

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Infotehnoloogia teaduskond  
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

# **Elektrivormeli toite- ja lülitusmooduli väljatöötamine**

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Sander Suursalu  
Üliõpilaskood: 113100  
Juhendaja: Argo Kasemaa

Tallinn  
2014

## **Autorideklaratsioon**

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

-----  
*(kuupäev)*

-----  
*(allkiri)*

## **Annotatsioon**

“Elektrivormeli toite- ja lülitusmoduli väljatöötamine” seisneb kõrgtehnoloogilises elektrivormelis kasutatava elektroonikamooduli väljatöötamises. Töö koosneb kolmest alamülesandest: elektriskeemi projekteerimine, trükkplaadi projekteerimine ja tarkvaralise kontrollsüsteemi arendamine. Iga alamülesande puhul on esitatud tehtud valikute põhjendused ning vajalikud arvutused. Töö tulemusena valmib tootmiseks valmis prototüüp, mida kasutatakse Eesti järgmises elektrivormelis.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 52 leheküljel, 4 peatükki, 14 joonist ja 2 lisa.

## **Abstract**

“The development of the power distribution module for electric formula” focuses on the development of an electronic module that is used in high-tech electric formula. The thesis has been divided into three sub-parts: the development of the schematics, the PCB and the control system. Each sub-part features the reasoning behind the decisions and the necessary calculations. The result of the thesis will be a production ready prototype that will be used in the next Formula Student racing car that has been designed in Estonia.

The thesis is in Estonian and contains 52 pages of text, 4 chapters, 14 figures and 2 appendices.

# Lõputöö ülesanne

## Lõputöö teema:

Elektrivormeli toite- ja lülitusmooduli väljatöötamine

Development of the power distribution module for electric formula

**Teema päritolu:** Formula Student Team Tallinn

**Lõputöö eesmärgid:** Projekteerida töökindel ja kompaktne elektroonikamoodul, mis sisaldab elektroonika toite- ja kaitseahelaid, tarbijate lülitusahelaid ning digitaalliidest, mille kaudu saaks seadet juhtida.

**Oodatavad tulemused:** Tootmisvalmis toite- ja lülitusmoodul

**Lähtetingimused:** Projekteeritav seade peab olema töökindel, liigestuma teiste elektroonikamoodulitega ning olema võimalikult väikeste mõõtmetega. Kuna seade paikneb suletud korpuses, tuleb võimalusel vähendada süsteemi soojenemist.

**Lahendatavad küsimused:** Elektriskeemi projekteerimine, seadme arhitektuuri loomine, trükkplaadi projekteerimine ning tarkvaralise kontrollsüsteemi arendamine.

**Kuupäev:** 19.05.2014

**Üliõpilane:** Sander Suursalu

**Juhendaja:** Argo Kasemaa

**Kinnitaja:** Mihhail Pikkov

## Lühendite ja mõistete sõnastik

<b>ADC</b>	<b><i>Analog-to-Digital Converter</i></b> Seade, mis muundab pideva signaali diskreetseteks komponentideks
<b>BGA</b>	<b><i>Ball Grid Array</i></b> Elektroonikakomponentide pakend, mille kinnitused paiknevad korpuse all
<b>BMS</b>	<b><i>Battery Management System</i></b> Elektrooniline moodul, mis jälgib akuelementide pingeid ja temperatuure ning katkestab vooluringi parameetrite väljumisel tööpiirkonnast
<b>BOM</b>	<b><i>Bill of Materials</i></b> Seadme tootmiseks vajalike komponentide nimekiri
<b>CAN</b>	<b><i>Controller Area Network</i></b> Tööstuslik jadaliides, mida kasutatakse suure elektromagnetilise müraga keskkondades
<b>DMA</b>	<b><i>Direct Memory Access</i></b> Tehnoloogia, mis võimaldab mikrokontrolleri sisemistel komponentidel suhelda mälu ilma protsessori sekkumiseta
<b>DRS</b>	<b><i>Drag Reduction System</i></b> Elektromehaaniline süsteem, mis vähendab sirgel teel auto aerodünaamilist takistust, kuid kurvides suurendab surujõudu
<b>ECU</b>	<b><i>Engine Control Unit</i></b> Elektrooniline moodul, mis haldab vormeli süsteemide tööd ning kontrollib elektrimootori kontrolleri
<b>FEST13/FEST14</b>	<b><i>Formula Estonia 13/Formula Estonia 14</i></b> Eestis tudengite projekteeritava ja ehitatava elektrivormeli nimetus

<b>GDB</b>	<b><i>GNU Debugger</i></b> Tarkvara, mis võimaldab jälgida programmi tööd
<b>HDLC</b>	<b><i>High-Level Data Link Control</i></b> Jadaliidestest kasutatav andmekihi protokoll
<b>HV</b>	<b><i>High Voltage</i></b> Pinge, mis ületab 40 V
<b>IMD</b>	<b><i>Insulation Monitoring Device</i></b> Elektrooniline moodul, mis mõõdab madal- ja kõrgepinge ahelate vahelist takistust ning vea korral isoleerib kõrgepinge akupakid vormeli elektrisüsteemist
<b>LQFP</b>	<b><i>Low Profile Quad Flat Package</i></b> Elektroonikakomponentide pakend, mille väljaulatuvad kinnitused paiknevad korpuse külgedel
<b>MCU</b>	<b><i>Micro Control Unit</i></b> Arvuti, mis paikneb ühel integraalskeemil ning sisaldab protsessorit, mälu ja mitmeid liideseid
<b>MOSFET</b>	<b><i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i></b> Metalloksiid väljatransistor
<b>PDM</b>	<b><i>Power Distribution Module</i></b> Elektrooniline moodul, mis toidab, lülitab ja kaitseb vormeli elektrilisi tarbijaid
<b>QFN</b>	<b><i>Quad-Flat No-Leads</i></b> Elektroonikakomponentide pakend, mille kinnitused paiknevad korpuse külgedel
<b>ROM</b>	<b><i>Read-Only Memory</i></b> Püsिमälu, mille sisu saab kirjutada ainult üks kord
<b>SPI</b>	<b><i>Serial Peripheral Interface Bus</i></b>

