

TARTU ÜLIKOOL  
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND

Jaanus Kalde

**PIESOELEKTRILISE MOOTORI JUHTSEADE  
KUUPSATELLIIDILE**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: Viljo Allik

Tartu 2012

# Sisukord

Lühendid.....	3
1. Sissejuhatus .....	4
2. Taustakirjeldus .....	6
2.1. Eelmine lahendus.....	8
3. Nõuded .....	10
3.1.1. Mehhaanika.....	10
3.1.2. Elektroonika.....	11
4. Tehniline lahendus.....	13
4.1. Integreeritud mootorijuhid.....	15
4.2. Diskreetsetest komponentidest lahendus.....	16
4.2.1. Pingeallikas.....	16
4.2.2. Voolu piiramine.....	16
4.2.3. Lülitav element.....	18
4.2.4. Elektromagnetiliste häirete vältimine.....	19
4.3. Mikrokontroller.....	21
4.4. Trükkplaadi disain.....	22
4.5. Programmi kood.....	24
5. Testimine.....	25
6. Kokkuvõte.....	26
7. Viited.....	27
8. Abstract.....	29
Lisa 1 – Elektriskeem.....	30
Lisa 2 – Trükkplaat.....	33
Lisa 3 – Programmi kood.....	34
Lisa 4 – Elektroonikakomponentide tabel.....	40
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks .....	41

## Lühendid

**FPGA** – *Field-Programmable Gate Array* – Väliprogrammeeritavat väravamassiiv

**BGA** – *Ball Grid Array* – Komponenti korpus, mis ühendub trükkplaadi külge tinapallidega

**SOT-25** – *Small Outline Transistor* – 3 mm x 2,8 mm mõõtudega viie jalaga komponendi korpus

**MOSFET** - *Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect transistor* – Isoleeritud paisuga väljatransistor

**SO-8** – *Small Outline* – Kaheksa jalaga pindmonteeritav 1,27 mm jalavahega komponendi korpus

**TSSOP-38** - *Thin-Shrink Small-Outline Package* – 38 jalaga pindmonteeritav pakend

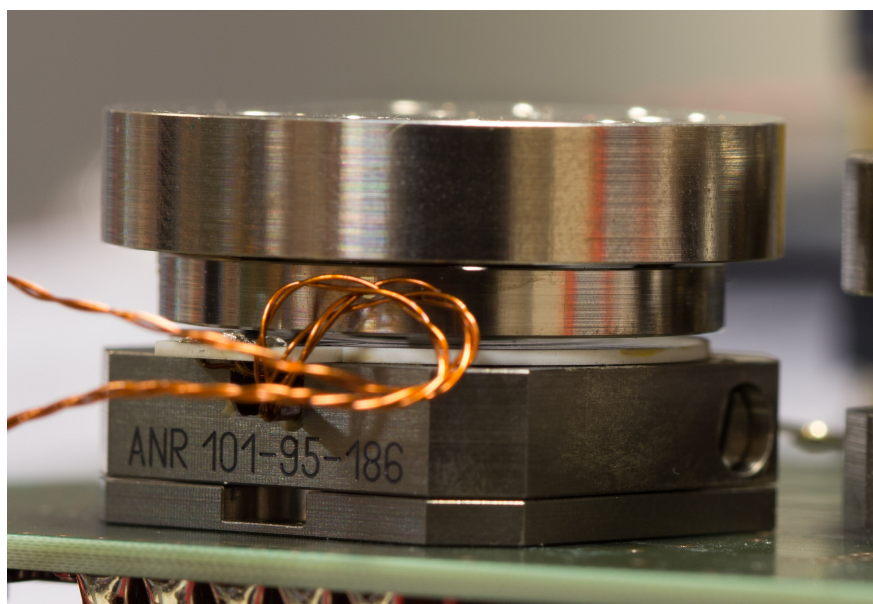
**F-RAM** – *Ferroelectric Random-Access memory* - Ferroelektriline muutmälu

**SPI** – *Serial Peripheral Interface Bus* – Neljajuhtmeline jadasiin

# 1. Sissejuhatus

Eesti esimese tudengisatelliidi ESTCube-1 ja Soome esimese tudengisatelliidi Aalto-1 üheks teaduslikuks eksperimendiks on elektrilise päikesepurje testimine. Eksperimendi käigus keritakse satelliidist välja peenikestest alumiiniumjuhtmetest koosnev struktuur. Eesmärgiks on testida uudse traatstruktuuri lahti kerimist. Kui traatstruktuuri kerimine on õnnestunud laetakse see kõrgele pingele ning hinnatakse sellele mõjuvat laetud osakeste poolt põhjustatavat jõudu. Mõlema projekti eksperimendi lahendus on sisuliselt identne ja erinevused on vaid elektroonilistes suhtlusprotokollides ja mehhaaniliste kinnituste asukohtades. [7]

Traatstruktuuri lahti kerimiseks kasutatakse Attocube Systems firma poolt toodetud piezoelektrilist mootorit ANR101 (Joonis 1). [3] Mootori küljes on alumiiniumist rull, mille peale on keritud alumiiniumjuhtmetest koosnev struktuur. Rulli ja elektroonika vahel on harjased, et peale lahtikerimise lõppu saaks traadi ühendada kõrgepingeallikaga. Ümber mootori ja rulli on plastist mehhaaniline kinnitus, mis hoiab traati poolilt maha tulemast ning fikseerib kuni lahtikerimise alguseni raskuse satelliidi külge.



*Joonis 1: Attocube Systemsi piezoelektriline mootor ANR101*

Aalto-1 satelliidi jaoks oli vaja välja arendada piesomootori juhtseade. ESTCube-1 tarbeks saadi juhtseade Saksa Kosmosekeskuselt. Kuna Saksa Kosmosekeskuselt saadud juhtseadme elektroonika ei vastanud täielikult ootustele otsustati Aalto-1 jaoks valmistatavat elektroonikat kasutada ka ESTCube-1 satelliidil. Selle bakalaureusetöö eesmärgiks on arendada välja kuupsatelliitidele mõeldud piesoelektrilise mootori juhtelektroonika. Määrata nõuded, testida võimalikke lahendusi, valmistada prototüüp ning parandatud lõppversioon ja dokumenteerida see hilisemaks kasutamiseks. Töö juhtseadme loomiseks algas 2012 aasta suve alguses. Seade valmis koostöös juhendaja ja ülejäänud ESTCube-1 meeskonnaga.

## 2. Taustakirjeldus

Kuupsatelliit on 10 cm x 10 cm x 10 cm mõõtudega ja 1,33 kg kaalupiiranguga minisatelliidi standard. Kuupsatelliidi standard on üha populaarsemaks muutuv uurimisplatvorm, pakkudes standardiseerimisest tulenevat odavat hinda ja sõltumatust orbiidile lennu pakkujast.[1]

Satelliidid on orbiidil mikrogravitatsioonilises vaakumkeskkonnas, kus on kõrgem radiatsioonitase. See pakub küll häid võimalusi eksperimentideks, aga nõuab tehnikalt karmimatele keskkonnatingimustele vastupidamist kui eksperimente maa peal läbi viies. Vaakumi tõttu ei ole võimalik kasutada lahtiseid vedelikke, näiteks tavapäraseid määrdeaineid. Lisaks puudub soojusvahetus konvektsiooni teel - kogu tekkiv soojus tuleb ära juhtida vahetu ülekandega või kiirgusena, mis seab elektroonikale lisanõudeid. Tuleb taluda ka orbiidile jõudmisega kaasnevaid tugevaid kiirendusi ja vibratsioone, mis võivad rebida ja lõhkuda mehhaanilisi komponente.

Kuupsatelliidi mõõtmed on piiratud ja sellest tulenevalt on piiratud ka võimalik kasutatava energia hulk. Päikesepaneelide võimsus ja akude mahutavus on piiratud. Mida rohkem energiat erinevad satelliidi alamsüsteemid vajavad, seda kauem peab energiat koguma ja seda kauem võtab eksperiment aega. Mida kiiremini on võimalik eksperiment läbi viia, seda väiksem on tõenäosus, et satelliidiga juhtub midagi, näiteks kokkupõrge mikrometeoroidiga või elektroonikarike. Lisaks tuleb kogu kasutatud energia satelliidist soojuskiirgusena ära kiirata, mis muudab ülesande raskemaks termokontrolli seisukohast. Sellest tulenevalt peaks kogu elektroonika olema võimalikult madala võimsustarbiga.

Kõik kuupsatelliidid on seni olnud Maalähedastel orbiitidel, kus Maa magnetväli kaitseb satelliiti suurema osa päikeselt tuleva radiatsiooni eest. Maa magnetvälja saab kasutada satelliidi asendi määramiseks magnetomeetrite ja asendi mõjutamiseks elektromagnetpoolide abil. Enamikel missioonidel on satelliidi asendi määramine ja muutmine vajalik, nagu näiteks kanderaketist eraldumisest tekkiva pöörlemise peatamiseks, antennide ja kaamerate maa poole hoidmiseks või päikesepaneelide päikese poole hoidmiseks. [2] Selleks, et magnetomeetrid ja

elektromagnetpoolid kõige suurema kasuteguriga ja lihtsamalt töötaksid, oleks hea, kui kogu ülejäänud satelliit oleks võimalikult mittemagnetiline.

