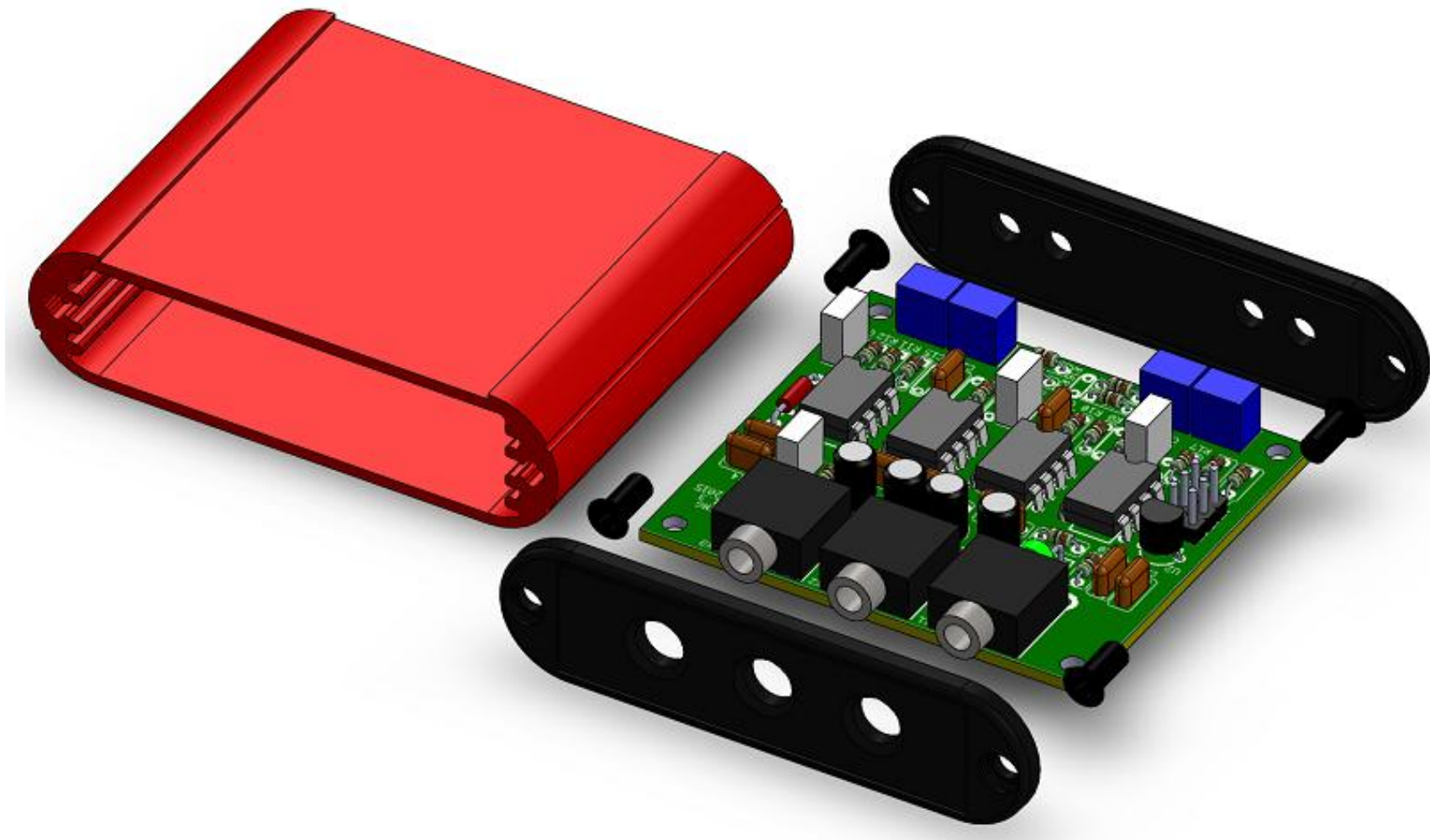
Lisa 11. Aines MHK0071 koostatud EMG võimendi elektripõhimõtteskeem



 TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY		
Nimetus: EMG võimendi		
Teostas:	Dokumendi nr: 0001	Rev. 1.0
Kontrollis:	Kuupäev: 15.05.2013	Formaat: A4
Kinnitas:	Lehekülg: 1 / 1	