Arvutitevaheline jadaliides

**SWD**

***Serial Wire Debug***

Mikrokontrollerite tarkvaraarenduseks kasutatav jadaliides

**TSAL**

***Tractive System Active Light***

Elektrooniline moodul, mis vilgutab turvakaare all olevat valgusdiodriba 40 V kõrgema pinge tekkel vormeli elektrisüsteemi

**UART**

***Universal Asynchronous Receiver/Transmitter***

Arvutitevaheline jadaliides

**USB**

***Universal Serial Bus***

Arvutitevaheline jadaliides

**Bootloader**

Mikrokontrolleri püsimalus paiknev programm, mis suudab jadaliideste kaudu uuendada mikrokontrolleri tarkvara

**High side**

Elektriahel, mis paikneb toitepinge ja tarbija vahel

**Low side**

Elektriahel, mis paikneb massi ja tarbija vahel

**Master**

Kommunikatsioonimudel is teisi seadmeid juhtiv seade, juhendaja

**Slave**

Kommunikatsioonimudel is teiste seadmete poolt juhitud seade, õpipoiss

**Microstrip**

Trükkplaadi ülesehitus, kus välikihtidel on signaalirajad ning sisemistel toiterajad

**Stripline**

Trükkplaadi ülesehitus, kus välikihtidel on toiterajad ning sisemistel signaalirajad

**Pull-up**

Toitepingesse ühendatud takisti

**Pull-down**

Massi ühendatud takisti

**Watchdog**

Elektrooniline taimer, mis tuvastab mikrokontrollerite talitlushäire



## **Jooniste nimekiri**

Joonis 1.1 FEST12-e kolmemõõtmeline mudel .....	13
Joonis 1.2 FEST14-e elektroonika arhitektuur .....	15
Joonis 2.1 Lülitus- ja mõõteahela mudel .....	21
Joonis 2.2 PDM-i filtreerimata sisendpinge .....	22
Joonis 2.3 Suure signaali MOSFET-i tööpiirkond .....	23
Joonis 2.4 Mikrokontrolleri kvartsi ühendusskeem.....	26
Joonis 2.5 Mikrokontrolleri toiteskeem.....	27
Joonis 2.6 PDM-i toiteskeem.....	29
Joonis 2.7 Elektroonilise kaitse töö lühiaegses veaolukorras.....	32
Joonis 3.1 Levinud trükkplaadi ülesehitused, läbilõige trükkplaadist.....	34
Joonis 3.2 PDM-i ahelate paigutus trükkplaadil.....	36
Joonis 3.3 Reeperite kasutamine trükkplaadil .....	37
Joonis 4.1 Tarkvara arhitektuur .....	38
Joonis 4.2 Andmevahetuseks kasutatav protokoll.....	39

## Sisukord

Sissejuhatus .....	11
1. Ülevaade projekteeritavast seadmest .....	13
1.1 FEST14-e elektroonika arhitektuur .....	13
1.2 PDM-i arendamise ja kasutamise eelised .....	15
1.3 PDM-i kontseptsioon .....	17
2. Elektriskeemi projekteerimine .....	19
2.1 Lülitus- ja mõõteahelate kontseptsioon .....	19
2.2 Mõõteahelate projekteerimine .....	21
2.3 Lülitusahelate projekteerimine .....	23
2.4 Juhtelektroonika kontseptsioon .....	25
2.5 Juhtelektroonika elektriskeemi projekteerimine .....	25
2.6 Toiteahelate projekteerimine .....	28
2.7 Kaitseahela projekteerimine .....	30
3. Trükkplaadi projekteerimine .....	34
4. Tarkvaralise kontrollsüsteemi arendamine .....	38
Kokkuvõte .....	40
Summary .....	41
Kasutatud materjalid .....	41
Lisa 1 PDM-i elektriskeem .....	43
Lisa 2 PDM-i trükkplaadi kolmemõõtmeline mudel .....	52

## Sissejuhatus

Formula Student on rahvusvaheline tootearendusvõistlus, mis algas 1981. aastal Ameerika Ühendriikides ning jõudis 1998. aastal Euroopasse. Võistlussarja eesmärgiks on anda tudengitele interdistsiplinaarseid oskuseid tootearendusest, tootmisest ning turundusest, kasutades selleks autosporti võlusid. Võistlused ei koosne vaid võidusõidust – lõpptulemus sõltub paljuski autol kasutatud tehniliste lahenduste põhjendustest ja tööpõhimõtete selgitustest, hinnakalkulatsiooni esitamisest ning tasuvusarvutuste kaitsmisest, tooteinformatsiooni koostamisest ning turundusesitlusest.

Maailmas toimuvate muutuste taustal on viimastel aastatel sise põlemismootoriga autode kõrval võistlussarjas lubatud ka elektriliste jõuallikatega sõidukid, seetõttu on ka Eesti Formula Student-i meeskond alates 2013. aasta hooajast võistlemas elektriautoga. Tänapäeva autod on tulvil elektroonikat, sama tendents on ka Formula Student-i sarjas. Alates 2012. aasta hooajast oleme samm-sammult iseseisvalt arendatud elektrooniliste seadmete hulka kasvatanud ning käesoleval aastal oleme paljud ostutooted otsustanud asendada iseseisvalt arendatud seadmetega.