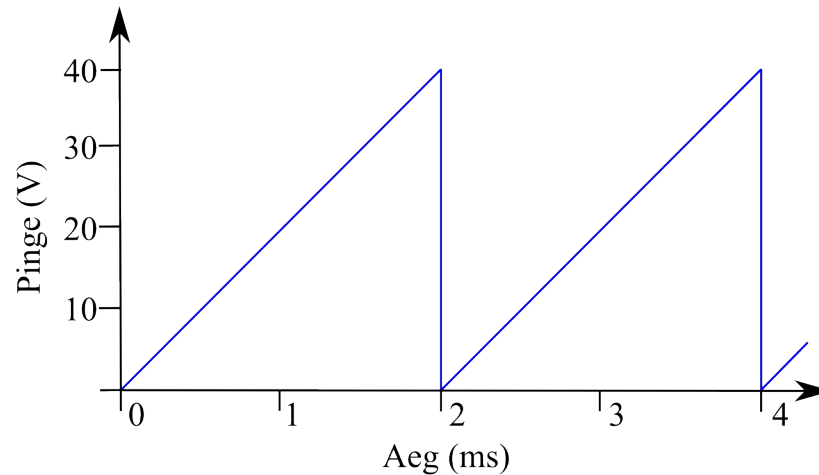
Piesoelektrilised mootorid kasutavad elektrienergia mehhaaniliseks muutmiseks piesoelektrilist pöördefekti - piesoelektrilise keraamika kujumuutust sellele rakendatud pinge muutusel. Kuna piesoelektrilised mootorid ei kasuta mehhaanilise jõu tekitamiseks elektromagnetvälja, ei pea neis olema magneteid ega magnetilisi materjale. Kuna mootoris ei kasutata magnetilisi materjale, siis on mootor võimeline töötama ka ülitugevas magnetväljas. Lisaks toodetakse piesomootoreid, mis töötavad väga madalatel temperatuuridel. Piesoelektriline mootor ANR101 on kasutatav ka 4 kelvini juures ning ülimaldala rõhu all. Piesomootorid saavad liikuda väga täpselt, tagasisidet kasutades isegi kuni 1 mikrokraadiste (0,0036 kaaresekundiste) sammudega. [3]

Üks võimalikest piesoelektrilise materjali paisumise ja kokkutõmbumise pöördliikumiseks muutmise viisidest on hõõrdejõudu kasutatav meetod. Ühes suunas liikumiseks suurendatakse pinget piesoelektrilisel keraamil aeglaselt, selle tulemusena suureneb materjal aeglaselt ja tänu hõõrdumisele liigub ka rootor edasi. Tagasi algolekusse saamiseks vähendatakse pinget ning seeläbi ka suurust piisavalt kiirelt, et rootor jääks paigale. [3]

Sellist aeglaselt tõusvat ja kiirelt langevat signaali nimetatakse saehammassignaali. Sellist tüüpi mootori sammupikkus on sõltuv mootorile rakendatava pinge amplituudist. Igale hambale vastab üks samm, ehk siis mootori pöörlemise kiirus on sõltuv hammassignaali sagedusest ja sammu pikkuse kaudu ka amplituudist. Maksimaalne võimalik pöördemoment on sõltuv signaali amplituudist ja kiirema langusega serva langemiskiirusest.

Selleks, et mootor vastassuunas pöörlema panna, tuleb kasutada pööratud hammassignaali - kõigepealt kiire pinge tõstmine ja seejärel aeglane langetamine. Klemmide äravahetamine tekitab küll vastava signaali, aga vastupidise polaarsusega pinge võib rikkuda mootori sees olevaid keraamilisi elemente neid depolariseerides. [4] Maksimaalne sagedus ja amplituud, mida piesoelektrilised mootorid sisendsignaali kasutada suudavad, sõltuvad mootorist. Sagedus võib olla 100 Hz kuni sadu kilohertse ning pinge võib küündida sadade voltideni. Konkreetsetes projektis kasutatava mootori valmistaja soovib kasutada sagedusi suurusjärgus 150 Hz kuni

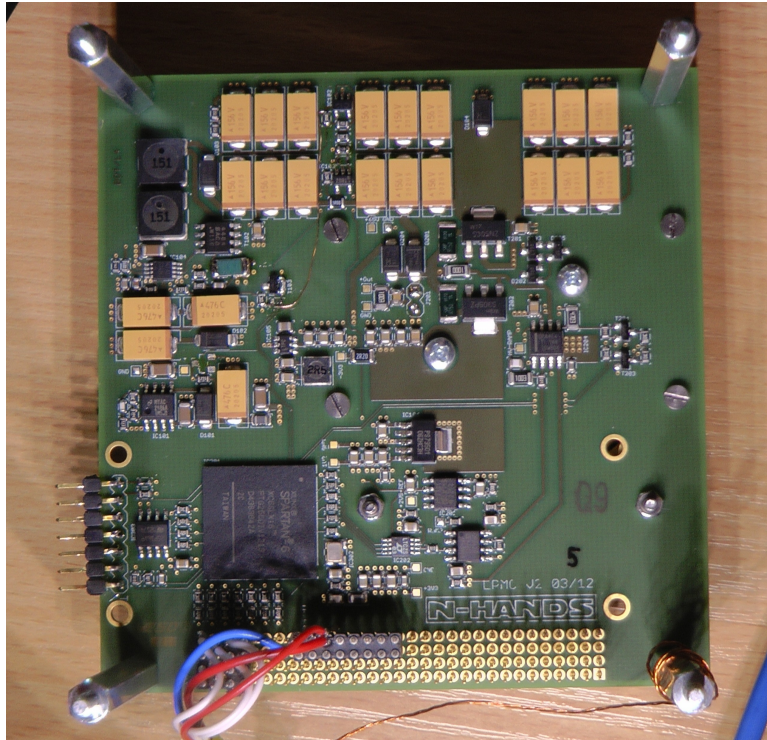
600 Hz. Andmelehes on kirjas pingetevahemik 0 kuni +120 V, aga meie otstarbes soovitati kasutada pinget umbes 40 V (Joonis 2).



Joonis 2: Saehammasignaali sagedusega 500 Hz ja amplituudiga 40 V

## 2.1. Eelmine lahendus

ESTCube-1 esialgne piesoelektrilise mootori juhtseade saadi Saksa Kosmosekeskusest. Seade kasutas teiste alamsüsteemidega suhtlemiseks Spartan-6 väliprogrammeeritavat väravamassiivi (FPGA), analoogpinge tekitamiseks välist digitaal-analoogmuundurit ja selle võimendamiseks AB klassi võimsusvõimendit (Joonis 3). Piesomootorile vajaliku pingete tekitamiseks on plaadil 40 V väljundpingega pingetõstja (*boost converter*).



Joonis 3: Saksa Kosmosekeskusest saadud juhtseade

Täpsemal uurimisel selgus, et seadmel on mitmed puudused.

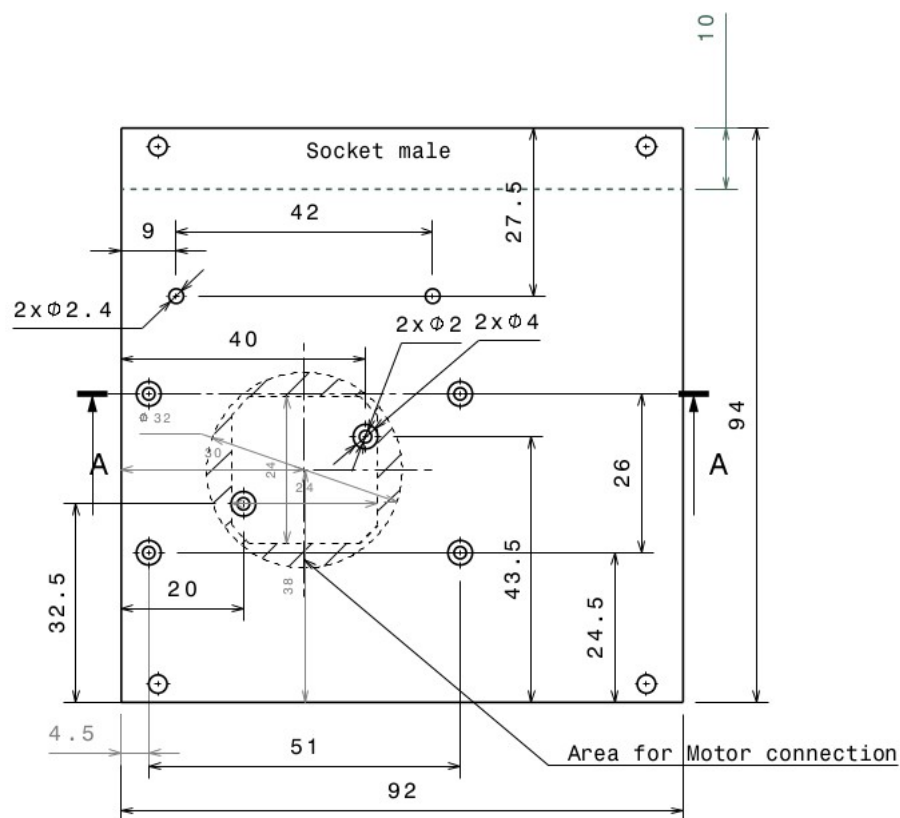
- Väliprogrammeeritav väravamassiiv on temperatuurimuutuste suhtes tundlikus *Micro BGA* korpuses.
- Voolutarve kõikidel siinidel on üsna suur. 3,3 V siinil 400 mA, 5 V siinil 150 mA ja 12 V siinil 320 mA.
- Elektrisüsteemi akude mahutamiseks pole piiratud kõrgusega osa trükkplaadi alumisel küljel.
- Väravamassiivil puuduvad lahtisidestuskondensaatorid, mistõttu kiirgab seade suures tugevat elektromagnetilist müra.
- Süsteemi liigne keerukus muudab selle veatundlikumaks.

## 3. Nõuded

Mootori juhtelektroonika peab olema mehhaaniliselt ja elektrooniliselt ühilduv satelliidi platvormiga, millel seda kasutatakse. Järgnevad nõuded on ESTCube-1 satelliidist lähtuvad. Teistes kuupsatelliitides kasutamiseks peab nii mehhaanikat, elektroonikat kui ka koodi kohandama.

### 3.1.1. Mehhaanika

- Lähtuvalt ESTCube-1 disainist on juhtelektroonika jaoks on kasutada üks trükkplaat mõõtudega 92 mm x 94 mm.
- Trükkplaadi ülemise serva keskel peab olema ESQT-130 pistikühendus – satelliidi peasiin. Siini ülemine ühenduste rida on servast 2 mm kaugusel. [8]
- Kõigis neljas nurgas on 3 mm läbimõõduga maandatud kinnitusavad. Avade keskpunktid peavad olema külgedelt 6 mm ja ülevalt ning alt 3 mm kaugusel.
- Elektrisüsteemi akude tõttu on elektrooniliste ja mehhaaniliste komponentide kõrgus alumise külje keskel piiratud 2 millimeetrini. Piiratud ala vasak serv on trükkplaadi servast 13,4 mm kaugusel ning alumine serv 26,5 mm. Ala mõõtmed on 65 mm x 39 mm.
- Pealmisel küljel, alumiiniumist traatstruktuuri rulli all, ei tohi olla ühtegi trükkplaadist kõrgemale ulatuvat detaili.
- Plaadil peavad olema mootori ja traatstruktuuri rulli kinnitamiseks avad, mille asukohad ja mõõdud on määratud satelliidi disaini poolt ja kirjeldatud dokumendis numbriga ESTCube-RYHB-ES-EP-001 (Joonis 4).