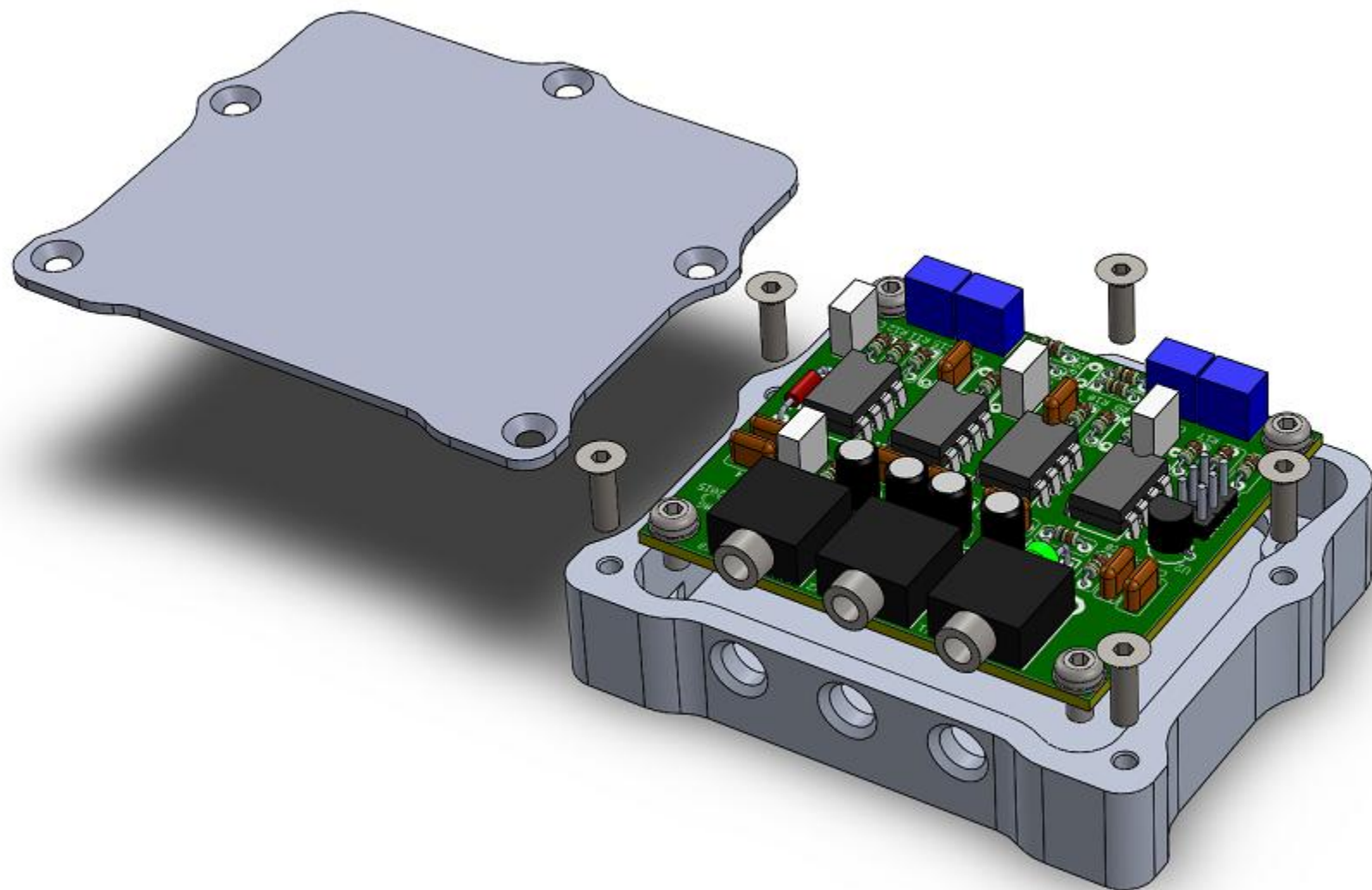
Lisa 12. Signaalitöötlusploki plahvatusvaade 1

Korpus ekstrudeeritud alumiiniumprofiilist



Lisa 13. Signaalitöötlusploki plahvatusvaade 2

Korpus välja töödeldud lehtalumiiniumist



Lisa 14. Signaalihäällestuse abiseadme plahvatusvaade