Varasematel vormelitel on kasutatud aku ja auto elektrisüsteemi vahelülina nii kaitsmeplukke kui ka turult leitavaid PDM-e, kuid kumbki lahendus ei ole täielikult vastanud meie nõuetele. Formula Student-i reeglistikust lähtuvalt vajame me väga spetsiifilist võimekust, mida standardsed lahendused ei paku, seetõttu tuli iseseisvalt luua uus, Formula Student-i jaoks sobiv elektrooniline seade.

Bakalaureusetöö eesmärgiks on luua sardsüsteem, mis kaitseb ja toidab auto elektroonikat, on digitaalliidese kaudu kontrollitav ning võimaldab ükshaaval juhtida ligikaudu kahtekümnet väljundit, mis peavad olema nii sulavkaitsmetega kui ka elektrooniliselt kaitstud. Bakalaureusetöö tulemuseks on tootmiseks valmis prototüüp, mida kasutatakse Eesti järgmises elektrivormelis.

Töö on jaotatud kolmeks alamülesandeks:

1. Elektriskeemi projekteerimine
2. Trükkplaadi projekteerimine
3. Tarkvaralise kontrollsüsteemi arendamine

Elektriskeemi projekteerimine hõlmab endas seadme arhitektuuri loomist, komponentide valimist ja komponentide ning elektriahelate arvutusi. Trükkplaadi projekteerimine seisnes optimaalse ülesehituse ja komponentide paigutuse valimises, suurtest vooludest põhjustatud soojenemise vähendamises ning trükkplaadi tootmiseks optimeerimises. Kuna projekteeritav moodul on üks osa suuremast süsteemist, tuleb arvestada nii teiste moodulite paiknemise, kinnituste kui ka korpuse disainiga, samuti tuleb lisada moodulitevahelised ühendused. Tarkvaralise kontrollsüsteemi arendamine hõlmab endas nii tööriistade valimist, tarkvara arhitektuuri loomist kui ka selle implementeerimist.

# 1. Ülevaade projekteeritavast seadmest

## 1.1 FEST14-e elektroonika arhitektuur

FEST13-e elektroonika suureks probleemiks oli vähene planeerimine ning süsteemi suur killustatus. Kuna tegu oli Eesti esimese elektrivormeliga, ei tajutud kõikide ahelate vajalikkust enne projekteerimise alustamist, seetõttu tuli igale trükkplaadile projekteerida eraldi korpus, samuti tuli suur osa elektriskeemidest dubleerida. FEST14-e elektrisüsteemi arhitektuuri koostades oli eesmärgiks luua kompaktne süsteem, kus välditaks elektriahelate kordumist süsteemi eri osades. Kuigi esmane idee seisnes kogu madalpinge elektroonika ühele ning kõrgepinge oma teisele trükkplaadile paigutamises, langes otsus modulaarse, kuid tihedalt sidestatud süsteemi kasuks. Antud otsus sündis eelkõige võimalike kulude vähendamise vajadusest, kuna vigase disaini korral ei pea uuesti tootma kogu auto elektroonikat, vaid võib piirduda ühe mooduliga. Kuna võistlustel on sageli tarkvaraliste muudatuste tegemiseks kõigest mõned minutid ning seega on vigade tekkimise tõenäosus suhteliselt suur, tagab modulaarsus suurema töökindluse ning ka vastavuse reaalse süsteemi nõuetele.



Joonis 1.1 FEST12-e kolmemõõtmeline mudel

FEST14-l kasutatava elektroonika, mis on meeskonnaliikmete poolt arendatud, võib jagada kolme suuremasse kategooriasse: kõrgepinge akupakkide jälgimise süsteem, juht- ja

kontrollelektronika moodulid ning üksikud trükkplaadid, mida kasutatakse spetsiifilistes rakendustes.