Rear view (Component side)  
Maßstab: 1:1

Joonis 4: Mootori ja traatstruktuuri rulli kinnitusavad dokumendist  
ESTCube-RYHB-ES-EP-001

### 3.1.2. Elektroonika

Mootorijuhitseade peab piesoelektrilise mootori ANR101 sisendklemmide peale tekitama ühepolaarset saehammasignaali sagedusega vahemikus 550 Hz kuni 590 Hz. Tõusva ja langeva serva ajaline kestvus peab erinema vähemalt kümme korda. Signaali suunda peab olema võimalik sisendsignaalidega juhtida. Klemmidel ei tohi olla alalispinget. Signaali amplituud peab olema vähemalt 35 V.

Juhtseadme jaoks on kasutada toiteühendused, mis on olemas satelliidi peasiinil (Tabel 1). Juhtelektroonika peab tarbima vähem kui 2 W võimsust. Ühegi toiteliini voolukõikumised ei tohi kahjustada satelliidi toitesüsteemi ega häirida teisi alamsüsteeme, mis kasutavaid samu toiteliine. Elektroonika ei tohi tekitada teiste alamsüsteemide tööd segavaid elektromagnetilisi häireid. Juhtelektroonika peab olema võimeline töötama koos teiste alamsüsteemidega nende poolt tekitatud lubatavate elektromagnetiliste häirete keskkonnas. Elektroonika peab töötama ülekuumenemiseta madalal orbiidil olevas vaakumkeskkonnas.

<b>Kontakti number</b>	<b>Kirjeldus</b>
17	Tagasiside
29	Juhtsignaal
59	Juhtsignaal
89	Juhtsignaal
110	3,3 V toiteliin kuni 400 mA
111	5 V toiteliin kuni 400 mA
112	12 V toiteliin 400 mA
117	Juhtsignaal traadi välja kerimiseks
118	Juhtsignaal traadi sisse kerimiseks
119	Juhtsignaal

*Tabel 1: Kasutatavad satelliidi peasiini ühenduste numbrid ja tähendused.*

Suhtluseks käsu- ja andmehalduse süsteemiga on kasutada 3,3 V taseme digitaalsed signaalid peasiinil (Tabel 1). [8] ESTCube-1 projekti üldise arendusprotsessi lihtsustamiseks peab plaat olema võimeline töötama satelliidist eraldiseisvana. Selleks peavad plaadil asetsema ühendused arendamiseks, testimiseks ja mootori juhtimiseks.

Kõrgepinge moodulilt tulev kõrgepinge peab olema ühenduses traatstruktuuriga. Juhtmete ühendamiseks mõeldud jootepadjad on vaja elektriliselt ühendada traatstruktuuri rulli klemmidega. Kõik kõrgepinge rajad peavad olema üksteisest ja madalpinge radadest vähemalt 5 mm kaugusel.

## 4. Tehniline lahendus

Mootori juhtimise elektroonika arendamiseks oli vaja mootori mudelit, mille abil lahendust välja arvutada, simuleerida ja testida. Enne reaalse mootoriga ühendamist on vaja mudelit kasutades veenduda seadme väljundi sobivuses. Kasutatava mootori hind on umbes 6000 €, seetõttu tohib seda kasutada alles peale juhtseadme väljundparameetrite kontrollimist mudeliga.

Piesomootori põhiliseks omaduseks on piesoelektrilise keraamika mahtuvus, maksimaalne tööpinge ja töösagedus. Andmelehes on kirjas, et tüüpiliselt on mootori mahtuvus temperatuuril 300 K (26,85 °C) 1,2  $\mu\text{F}$ . [9] Multimeetri mahtuvusmõõtjaga mõõtes oli mootori mahtuvus 2  $\mu\text{F}$ . Kuna erinevate mootorieksemplaride mahtuvused võivad erineda ja andmelehes mahtuvuse tolerantse ei anta, kasutatakse edaspidi mahtuvust 2  $\mu\text{F}$ . Suurematel sagedustel kui 500 Hz sobib elektriliselt mootorit asendama piisava pingetaluvusega 2  $\mu\text{F}$  keraamiline kondensaator. [6]

Elektriliselt on piesoelektrilised mootorid sarnased keraamiliste kõlaritega. Mõlemal juhul pingestatakse peamiselt mahtvuslikku keraamilist elementi, mis seepeale ühes suunas oma mõõtmeid muudab. Mõlemaid piesoelektrilisi aktuaatoreid valmistatakse paljukihilistele keraamilistele kondensaatoritele väga sarnase tehnoloogiaga. Sellest tulenevalt on ka mootori pingestamine väga sarnane suure mahtuvusega keraamilise kondensaatori laadimisele ja tühjendamisele. [6] See erineb oluliselt tavalistest elektromagnetjõudu kasutavatest elektrimootoritest, mille mähised on põhiliselt induktiivsed. Seda peab arvestama võimendi väljundfiltrit disainides, näiteks filtri väljundmahtuvus võib olla mootori mahtuvuse võrra väiksem või energia säästmise eesmärgil üldse puududa. Samas peab transistorite kaitseks mootorisse minevat voolu piirama näiteks jadamisi takisti või induktiivpooliga.

Kahe erineva kolmnurksignaali tekitamine inimesele kuuldavas sagedusvahemikus on väga sarnane helisagedusvõimendite tööle. Helivõimendite valmistamiseks on mitu erinevat võimalust. Kõige lihtsam neist on A klassi võimendi, mis kasutab signaali võimendamiseks ainult ühte transistorit. Kahjuks on selline võimendi väga väikese kasuteguriga, teoreetiline maksimaalne kasutegur on kuni 50%. Järgmine levinud võimendiklass on B klassi võimendi.

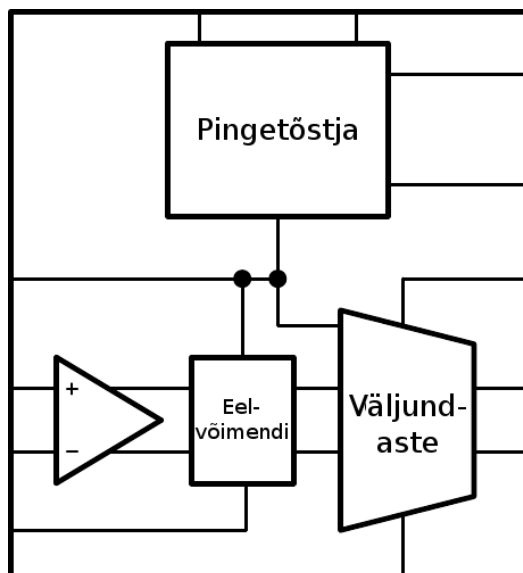
Ehituselt meenutab see A klassi võimendit, kus väljundis kasutatakse ühte transistorit. B klassi võimendis võimendab transistor ainult ühte sisendsignaali poolaarsust ja on ka suurema kasuteguriga. Klass B võimendi ühepoolaarse võimendamise probleemi parandab AB klassi võimendi. Sellises võimendis on kaks transistorit, millest korraga töötab üks. Selline võimendi on juba suurema kasuteguriga, keskmiselt 50% sisendenergiast läheb soojuseks. C klassi võimendi on suurema – kuni 90% kasuteguriga. Klass C võimendi on loodud ainult kitsaribaliste siinussignaali võimendamiseks ning ei sobi kolmnurksignaali võimendamiseks. [5] Kuna kuupsatelliitidel on energia hulk piiratud ja tekkinud soojuse ärajuhtimine raske, peaks püüdma teha võimalikult suure kasuteguriga disaini - D klassi võimendi.

D klassi võimendi kasutab signaali võimendamiseks kahte transistorit ja filtrit. Transistoreid kasutatakse lülititena - lülitades ainult täiesti voolu juhtiva ja täiesti voolu mittejuhtiva seisundi vahel. Selle tulemusena on energiakadu lülitavates elementides viidud miinimumini. Vajalik väljundsignaali kaju tekitatakse kõrge sageduse juures transistoreid lülitades, kasutades näiteks impulsilaiusmodulatsiooni. Impulsilaiusmodulatsioonis kujutatakse aeglaselt muutuvat väljundpinget, varieerides kindla sagedusega impulsside laiust, väljundpinge on otseselt seotud impulsi laiusega. Võimendites on peale lülitavat elementi madalpääsfilter, mis filtreerib kõrgsagedusliku osa signalist välja ja alles jääb ainult soovitud kujuga lõppsignaal. Kasutades filtri ainult reaktiivseid komponente, on teoreetiline võimendi kasutegur kuni 100%. Kuna reaalses elus on komponendid ebatäiuslikud, ei ole nii kõrge kasutegur võimalik, siiski on saavutatavad kasutegurid üle 90%. [6]

Piesoelektriline mootor vajab töötamiseks pinget rohkem kui 35 V aga kõrgeim pinge toitesüsteemist on 12 V. Seetõttu peab mootori juhtseade sisaldama pinget tõstvat ahelat, mis on piisavalt võimas ning vastavate sisend ja väljundpingetega.

## 4.1. Integreeritud mootorijuhid

Uuriti pikemalt kolme erinevat piesomootorite juhtimiseks mõeldud mikrokiipi. Linear Technology toodetavat LT3572 ja Texas Instrumentsi LM48580 ning LM4960. Kõik kolm kiipi sisaldavad pingetõstjat ja transistoreid väljundi juhtimiseks (Joonis 5). [10] [11] [12]



Joonis 5: Integreeritud mootorijuhtide siseehitus

LT3572 ei sobinud, sest võimaldas väljundisse tekitada ainult digitaalseid signaale. [10] Juhtkiibi ja mootori vahel oleva takistiga saaks voolu piirata, kuid sellel hajuks hulk võimsust. Induktiivpooliga prooviti voolu piirata, aga LT3572 kasutab väljundis kaitseta bipolaartransistoreid, mis induktiivpooli tekitatud pingepiikide tõttu läbi põlesid.

LM48580 ja LM4960 on D klassi helivõimendid piesoelektrilistele kõlarite juhtimiseks. Mõlemaga saab võimendada ka mootori jaoks vajaliku sageduse ja pingega saehammassignaali. Kahjuks on nende väljundid diferentsiaalsed – pingeerinevus saavutatakse piesoelektrilise aktuaatori sisendeid vastasfaasides juhtides. Kasutatavat piesomootorit ei tohi vastupidiselt pingestada. Võimaliku lahendusena saab ühendada mootori üks sisend juhtkiibi väljundiga ja

teine maandusega. Neil juhtidel on tegelik suurim pinge väljundist vastavalt 12 V ja 15 V. Kuna see ei ole piisavalt kõrge, siis selline lahendus ei ole sobilik. [11] [12]

## **4.2. Diskreetsetest komponentidest lahendus**

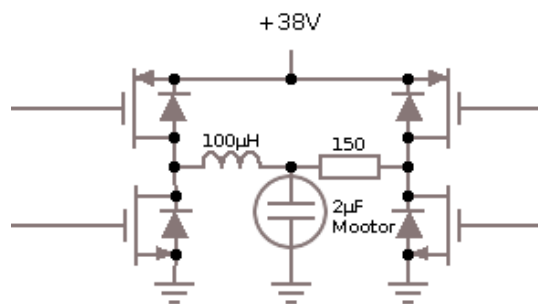
Mootori juhtimise elektroonika disainiti diskreetsetest elektroonikakomponentidest, sest ei õnnestunud leida integreeritud mikrokiipi nii spetsiifilise mootori juhtimiseks.

### **4.2.1. Pingeallikas**

Piesomootor vajab töötamiseks vähemalt 35 V amplituudiga signaali. Kuna kõrgeim pinge satelliidi toitesüsteemist on 12 V, pidi sellest sobiva pinge tekitamiseks kasutama eraldiseisvat impulss pingetõstmise mikrokiipi LM2733Y. Tegemist on väikese SOT-25 korpuses, 600 kHz töösagedusega pingestabilisaatoriga. Selle suurim lubatud väljundpinge on 40 V, ning suurim sisendvoolutugevus 1 A. [13] Komponentide väärtused on valitud andmelehes soovitud järgi. Sisend- ja väljundkondensaatoritena kasutati X7R klassi dielektrikuga 50 V pingetaluvusega keraamilisi kondensaatoreid. Tagasiside takistid on valitud nii, et väljundpinge oleks 38 V. Selline väljundpinge on piesomootori jaoks piisavalt kõrge, ning ka pingetõstja pingetaluvusest veidi madalam. Pingestabilisaatori sisselülitamise viik on ühendatud juhtiva mikrokontrolleriga. Energiakulu vähendamiseks tekitatakse kõrgemat pinget vajadusel.

### **4.2.2. Voolu piiramine**

Mootorile ühepolarse saehammassignaali tekitamiseks peab mootori piesoelemendi kõigepealt aeglaselt (~1,5 ms jooksul) täis laadima ja seejärel võimalikult kiirelt (< 0,3 ms) tühjendama. Lülitades mootori sisendit toiteliini või maandusesse peab tekkivat voolu piirama. Saehamba aeglase serva voolu piiramiseks kasutati induktiivpooli (Joonis 6). Läbi pooli sobiva laiuse ja vahega impulsse andes on võimalik suurimat voolu hoida komponentide maksimaalsest lubatust madalamal. Impulsse õigesti varieerides saab mootori sisendisse tekitada ühtlase kasvava pinge. Tänu induktiivpooli madalale alalisvoolu kistusele läheb vähe energiat soojusena kaduma. Selline skeemilahendus on väga sarnane D klassi võimsusvõimendi väljundfiltrile, mis kasutab väljundfiltri kondensaatorina piesomootorit.



Joonis 6: Väljundtransistorid, voolu piiravad takisti ja induktiivpool ning mahtuvuslik mootor.

Valiti Murata induktiivpooli 45104C, mille induktiivsus on 100 µH ja voolutaluvus 0,7 A. [14] Pool on elektromagnetiliste häirete vähendamiseks varjestatud ning mõõtmetelt väike (7,3 mm x 7,3 mm x 3,55 mm). Suurem induktiivsus lubaks kasutada aeglasemat lülitamist, aga tooks endaga kaasa suurema induktiivpooli. Induktiivsuse ühiku henri definitsiooni järgi saame arvutada, millise aja jooksul jõuab induktiivpooli läbiv vool oma suurima lubatud voolutugevuseni. [15]

$$t = \frac{L \times I}{U}, t = \frac{100 \mu H \times 700 mA}{38 V} = 1,84 \mu s$$

Selline sisselülitatud oleku aeg on juhitud lihtsa mikrokontrolleriga ja saavutatav väljundtransistoritega.

Hammasignaali teise, kiirelt langeva serva tekitamiseks tuleb piesomootori mahtuvuslik element võimalikult kiiresti tühjaks laadida. Tühjendades elementi lihtsalt läbi lõpulüliti, oleks suurim hetkeline voolutugevus väga suur. Seepärast kasutati elemendi ja lüliti vahel voolu piiramiseks ja soojuse hajutamiseks takistit (Joonis 6). Takistiks valiti pindmonteeritava meetermõõdu 6330 pakis: 6,3 mm x 3 mm mõõtmetega takisti suurima lubatud hajuvvõimsusega 2 W. Minimaalse nõudeid rahuldava takisti takistuse saab arvutada kondensaatori laadimise ajateguri valemist. [16]

$$R = \frac{\tau}{C}, R = \frac{0,3 ms}{2 \mu F} = 150 \Omega$$

Eeldusel, et kogu mootorisse laetud pinge tuleb läbi takisti soojuseks muundada, saab välja arvutada palju võimsust takisti peal hajub. Selleks tuleb jagada kondensaatori plaatide peal salvestunud energia perioodiga mil see võimsus hajuma peab. [16]

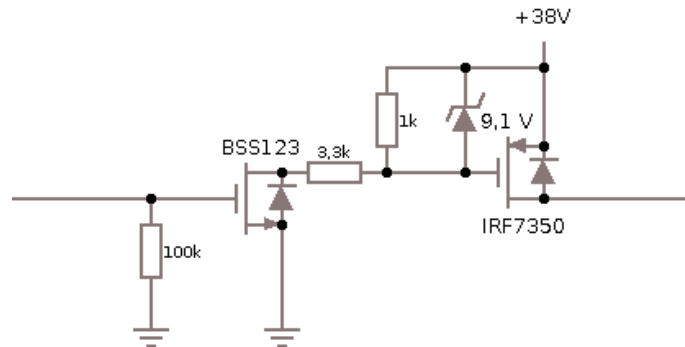
$$P = \frac{U^2 \times C}{t}, P = \frac{38V^2 \times 2\mu F}{1 \div 570 Hz} = 1,65 W$$

#### 4.2.3. Lülitav element

Lülitavaks elemendiks valiti isoleeritud paisuga väljatransistorid (MOSFET). Kokku on vaja kahte väljundit, mida mõlemat peab saama lülitada toitepingesse, maandusesse või ühendamata olekusse. Selle jaoks kasutatakse nelja transistorit – kaks N kanali transistorit väljundite maandamiseks ja kaks P kanaliga väljundi toitepingesse lülitamiseks. Kõik väljundtransistorid on ükshaaval mikrokontrolleri poolt juhitavad.

Lülitina integreeritud mootori juhtimise mikroskeemi kasutamine pakub küll rohkem võimalusi, näiteks lühise- ja temperatuurikaitse. Samas puudub väljundite kontrollitult ühendamata olekusse lülitamine ja tihti ei võimalik nii lühikeseks ajaks (1,8µs) väljundite sisse lülitamine.

Väljundtransistoriteks kasutati kahte International Rectifieri toodetud SO-8 korpuses transistorpaari IRF7350PBF. Tegemist on isoleeritud paisuga väljatransistori paaridega, mille suurim lubatud vastupinge on 100 V, maksimaalne lubatud vooluimpulss 6 A ning omavad avatud olekus kuni 0,48 Ω takistust. [17] Paisu lülitamiseks kasutatakse lihtsat zener dioodist, takistitest ja ühest transistorist ahelat (Joonis 7). [18] Maanduse poole lülitamiseks kasutatakse väikesi SOT-23 korpuses N kanali väljatransistoreid BSS123. Tagasi toitesse lülitamiseks *pull-up* takisteid. Kuna valitud transistorite suurim lubatud paisu ja lätte vaheline pinge on 20 V, on paigutatud takistiga paralleelselt 9,1 V zener diood, mis hoiab paisu ja lätte vahelise pinge lubatud vahemiku.



Joonis 7: P kanali väljatransistori paisu juhtahel

#### 4.2.4. Elektromagnetiliste häirete vältimine

Välja kiiratavate elektromagnetiliste häirete vähendamiseks kasutatakse mitmeid võtteid. Mõlemad kasutusel olevad induktiivpoolid on valitud ferriidist varjestusega, et piirata neilt kiirguvat välja. Kasutatavatel toiteliinidel on kohe peasiini juures 100 nF mahtuvusega läbiviikkondensaatorid. Mootori juhtimise volupiirajate ja mootori ühenduse vahel on kaks filtrit, et suruda maha signaali kõrgsageduslike osasid, mis võiksid teisi elektroonikaskeeme mõjutada.

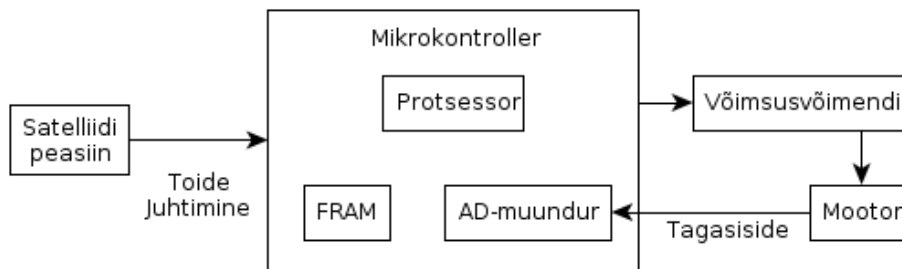
Mikrokontrollerile võimalikult lähedale kõikide toitejalgade ja maanduse vahele on asetatud 100 nF mahtuvusega keraamilised kondensaatorid. Kondensaatorid siluvad mikrokontrollerisse sisse tulevat pinget kiiretest pingepiikidest ja aitavad ühtlustada mikrokontrolleri kiirelt muutuvat voolutarbimist.