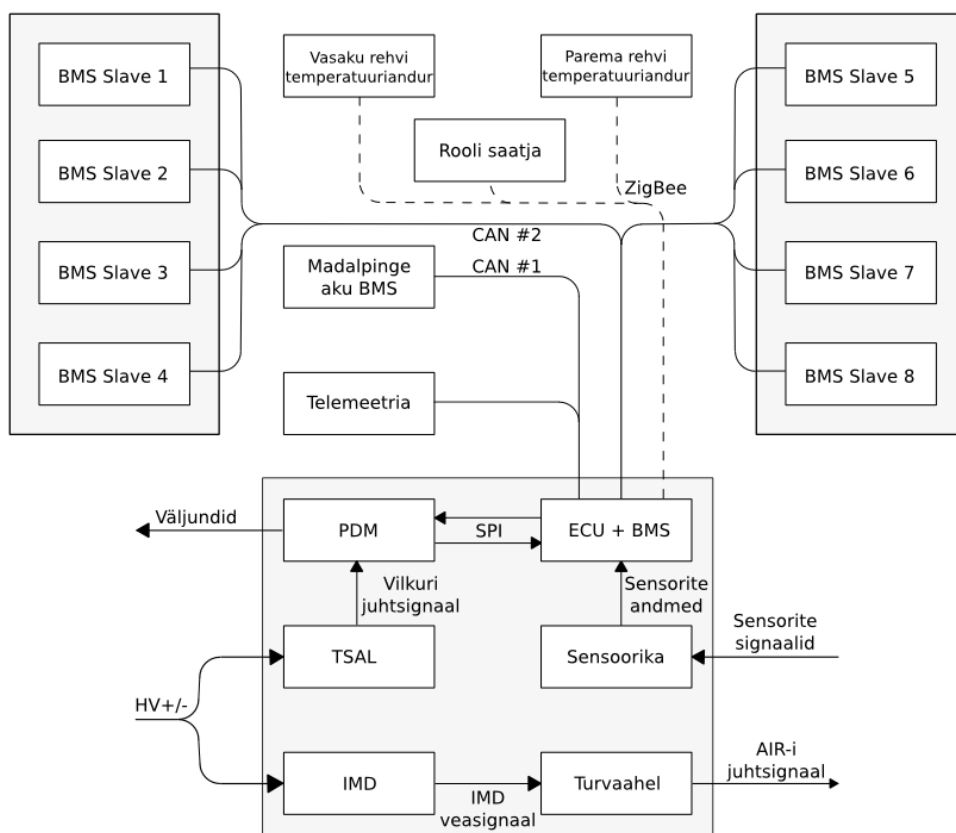
FEST14-e akupakk on jaotatud kaheksaks mooduliks, mis on paigaldatud kahte akukasti. Igale moodulile on kinnitatud trükkplaat, mis võendab elementide pingeid, temperatuure ning võimaldab neid balansseerida. Kuna võistlustel suletakse kontrollitud akupakid kleebistega, ei ole võimalik jooksvalt muudatusi sisse viia, seetõttu on BMS-i loomisel kasutatud *master-slave* süsteemi, kus *slave*-i trükkplaadid paiknevad akupakkides ning *master* paikneb keskses elektroonikaüksuses, kuhu on alati tagatud ligipääs.

Kuigi FEST14-e loomisel on püütud vähendada üksikute trükkplaatide arvu, tuleb neid siiski teatud rakendustes kasutada, näiteks on rooli paigaldatud autonoomne elektroonika, mis saadab juhtmevabalt nupuvajutuste signaale ECU-sse. Samasugust lähenemist on kasutatud ka rehvitemperatuuri jälgimise süsteemi loomisel, kuna see kinnitub väljastpoolt käänmikule, mistõttu on selle ühendamine auto juhtmestikku raskendatud. Eraldi on paigaldatud ka telemeetria süsteem, mis saadab soovitud CAN-i pakette juhtmevabalt raja äärde, kuna võimalikult suure ühenduskauguse saavutamiseks on see kinnitatud turvakaare külge, kus on vähem häiringuid ning saatja ja vastuvõtja vahelisi objekte.

FEST14-e arendamisel on enim ressursse panustatud juht- ja kontrollelektronika loomisele, mis koosneb kuuest moodulist:

1. IMD – ostutoode, mille eesmärgiks on mõõta kõrgepinge aku positiivse ja negatiivse klemmi ning kõrgepinge ja madalpinge aku negatiivse klemmi vahelist takistust. Kui mõõdetud takistus langeb alla eelmääratud väärtuse, peab elektroonika kõrgepinge akupaki ülejäänud autost isoleerima.
2. TSAL – kõrgepinge moodul, mille eesmärgiks on vormeli ümber tegutsevaid isikuid hoiatada ohtliku pinge tekkimisel väljapoole akupakke. Hoiatava seadisena kasutatakse turvakaare all paiknevat valgusdiodriba.
3. Turvaahel – moodul, mis jälgib süsteemide tööd, mille rikke korral võib juht või meeskonnaliige sattuda eluohtlikku olukorda ning mis isoleerib vea tekkel kõrgepinge akupakid vormeli elektrisüsteemist.

4. ECU ja BMS *master* – ECU koordineerib ja jälgib kogu vormeli tööd. Samal moodulil paiknev BMS *master* haldab akukastides paiknevaid BMS *slave*-e ning jälgib elementide parameetreid.
5. Sensoorika – moodul, mis võendab kõiki vormeli andureid ning saadab tulemused üle digitaalliidese salvestamisvõimekusega moodulile.
6. PDM – FEST14-e elektroonika keskne moodul, mis kaitseb auto elektroonikat, kontrollib elektrilisi tarbijaid, mõõdab voolutarvet ning läbi mille ühendatakse mooduleid nii omavahel kui ka auto elektrisüsteemiga.



Joonis 1.2 FEST14-e elektroonika arhitektuur

## 1.2 PDM-i arendamise ja kasutamise eelised

Formula Student on nõrgalt reglementeeritud võistlussari, andmaks tudengitele rohkelt võimalusi innovaatiliste lahenduste loomiseks, kuid kõigi võistlejate turvalisuse tagamiseks on hädavajalik minimaalne reeglistik. Kuna vormelites võib olla üle 100 meetri juhtmeid ning sadu ühendusi, võib halva joodise või nõrgalt pressitud kontakti purunemisel kergelt tekkida

lühis purunenud juhtme ning vormeli raami kokkupuutel. Samuti ei ole harvad juhtumid, kus vormeli mehaanika ei pea koormusele vastu ning purunenud komponendid võivad purustada juhtmeid või kontakte. Kuna tekkinud lühise korral jääb voolu piirama kõigest madalpinge aku sisetakistus, võib vool kasvada väga suureks ning liitiumioonakude omaduste tõttu võib see süttida. Selle vältimiseks näeb reeglistik ette auto elektrisüsteemi kaitsmist sulavkaitsmetega. Kuigi reeglistik näeb ette, et kõik elektrisüsteemid peavad olema lühiste vastu kaitstud, ei ole määratletud kaitsmise viis, seega võib kasutada kõigest ühte peakaitset. Kuigi ühe peakaitse kasutamine on ahvatlev süsteemi lihtsuse ning kerge kaalu tõttu, ei pruugi antud lahendus olla pikas perspektiivis kõige jätkusuutlikum, kuna lühise tekkel mistahes elektrisüsteemi osas jääb auto võistlustules seisma. Selle vältimiseks on FEST14-s kõik elektriahelad eraldi sulavkaitsmetega kaitstud, seega võib mõnes vähemtähtsas süsteemis olnud lühise korral auto edukalt edasi võistelda.