### 4.3. Mikrokontroller

Käsu- ja andmehalduse alamsüsteemiga suhtlemise ja elektroonika juhtimiseks kasutati Texas Instrumentsi mikrokontrollerit MSP430FR5739 (Joonis 8). Tegemist on TSSOP-38 korpuses 16 bitise arhitektuuriga mikrokontrolleriga, mille eristavaks omaduseks on ferroelektrilise mälu kasutamine välmälu asemel. [20] Mikrokontrolleri tööpinge on 2,0 – 3,6 V, vajalikuks toitepingeks kasutati toitesüsteemi 3,3 V liini.

Ferroelektriline mälu on välmäluga sarnaselt säilmälu, aga on kiiruselt ja kirjutamiskordade arvult sarnane RAMiga. F-RAM on ka väga madala voolutarbimisega, robustne ning radiatsioonikindel. Tänu neile omadustele on ferroelektrilise mälu mikrokontrollerid väikestel satelliitidel kasutamiseks väga sobivad. Kasutatud mikrokontrolleri F-RAMi saab kirjutada ja lugeda kella taktkiirusel kuni 8 MHz. Et kasutada F-RAMi peale püsिमälu ka muutmäluna kasutatakse protsessori taktsageduseks võimaliku 24 MHz asemel 8 MHz.

Kõik peasiini ja mikrokontrolleri vahel olevad digitaalsignaalid on ühendatud läbi 100  $\Omega$  takistite, et kaitsa neid võimaliku lühise ja ülepinge eest. Plaadil on 6 kontakiline Micro-MaTch pesa programmeerimise ja silumise jaoks.



Joonis 8: Mikrokontrolleri põhimõtteline ühendusjoonis

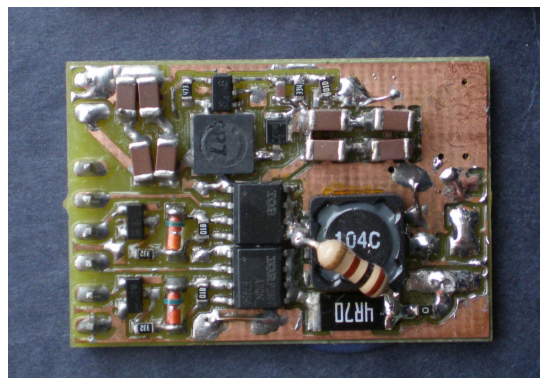
Mootoril ANR101 on sisseehitatud takistuslik tagasiside andur. Sisuliselt toimib see nagu potentsiomeeter – kahe kontakti vahel on konstantne takistus 20 k $\Omega$ . Kolmanda kontakti, liuguri ja paigalseisvate kontaktide vaheline takistus sõltub mootori nurgast. Tagasiside andur on ühendatud pingejagurina: üks kontakt maandusesse, teine mikrokontrolleri 3,3 voldisesse

toitepingesse ja liugur analoog-digitaalmuunduri sisendisse A0. Analoog-digitaalmuunduri sisendpinge ja mootori rootori nurga vahel on otsene seos. Mürä filtreerimiseks on signaali ja maanduse vahel 100 nF kondensaator.

Üherealisse 2,54 mm vahega kontakti on välja toodud SPI siini ja toiteühendused, et vajadusel saaks sinna ühendada testseadmeid, valgusdioode või kasutada sama trükkplaati mõne muu programmi arendamiseks. Testimise lihtsustamiseks on valmistatud spetsiaalne lisaseade. Lisaseade koosneb toitejuhtmetest välise toite jaoks, valgusdiodist programmi seisu kuvamiseks ja kolmeastmelisest lülitist, millega saab valida mootori töötamise suunda või mootor peatada.

#### 4.4. Trükkplaadi disain

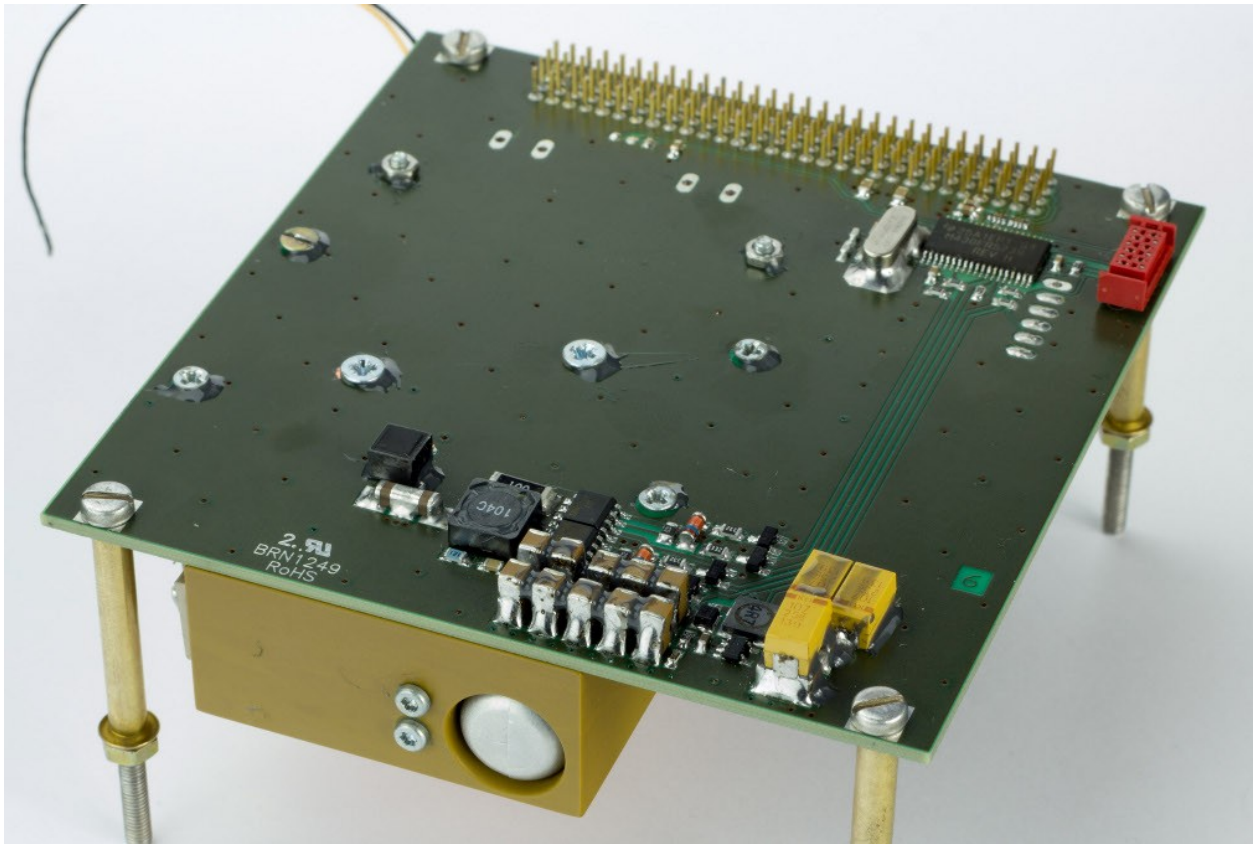
Elektriskeemid ja trükkplaadid on disainitud programmiga EagleCAD 5.12. Antud programm valiti, sest kõik ESTCube-1 plaadid on selles joonistatud. EagleCADi kasutamine võimaldas kasutada teiste alamsüsteemidega sama peasiini pistikühenduse komponenti, mis vähendas ühendusvigade tõenäosust.



*Joonis 9: Lõpliku võimsusvõimendi prototüüp*

Kõigist arutluse all olnud võimsusvõimenditest tehti test trükkplaadid (Joonis 9), mis freesiti välja LPKFi trükkplaadifreesiga. Lõpliku trükkplaadi (Joonis 10) tootis Brandner PCB OÜ. Lõplik elektriskeem on lisas 1 ja trükkplaat lisas 2.

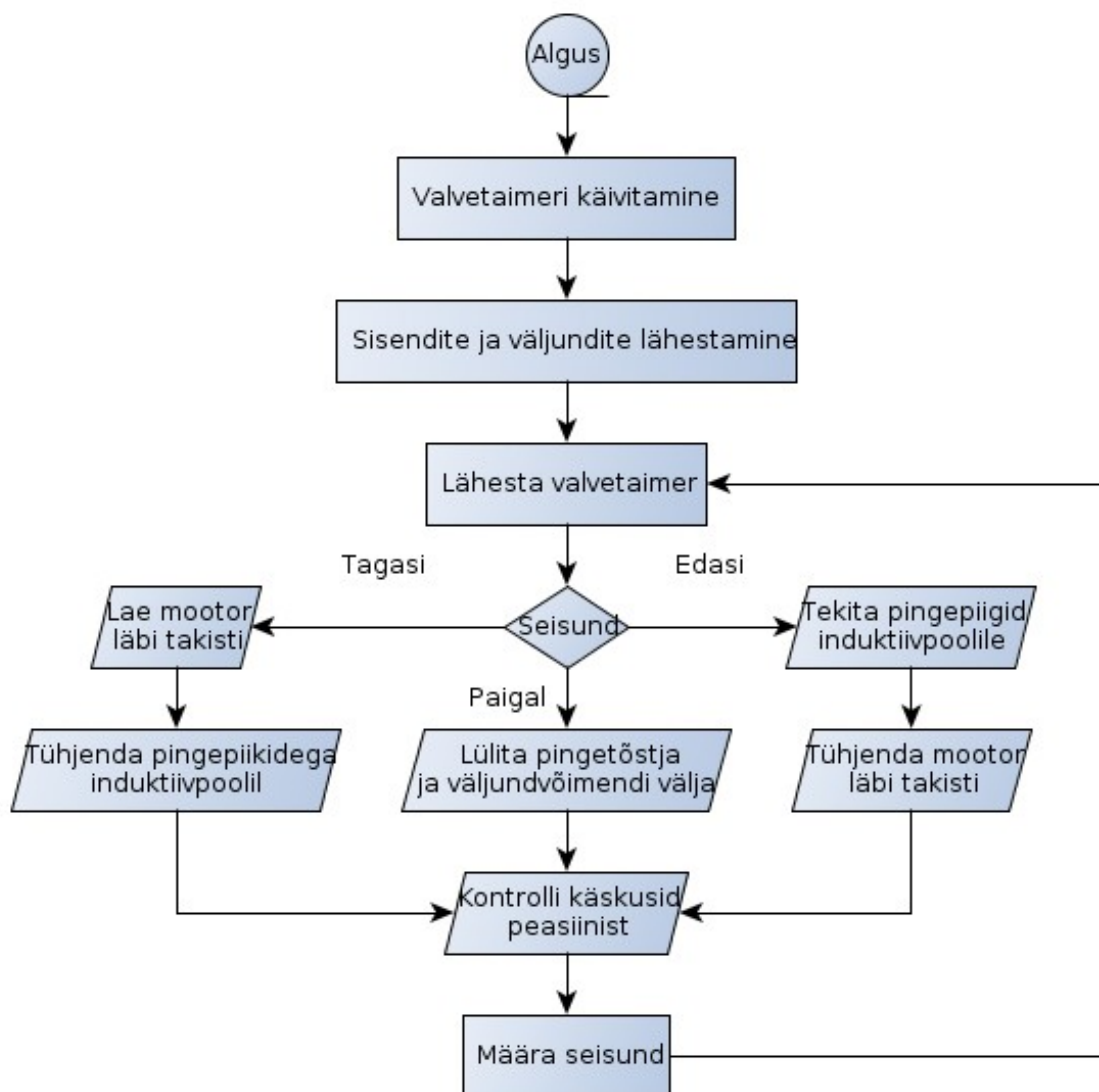
Kõik komponendid plaadil peale pistikühenduste on pindmonteeritavad ja jalgadega. Jalgadega komponendid võimaldavad plaati lihtsamalt valmistada, ning on vibratsioonile vastupidavamad kui ilma jalgadeta komponendid. Komponentide täieliku nimekirja leiab lisast 4. Komponentid on paigutatud ainult plaadi alumisele küljele, sellist plaati on lihtsam valmistada ja testida. Ülemist vasekihti on kasutatud mõne üksiku raja vedamiseks, ning kahel keskmisel kihil pole ühtegi rada, mis võimaldab plaati toota ka kahekihilisena. ESTCube-1 puhul oli plaat tellimuste lihtsustamiseks neljakihiline. Kõikide kihtide radadest vaba ala on kaetud maa-alaga.



*Joonis 10: ESTCube-1 sees olev lõplik trükkplaat.*

## 4.5. Programmi kood

Mikrokontrolleri kood on kirjutatud programmeerimiskeeles C kasutades Code Composer Studio v5 integreeritud programmeerimiskeskonda. Code Composer Studio on Eclipse'el põhinev keskkond, mille tasuta versioon lubab kuni 16 kilobaidi suurusi väljundfaile. Mälupiirang ei sega, sest kasutatav protsessor MSP430FR5739 omab ainult 16kB mälu. [20] Mikrokontrolleril oleva koodi üldise ülesehituse plokk skeem on joonisel 11 ja kogu kood lisas 3.



Joonis 11: Programmi kulgemise üldine plokk skeem

## 5. Testimine

Ühel esimestest kordades hammassignaali tekitades oli induktiivpooli ja transistori vahelises punktis on üsna suure amplituudiga umbes 1 MHz sagedusega müra. Selline müra võib segada teiste ahelate tööd ja aidata kaasa transistorite piirpinge ületamisele. Selle allasurumiseks ühendati induktiivpooliga paralleelselt takistist ja kondensaatorist koosneva kõrgpääsufiltri. Kõrgpääsufiltri lõikesagedus peab olema veidi madalam kui 1 MHz. Takisti väärtuseks on valitud 100 Ω ning kondensaatori 2,2 nF. Sellise filtri lõikesagedus on: [19]

$$f = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times C}, f = \frac{1}{2 \times \pi \times 100 \Omega \times 2,2 \text{ nF}} = 723 \text{ kHz}$$

Traatstruktuuri mehhaaniliste testide käigus selgus, et mootoril on palju vähem jõudu kui peaks olema. Signaali kuju paistis õige, ainus erinevus näidissignaalist oli saehammassignaali kiirelt langeva serva kestvus. Asendades voolu piirava takisti väiksema väärtusega takistiga, tuli mootorile jõudu juurde. Minimaalse takisti väärtuse arvatati välja transistori maksimaalse voolutugevuse kaudu ja saadi selleks 6 Ω. Lõplikuks kasutatavaks takistuseks jäi 10 Ω.

	<b>Saksa Kosmosekeskuselt saadud juhtseade</b>	<b>Nõue uuele</b>	<b>Tegelik saavutatu</b>
3,3 V siini voolutugevus	400 mA	< 400 mA	3 mA
5 V siini voolutugevus	150 mA	< 400 mA	0 mA
12 V siini voolutugevus	320 mA	< 400 mA	110 mA
Koguvõimsus	5,9 W	< 2 W	1,3 W

*Tabel 2: Voolutarbimise nõuded ja tegelik tarbimine*

Peale eelnimetatud muutuste sisse viimist toimis juhtseade tõrgeteta. Traatstruktuuri mehhaaniliste testide käigus kasutati seadet kogu traadi lahti ja kokku kerimiseks kümmeid kordi. Ühilduvustestide käigus elektrisüsteemi ning käsu- ja andmehalduse süsteemiga ei leitud ühtegi viga. Seade ühildus elektrisüsteemiga ning toimis käsu- ja andmehalduse süsteemi juhtimisel õigesti. Elektroonika töötas ka peale kuupsatelliidile kohustuslikke vibratsiooni- ja temperatuuriteste. Viimaseks testiks on orbiidil traatstruktuuri lahti kerimine 2013 aasta suvel.

## 6. Kokkuvõte

Üks ESTCube-1 ja Aalto-1 kuupsatelliitide eksperimentidest on alumiiniumstruktuuri välja kerimine. Mõlemad satelliidid kasutavad asendi määramiseks magnetomeetreid ja muutmiseks elektromagnetpoole. Et vähendada lahti keriva mootori mõju ülejäänud satelliidile kasutatakse mittemagnetilist piesoelektrilist mootorit ANR101.

Selle mootori rootori pöörlema panemiseks peab rakendama mootori klemmide peale ühepolaarset saehammassignaali. Selle saavutamiseks arendati välja D klassi võimendil põhinev juhtseade. Bakalaureusetöös kirjeldati kuupsatelliidile mõeldud piesoelektrilise mootori juhtseadme nõudeid, arendust ja tehnilist lahendust. Arendati ja testiti lõplik võimsusvõimendi koos väljundfiltriga. Lisaks valmistati ESTCube-1 satelliidi eksperimendi moodul, mis sisaldas endas piesoelektrilise mootori juhtseadet ja ühildus ülejäänud satelliidiga. Juhtseadet kasutati edukalt paljudes maapealsetes traatstruktuuri kerimise testides.

Töö juhtseadme kallal jätkub, et muuta see sobivaks Aalto-1 satelliidi platvormiga. Lahtikerimise testid orbiidil algavad 2013 aasta suvel ESTCube-1 lennutulemustele tuginedes tehakse vajadusel ka muudatusi ehituses.

Töös on valminud seadme tehniline kirjeldus ja kasutamiseks ning taasvalmistamiseks vajalikud dokumentatsioon.

## 7. Viited

1. Alexander Chin, Roland Coelho, Lori Brooks, Ryan Nugent, Dr. Jorgi Puig-Suari, "Standardization Promotes Flexibility: A Review of CubeSats' Success" (2008)  
[http://responsivespace.com/Papers/RS6/SESSIONS/SESSION%20IV/4006\\_CHIN/4006P.pdf](http://responsivespace.com/Papers/RS6/SESSIONS/SESSION%20IV/4006_CHIN/4006P.pdf) Kasutatud 03.01.2013
2. "Eesti Tudengisatelliidi projekt" <http://www.estcube.eu/> Kasutatud 03.01.2013
3. "nanoPOSITIONING" Attocube Systems  
[http://www.attocube.com/nanoPOSITIONING/download/Brochure\\_nanoPOSITIONING.pdf](http://www.attocube.com/nanoPOSITIONING/download/Brochure_nanoPOSITIONING.pdf) Kasutatud 04.01.2013
4. "Attocube Systems' positioners user manual ver 1.7" (2011)
5. Jun Honda, Jonathan Adams, "Application Note AN-1071: Class D Audio Amplifier Basics" International Rectifier (2005)  
<http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-1071.pdf> Kasutatud 03.01.2013
6. Mark Cherry, „Amplifier Considerations in Ceramic Speaker Applications“, Maxim's Engineering Journal, vol. 62 (2008)  
<http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN4164.pdf> Kasutatud 03.01.2013
7. Jaan Praks, „Aalto-1 Summary“, <https://wiki.aalto.fi/display/SuomiSAT/Summary>  
Kasutatud 05.01.2013
8. „ESTCube-1 System bus“
9. „ANR101/RES data sheet“ Attocube Systems (2009)
10. „LT3572“ Linear Technology, <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3572fa.pdf>  
Kasutatud 27.03.2013
11. „LM48580“ (2010) Texas Instruments, [http://www.ti.com/lit/ds/sn491/sn491.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/snas491/sn491.pdf)  
Kasutatud 27.03.2013
12. „LM4960 Piezoelectric Speaker Driver (Rev. B)“ Texas Instruments,  
<http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm4960.pdf> Kasutatud 27.03.2013
13. „LM2733 0.6/1.6 MHz Boost Converters With 40V Internal FET Switch in SOT-23“ (2010) Texas Instruments, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2733.pdf> Kasutatud 28.03.2013