Vormelil on mitmeid elektrilisi tarbijaid, mida tuleb välise sisendite või keeruliste algoritmidega juhtida. Varasemate vormelite elektroonika oli killustunud ning iga süsteem juhtis enda väljunditega just tema funktsiooniks vajalikke tarbijaid. Kuna osadel juhtelektronikat sisaldavatel trükkplaatidel puudus võimalus suure voolu signaalide juhtimiseks, tuli sageli kasutada väliseid releesid. See muutis süsteemi paindumatuks ning juhtmestiku keeruliseks ja segaseks.

Täpselt sama probleemi lahendamiseks on motosportide autoelektronikat tootvad ettevõtted valmistanud spetsiaalseid PDM-e, millel on võimekus juhtida mitmeid väljundeid ning kaitsta seadmeid lühiste eest. Enamasti on neil seadmetel ka võimalus parameetreid üle digitaalliidese seadistada ning jooksvalt voolutarvet jälgida ja salvestada. Kuna ohutuse tagamiseks näeb Formula SAE reeglistik ette teatud turvasignaalide juhtimise ilma tarkvaralise kontrollita, ei ole võimalik piirduda ainult ostutootega, seega tuli FEST14-le arendada spetsiaalne PDM, mis vastab oma parameetritelt Formula Student-i nõuetele. Kuna Formula Student-i peamine eesmärk on tudengitele projekteerimisvõimaluse andmine ning turul leiduvate seadmete hind on tunduvalt kallim trükkplaadi tootmise ja komponentide hinnast, oli eelmistel aastatel kasutatud ostutoote asendamine spetsiaalse sardsüsteemiga meeskonna senise tegevuse loogiline jätk.



### 1.3 PDM-i kontseptsioon

PDM-i arendades on aluseks võetud turul leiduvate seadmete võimalused, millele on lisatud Formula Student-i spetsiifilised vajadused. PDM-i tuumiku moodustavad 20 väljundit, mida on võimalik trükkplaadil paikneva mikrokontrolleriga juhtida. Tänu väljundite lülitamise võimekusele ei pea kõik tarbijad pidevalt pingestatud olema, seetõttu on võimalik märkimisväärne energia kokkuhoid, näiteks vormeli ventilaatorid saab aktiveerida alles temperatuuri tõusmisel üle eelnevalt määratud taseme. Samuti on võimalik servomootorite juhtimine mikrokontrolleris riistvaraliselt genereeritud PWM-i (*Pulse-Width Modulation*) signaaliga. Auto voolutarbe mõõtmiseks on igal väljundil jadatakisti, millel tekkivat pingelangu võimendatakse ning mille väärtus võendatakse mikrokontrolleriga. Voolutarbe jälgimine võimaldab lisaks informatiivsele poolele tuvastada seadmetel tekkivaid vigu enne probleemide esinemist. Tänu voolutarbe jälgimisele on varasemates vormelites tuvastatud pumpade ja starterite laagrite kulumist enne suuremate probleemide esinemist, kuna nende voolutarve hakkab vananedes kiiresti kasvama. Väljundite lülitamise ning voolu mõõtmise kombineerimisel on võimalik luua elektrooniline kaitse, mis lülitab voolu kasvamisest üle eelnevalt määratud nivoo väljundi välja. Kuigi kõikidele väljunditele on lisaks elektroonilisele kaitsele lisatud ka sulavkaitsmed, on võimalik väljundeid elektrooniliselt isoleerida sulavkaitsmete rakendumisest kiiremini. Tänu sellele on auto elektrisüsteem paremini kaitstud ning pärast vea esinemist ei tule sulavkaitset vahetada. Kuna elektroonilise kaitsmega on võimalik väga täpselt seadistada voolu piirväärtused, võimaldab dubleeritud süsteem ühe väärtusega sulavkaitsmete kasutamise paljudel väljunditel, mis omakorda vähendab märgatavalt seadme hinda. Kuna võistlustel esinevate probleemide lahendamiseks on väga vähe aega, on kõikidele väljunditele paigaldatud valgusdiodid, mis võimaldavad operatiivselt tuvastada vigase väljundi.

PDM-l on infovahetuskanal ECU-ga, mis on omakorda ühenduses kõikide vormeli süsteemidega. See võimaldab PDM-ga otsest ühendust mitte omavatel süsteemidel juhtida PDM-i väljundeid, näiteks saab roolil olevate nuppudega juhtida DRS-i mootoreid. Kuna PDM on projekteeritud ECU *slave*-ina, sobib PDM-i ja ECU vahelise infovahetuse füüsilise kihi jaoks suurepäraselt SPI. Andmekiht baseerub jadaühenduste korral sagedasti kasutataval HDLC protokollil.