14. „4500 Series Shielded Surface Mount Power Inductors“ Murata Power Solutions, Inc.,  
<http://www.farnell.com/datasheets/1482256.pdf> Kasutatud 29.03.2013
15. „Elektromagnetiline induksioon“,  
[http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro\\_alused/4Induksioon.pdf](http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro_alused/4Induksioon.pdf) Kasutatud 29.03.2013
16. „Elektrimahtuvus“, [http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro\\_alused/5Elektrimahtuvus.pdf](http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro_alused/5Elektrimahtuvus.pdf)  
Kasutatud 29.03.2013
17. „IRF7350PbF“ International Rectifier,  
<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf7350pbf.pdf> Kasutatud 29.03.2013
18. „P-Channel MOSFETs, the Best Choice for High-Side Switching“ (1997) Vishay  
Siliconix, <http://www.vishay.com/docs/70611/70611.pdf> Kasutatud 29.03.2013
19. „Skeemitehnika“ Tallinna Tehnika Ülikool  
[http://robotika.tech-thing.org/failid/Skeemitehnika/01\\_passiivfiltrid.pdf](http://robotika.tech-thing.org/failid/Skeemitehnika/01_passiivfiltrid.pdf) Kasutatud  
30.03.2013
20. „MSP430FR573x“ (2013) Texas Instruments  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr5739.pdf> Kasutatud 31.03.2013

## **8. Abstract**

### **Piezoelectric motor driver for CubeSat**

**Jaanus Kalde**

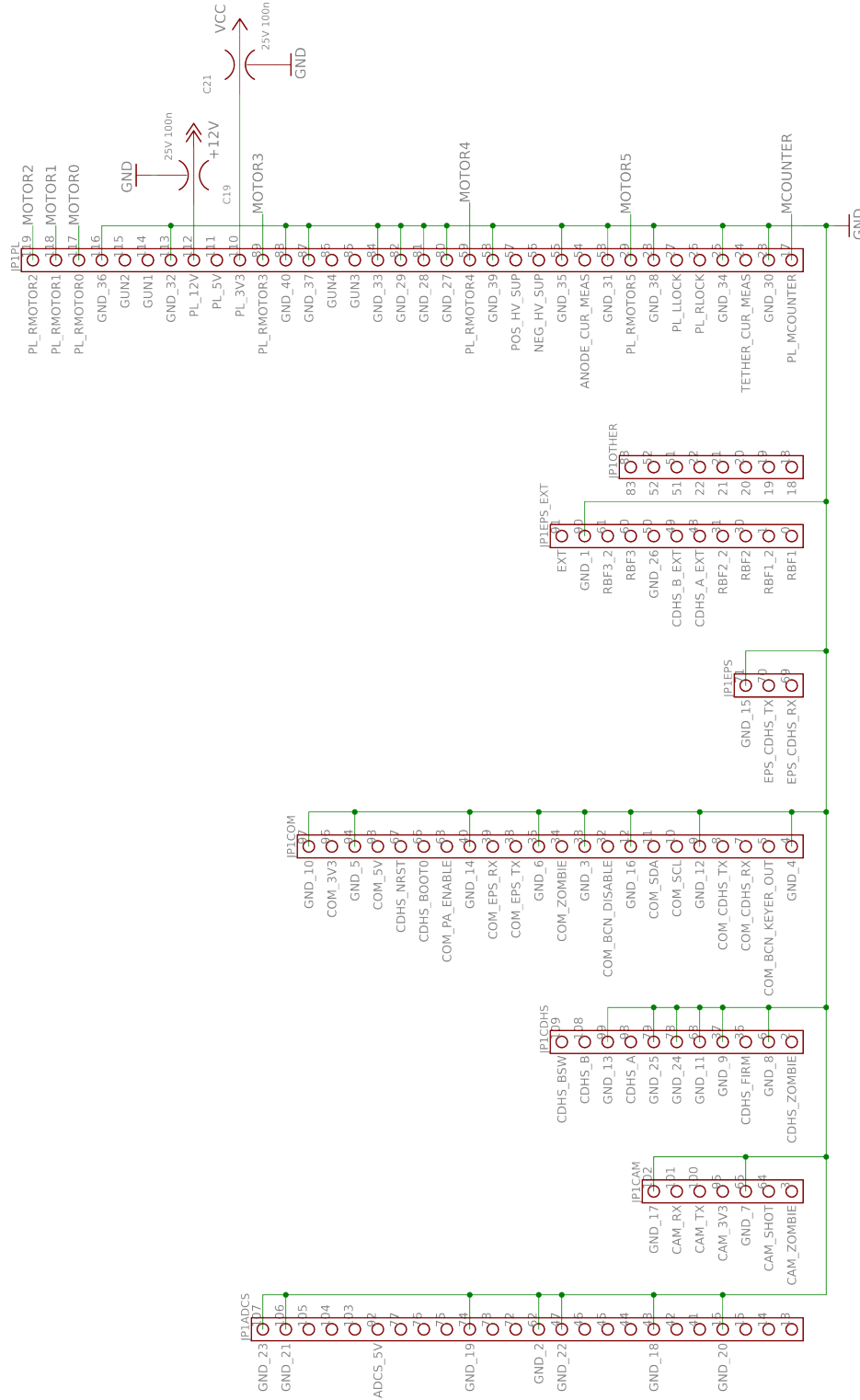
One of the experiments of ESTCube-1 and Aalto-1 CubeSats is unreeling an aluminum tether. Both satellites are using magnetometers and magnetorquers for attitude determination and control. To minimize the effect of unreeling motor to satellites sensors a non-magnetic piezoelectric motor ANR101 was chosen.

For rotating the rotor of this motor an unipolar sawtooth signal must be applied to the input terminals. To achieve this a specialized class D amplifier based solution was developed. This bachelor thesis describes the requirements, development and the final technical solution used in ESTCube-1 and Aalto-1 satellites. Power amplifier and output filter were developed and tested. Final flight circuit boards for ESTCube-1 payload subsystem were made. The controller passed all required tests – functional, integration, load.

Work on the controller continues to make it compatible with Aalto-1 satellite bus. ESTCube-1 experiment will start in the middle of summer 2013. Flight data from ESTCube-1 mission will be taken in account for further development.

This work has the technical description of the final piezoelectric controller board and all the technical descriptions needed to use it or make similar ones.

# Lisa 1 – Elektriskeem

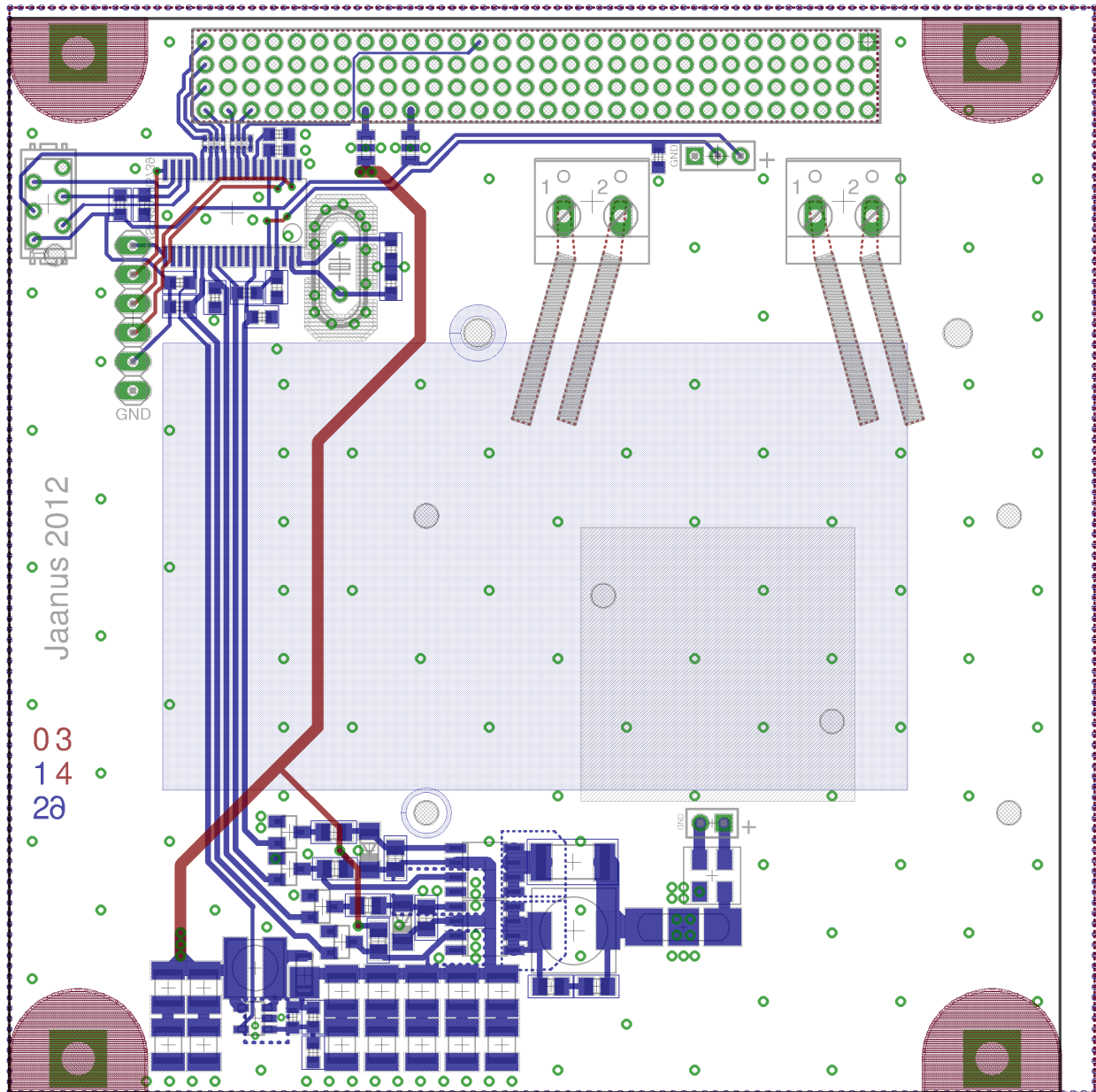


<b>ESTCube-1 Payload 1</b>	<b>Jaanus Kalde 2012</b>
<b>Main system bus</b>	<b>Version_1</b>
	<b>27.03.13 22:42</b>
	<b>Sheet: 1/3</b>