FEST14-e elektroonika on tihedalt sidestatud ning projekteeritud ühte korpusesse, seetõttu on trükkplaadid omavahel ühendatud lintkaablite ja piikribadega. Kuna kõik süsteemid vajavad

sama väljundpingega toiteallikat, on kõik vajalikud toiteplokid paigutatud PDM-le. See vähendab trükkplaatide maksumust ja pindala, kuid selle peamine eelis seisneb dubleeritavate elektriskeemide eemaldamises, mis omakorda vähendab projekteerimisvigade tekkimise võimalust ning tõstab süsteemi töökindlust. Vormeli kalli elektroonika kaitsmiseks on PDM-i sisendil mitmefunktsiooniline kaitseahel, mis isoleerib vormeli elektroonika madalpinge akust nii üle-, ala- ja vastupinge kui ka lühise korral.

## 2. Elektriskeemi projekteerimine

Projekteeritud elektriskeem on esitatud lisas 1. Elektriskeemi arvutused on esitatud sarnaste ahelate jaoks üks kord, kusjuures arvutustes kasutatud komponentide tähistused kattuvad lisas 1 esitatud elektriskeemi tähistustega.

### 2.1 Lülitus- ja mõõteahelate kontseptsioon

PDM-i elektriskeemi koostamine algas väljundite projekteerimisega. PDM peab suutma lülitada väljundeid ning mõõta volutarvet. Kahe eelneva võimekuse kombineerimisega on võimalik luua elektrooniline kaitse, mis isoleerib ülevoolu korral tarbija madalpingeakust. Suure töökindluse tagamiseks on elektroonilised kaitseahelad dubleeritud sulavkaitsmetega ning väljunditele on lisatud Schottky diodid, mis väldivad induktiivse koormuse või valesti ühendatud juhtmete korral vastupidise voolu tekke. Kuna juhtmetel ja ühendustel on mõõdetav induktiivsus, võib MOSFET-de kiire ümberlülitumine põhjustada hetkelisi ülepingeid, mis kahjustavad lülitusahelat. Selle vältimiseks on lülitusahelaga rööbiti ühendatud kiiretoimeline ülepingskaitse diod, mis lühistab hetkeliselt MOSFET-i neelu ja lätte, tänu millele see ei kahjustu. Töö käigus tekkinud vigade operatiivseks lahendamiseks on igale väljundile lisatud valgusdiod, mis võimaldab vigase ahela visuaalset tuvastamist, mistõttu pole vajalik ajakriitilises olukorras lugeda mikrokontrolleri kuvatavat informatsiooni üle digitaalliidese.

Väljundite loomisel on kasutatud *high side* ahelaid, millel on mitmeid eeliseid võrreldes *low side* ahelatega:

1. Tarbija negatiivse klemmi võib ühendada raami kõige lähemasse kinnituspunkti, kuna vormeli ehitamisel on kasutatud toruraami ning madalpinge aku negatiivne klemm on ühendatud vormeli raamiga. See vähendab juhtmete pikkust *low side* ahelatega võrreldes mitmekordselt, samuti lihtsustub auto juhtmestik märkimisväärselt ning saadav lõpptulemus on visuaalselt tunduvalt parem.
2. *Low side* ahelate korral ühendatakse ülevoolu korral lahti tarbija ja massi vaheline ühendus, kuid pingestatud juhtme kontaktil raamiga ei suuda antud ahel viga tuvastada ning voolu jääb piirama madalpinge aku sisetakistus ning ühenduste takistus.

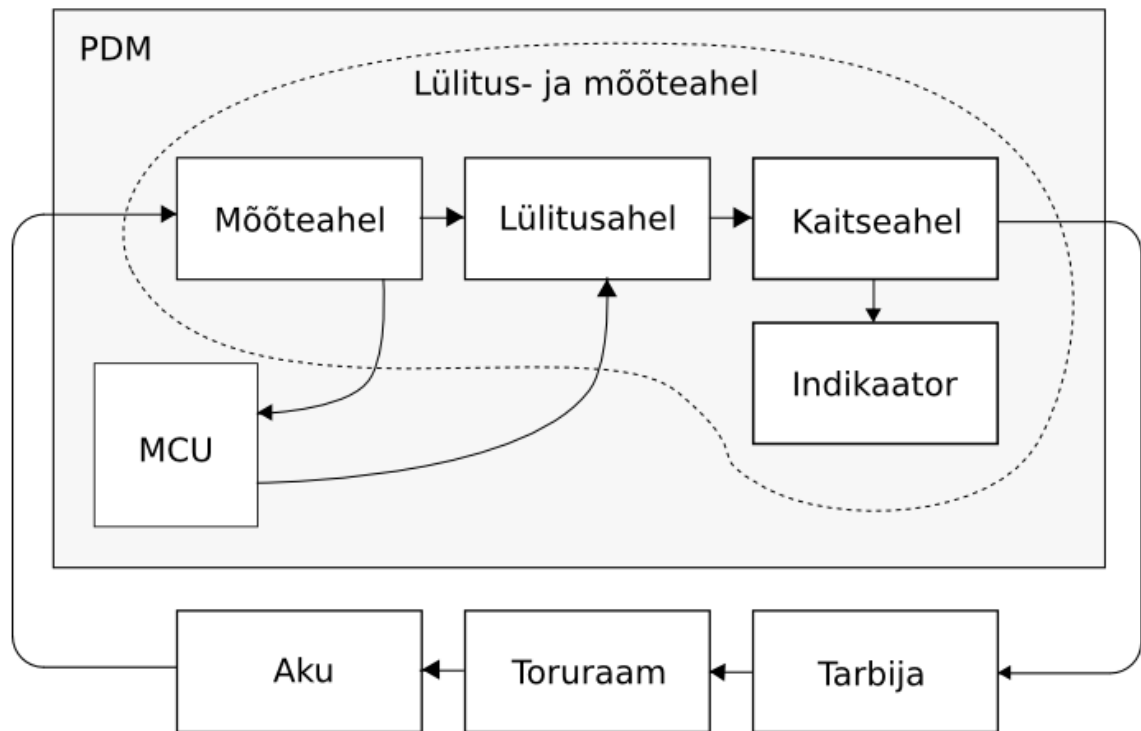
*High side* ahelaid kasutades on võimalik tuvastada ka eelnevalt mainitud ülekoormuseid.