## Lisa 2 – Trükkplaat



## Lisa 3 – Programmi kood

```
1.#include <msp430.h>
2.//Define Watchdog Timer configuration, family datasheet, pg300
3.#define WDTCONFIG (WDTCNTCL | WDTIS2 | WDTIS0)
4.
5.//define some pins
6.#define GATE_P_RESISTOR 0x04
7.#define GATE_N_RESISTOR 0x08
8.#define GATE_P_INDUCTOR 0x10
9.#define GATE_N_INDUCTOR 0x20
10.
11.//motor control pins to CDHS. They are all around the ports.
12.#define MOUNTER 0x80 //port1
13.#define MOTOR0 0x40 //port1
14.#define MOTOR1 0x80 //port3
15.#define MOTOR2 0x40 //port3
16.#define MOTOR3 0x20 //port3
17.#define MOTOR4 0x10 //port3
18.#define MOTOR5 0x04 //port2
19.
20.//It's the one guy!
21.//enum for states
22.enum possible_states {
23.  STOP,
24.  FORWARD,
25.  REVERSE
26.};
27.
28.enum possible_states state = STOP;
29.
30.//buzy wait macro, use sparingly
31.#define DELAY_US(X) __delay_cycles((X)*5)
32.
33.//microsecond delay function. idea from Arduino's wiring.c
34.void inline delay_microseconds(unsigned int us)
35.{
```

```

36. //for delays smaller than 2 return yesterday
37. if (--us == 0) return;
38. if (--us == 0) return;
39.
40. us >>= 1;
41.
42. for (;us;us--)
43. {
44.     _delay_cycles(7);
45. }
46.}
47.
48.// I wanna be the guy!
49.// counter var
50.volatile unsigned int i;
51.
52.//I do small pulse and then wait for this amount of microseconds.
53.static const unsigned int lookup_microseconds_wait[] =
54.{
55. 70,66,61,57,54,50,47,44,41,38,36,33,31,29,27,26,24,22,21,19,
56. 18,17,16,15,14,13,12,11,10,10, 9, 8, 8, 7, 7, 6, 6, 6, 5, 5,
57. 4, 4, 4, 4, 3, 3, 3, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
58. 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
59. 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
60.};
61.
62.void main(void)
63.{
64.    /// configure oscillator, family datasheet pg. 67
65.    // XT1 Setup
66.    PJSEL0 |= BIT4 + BIT5;
67.
68.    CSCTL0_H = 0xA5; //password
69.    CSCTL5 &= ~XT1OFFG & ~ENSTFCNT1;
70.    SFRIFG1 &= ~OFIFG;
71.
72.    CSCTL1 |= DCOFSEL0 + DCOFSEL1;          // Set max. DCO setting
73.    CSCTL4 = XT2OFF + XTS + XT1DRIVE_0; // xt2 off + high speed mode +
medium drive strength + xt1 on

```

```

74. CSCTL2 = SELA_0 + SELS_0 + SELM_0; // set ACLK = XT1, SMCLK = XT1, MCLK
= XT1
75. CSCTL3 = DIVA_0 + DIVS_0 + DIVM_0; // set all dividers to 0
76.
77. //Start watchdog timer.
78. WDTCTL = WDTPW | WDTCNFIG;
79. _bis_SR_register(GIE); // Global Interrupt Enable, needed so WTD
could reset the CPU
80.
81. //Set inputs and outputs.
82.
83. //Set boost converter enable pin to output.
84. PJOUT &= 0xffff;
85. PJDIR |= 0x0001;
86.
87. //Pins associated with mosfet gates.
88. P1OUT &= ~GATE_P_RESISTOR & ~GATE_P_INDUCTOR; //Turn off P channels,
we want no short circuits.
89. P1OUT |= GATE_N_RESISTOR | GATE_N_INDUCTOR; //Turn off N channels,
they have inverters on gate.
90. P1DIR |= 0x3c; //All Gate controls are now outputs, beware.
91.
92. //Pins dealing with GUI.
93. P2REN |= 0x08 + 0x10;
94. P2OUT |= 0x08 + 0x10;
95.
96.
97. //Communication with CDHS
98.
99. //Counter is output and low.
100. P1OUT &= ~MCOUNTER;
101. P1DIR |= MCOUNTER;
102.
103. //Motors are inputs with pulldown.
104. P1OUT &= ~MOTOR0;
105. P1REN |= MOTOR0;
106.
107. P3OUT &= ~MOTOR1 & ~MOTOR2 & ~MOTOR3 & ~MOTOR4;
108. P3REN |= MOTOR1 | MOTOR2 | MOTOR3 | MOTOR4;

```

```

109.
110. P2OUT &= ~MOTOR5;
111. P2DIR |= MOTOR5;
112.
113. //turn on the debug led
114. P2DIR |= 0x40;
115. P2OUT |= 0x40;
116.
117. for (;;) //Main loop
118. {
119.     //Feed the watchdog.
120.     WDTCTL = WDTPW | WDTCRCONFIG;
121.
122.     //Main switch, do not pull.
123.     switch (state)
124.     {
125.         case STOP:
126.             //Turn off all transistors and boost converter.
127.             P1OUT &= ~GATE_P_RESISTOR & ~GATE_P_INDUCTOR; //Turn off P
channels
128.             P1OUT |= GATE_N_RESISTOR | GATE_N_INDUCTOR; //Turn off N
channels, they have inverters on gate.
129.             PJOUT &= 0xffff;
130.             delay_microseconds(1000);
131.             break;
132.         case FORWARD:
133.             //Turn on the boost converter.
134.             PJOUT |= 0x0001;
135.
136.             //Generate the spikes.
137.             for (i = 0; i < 100; i++)
138.             {
139.                 //Pull inductor high for 1 microsecond.
140.                 P1OUT |= GATE_P_INDUCTOR;
141.                 __delay_cycles(1);
142.
143.                 //Let it float for x amount of microseconds.
144.                 //X comes from lookup.
145.                 P1OUT &= ~GATE_P_INDUCTOR;

```

```

146.         delay_microseconds(lookup_microseconds_wait[i]);
147.     }
148.
149.     //Empty the motor through resistor. 60 us should be enough.
150.     P1OUT &= ~GATE_N_RESISTOR;
151.     DELAY_US(60);
152.     P1OUT |= GATE_N_RESISTOR;
153.
154.     //toggle the counter
155.     P1OUT ^= MOUNTER;
156.     break;
157. case REVERSE:
158.     //Turn on the boost converter.
159.     PJOUT |= 0x0001;
160.
161.     //Toggle the counter.
162.     P1OUT ^= MOUNTER;
163.
164.     //Charge the motor through resistor. 60 us should be enough.
165.     P1OUT |= GATE_P_RESISTOR;
166.     DELAY_US(80);
167.     P1OUT &= ~GATE_P_RESISTOR;
168.
169.     //Generate the spikes.
170.     for (i = 0; i < 100; i++)
171.     {
172.         //Pull inductor low for n microsecond.
173.         //It is different from other one because of the driver.
174.         P1OUT &= ~GATE_N_INDUCTOR;
175.         delay_microseconds(4);
176.
177.         //Let it float for x amount of microseconds.
178.         //X comes form lookup.
179.         P1OUT |= GATE_N_INDUCTOR;
180.         delay_microseconds(lookup_microseconds_wait[i]);
181.     }
182.
183.     P1OUT ^= MOUNTER;
184.     break;

```

```
185.     }
186.
187.     //Communication - Joystick and normal
188.     if ((!(P2IN & 0x08) && (P2IN & 0x10)) || (P1IN & MOTOR0) && !(P3IN &
MOTOR1))
189.     {
190.         state = REVERSE;
191.     }
192.     else if ((!(P2IN & 0x10) && (P2IN & 0x08)) || !(P1IN & MOTOR0) &&
(P3IN & MOTOR1))
193.     {
194.         state = FORWARD;
195.     }
196.     else
197.     {
198.         state = STOP;
199.     }
200.
201.     //toggle the zombie check.
202.     P2OUT ^= 0x40 | MOTOR5;
203. }
204.}
```

## Lisa 4 – Elektroonikakomponentide tabel

Tähis	Komponent	Korpus	Väärtus
C1 – C4, C6 - C15	Kondensaator	3225	4,7 $\mu$ F 50 V
C5	Kondensaator	1608	150 pF
C16	Kondensaator	2012	2,2 nF
C17	Kondensaator	1608	1 $\mu$ F
C18, C20, C22	Kondensaator	1608	100 nF
C19, C21	Läbiviikkondensaator	2012	100 nF, 25V
C23, C24	Kondensaator	1608	22 pF
C25	Kondensaator	1608	4,7 nF
D1	Schottky diood	Powermite	MBRM120
D2, D3	Zeneri diood	SOD-80C	9,1 V
JP3	Pistikühendus		Micro-MaTch 338068-6
L1	Induktiivpool	7,3 mm x 7,3 mm	100 $\mu$ H 0,7 A
L2	Induktiivpool	SRR4011	4,7 $\mu$ H 1,2 A
Q1, Q2	Transistor	SO-8	IRF7389
Q3, Q4, Q6, Q7	Transistor	SOT-23	BSS123
Q5	Kristall-ostsillaator	HC49	8 MHz
R1, R10, R13 - R16	Takisti	1608	100 k $\Omega$
R2	Takisti	1608	330 k $\Omega$
R3	Takisti	1608	11 k $\Omega$
R4	Takisti	6330	47 $\Omega$ 2W
R5	Takisti	2012	100 $\Omega$
R6, R7	Takisti	2012	1 k $\Omega$
R8, R9, R11, R12	Takisti	2012	3,3 k $\Omega$
RN1, RN2	Takistimassiiv	2012	4 x 100 $\Omega$
U1	Pingetõstja	SOT-25	LM2733Y
U2	Mikrokontroller	TSSOP38	MSP430FR5739
Z1	Filter	5050	125 V 2 A
Z2	Filter		10 nF 100 V 10 A

# **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina Jaanus Kalde (1990-06-12)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „PIESOELEKTRILISE MOOTORI JUHTSEADE KUUPSATELLIIDILE“, mille juhendaja on Viljo Allik,

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 2013-05-16