3. Kuna madalpinge aku ja PDM-i väljundi vaheline induktiivsus on palju väiksem tarbijate induktiivsusest, väheneb ülepinge tekkimise võimalus lülitusahelale.
4. *High side* ahelate kasutamine võimaldab valgusdiodide ühendamise otse väljundile, seega pole vaja kasutada eraldi MOSFET-e nende lülitamiseks.
5. *High side* ahelate korral ei teki mõõte- ja lülitusahelatest põhjustatud potentsiaalide vahet tarbija massi ja madalpinge aku negatiivse klemmi vahel.

Kuigi *high side* ahelate kasutamisel on mitmeid eeliseid, on neil ka omad puudused:

1. *High side* lülitusahelates kasutatakse P-kanaliga MOSFET-e, mille kanali takistus on suurem *low side* lülitites kasutatavatest N-kanaliga MOSFET-idest, seega suureneb lülitusahelal tekkiv pingelang ning kasvab sellel eralduv võimsus. Kuigi pinget tõstvat regulaatorit kasutades oleks võimalik lülititena kasutada ka N-kanaliga MOSFET-e, ei ole see elektriskeemi lisandunud keerukuse ning regulaatori tekitatava elektromagnetilise müra tõttu antud olukorras mõistlik.
2. *Low side* ahelate korral puudub vajadus Schottky diodide kasutamiseks, kuna lülitusahela väljund on ühendatud massi.
3. *High side* ahela korral kasutavad voolumõõte integraalskeemid on kallimad *low side* ahelate vastavatest integraalskeemidest.

Kuna vormeli puhul on tegemist prototüübiga, mis ei lähe seeriatootmisesse, kuid peab olema töökindel ning veenma kohtunikke lahenduse õigsuses, on antud projekti raames kasutatud *high side* ahelaid, mis vastavad paremini esitatud nõuetele.



Joonis 2.1 Lülitus- ja mõiõteahela mudel

## 2.2 Mõiõteahelate projekteerimine

PDM-i lülitatavad väljundahelad on jaotatud kahte gruppi: 375 mA ja 2000 mA väljundid. Kuigi väljundeid läbiv vool on erinev, on mõlemat tüüpi väljunditel kasutatud samu komponente, kuna see vähendab erinevate komponentide hulka ning võimaldab vajaduse tekkides madalama vooluga väljundite muutmise suurema vooluga väljunditeks.

Voolutarbe mõiõtmiseks on kasutatud ADM4073 seeria integraalskeeme, mis võimendavad šunttakistil tekkivat pingelangu 50 korda. Mõiõtetäpsuse tagamiseks on nii ADM4073 sisendpinge kui maa digitaalhelatest eraldatud. Samuti on lähtunud andmelehe soovitusest ning kõikidele ADM4073 seeria mõiõteskeemidele on toiteahelasse lisatud 100 nF kondensaatori näol lokaalne energiaallikas.

Mõiõtetakisti väärtuse suure vooluga väljunditele saab leida kasutades Ohmi seadust, integraalskeemi toitepinget  $V_{cc}$  ning võimendustegurit  $Av$ . Kuna  $V_{cc} = +3,3 V$ ,  $I = 2 A$  ja  $Av = 50$ , on mõiõtetakisti väärtus leitav järgmise valemiga:

$$R_{200} = \frac{V_{cc}/Av}{I} = \frac{3,3V/50}{2A} = 0,033\Omega.$$

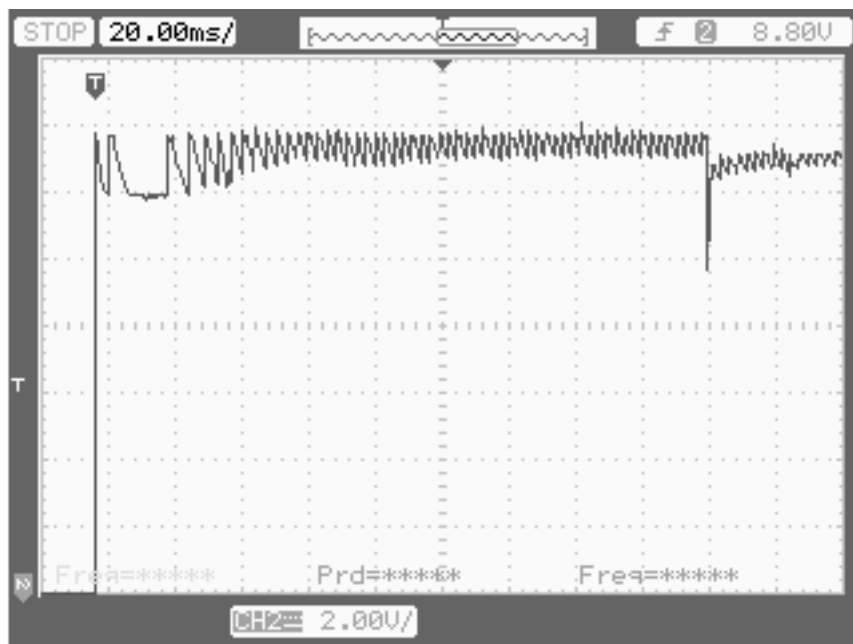
Lühikeste ülevoolupulsside mõõtmiseks on mõõtevahemikku ~ 60% suurendatud, seega tuleks kasutada 20 mΩ mõõtetakistit.

Kuna väikse vooluga väljunditel on  $V_{cc} = +3,3 V$ ,  $I = 0,375 A$  ja  $A_v = 50$ , on mõõtetakisti väärtus leitav järgmise valemiga:

$$R_{240} = \frac{V_{cc}/A_v}{I} = \frac{3,3V/50}{0,375A} = 0,176\Omega.$$

Lühikeste ülevoolupulsside mõõtmiseks on mõõtevahemikku ~ 60% suurendatud, seega tuleks kasutada ~ 105 mΩ mõõtetakistit. Takistite hinda ning väikestes kogustes saadavust arvesse võttes on kasutatud 100 mΩ mõõtetakisteid.

Suurte lülitusvoolude tõttu tekib vormeli elektrisüsteemis pingelang, mistõttu ei ole elektroonika sisendpinge stabiilne. Kuigi see ei sega digitaalhelate tööd, ei sobi kõikuv mass analoogahelate referentspingeks. Joonisel 2.2 on toodud filtreerimata madalpinge ostsillogramm mõõdetuna PDM-i sisendilt. Kuigi kondensaatoriploki lisamisel vormeli elektrisüsteemi väheneb pinge kõikumine ligi kolm korda, ei ole seda siiski võimalik täielikult eemaldada, mistõttu on analoog- ja digitaalmaa isoleerimine hädavajalik. Seetõttu on trükkplaadil eraldatud digitaal- ja analoogmaa, mis on ühendatud aku negatiivse klemmiga eri juhtmetega.

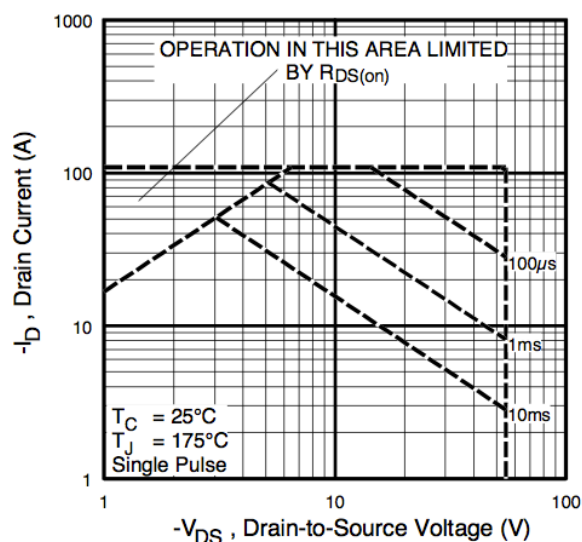


Joonis 2.2 PDM-i filtreerimata sisendpinge

## 2.3 Lülitusahelate projekteerimine

Väljundite lülitamiseks on kasutatud International Rectifier-i P-kanaliga MOSFET-e IRFR5305, mille peamisteks eelisteks antud kasutusvaldkonnas on kanali madal takistus ning kõrge neelu-lätte läbilöögipinge. Antud omadused on tähtsaimad, kuna kanali madal takistus vähendab MOSFET-il tekkivat pingelangu, tänu millele erineb tarbijale kanduv pinge võimalikult vähe madalpinge aku pingest ning neelu-lätte vaheline kõrge läbilöögipinge võimaldab seadmel vastu pidada planeeritud tööpingest kõrgematele pingetele.

Kasutatavate MOSFET-ide valikul osutus väga tähtsaks ka maksimaalne lubatav töövahemik, millest sõltub loodud väljundite maksimaalne vool. Kuna paljudel tarbijatel on suur sisendmahtuvus, võib käivitusvool sageli ületada väljundi nominaalvoolu väärtust. Kasutatud MOSFET-i korral võib 16 V akupinge korral teda läbiv alalisvool ulatuda 10 A, mis võimaldab efektiivse jahutusega trükkplaadi disaini korral käivitusvoolude viiekordset ületamist suure vooluga väljundi nominaalväärtusest.



Joonis 2.3 Suure signaali MOSFET-i tööpiirkond

Allikas: IRFR5305PbF

Kuna mikrokontrolleri väljundid on lülitatavad +3,3 V ja 0 V vahel, ei saa P-kanaliga MOSFET-e ilma vaheaheelata lülitada. Seetõttu lülitatakse mikrokontrolleri väljunditega nõrga signaali N-kanaliga MOSFET-i, mis omakorda juhib suure voolu MOSFET-i. Mikrokontrolleri ja transistori kaitsmiseks on mikrokontrolleri jala ja N-kanaliga MOSFET-i vahele lisatud 150 Ω väärtusega takisti, mis piirab MOSFET-i paisu laengu ümberlaadimisvoolu vastavalt järgmisele võrrandile 22 mA:

$$I = \frac{V_{CC}}{R_{204}} = \frac{3,3V}{150\Omega} = 0,022A.$$

Mikrokontrolleri taaskäivituse korral lülitatakse tema väljundid kõrge takistusega olekusse, seetõttu jääb MOSFET ilma aktiivse tüürsignaali. Kuna MOSFET-i paisul on väga suur takistus, võib vähimigi elektromagnetiline müra põhjustada tema kanali takistuse ettearvamatut väärtust. Kuna taaskäivitussignaali võib põhjustada nii väline *watchdog*, aku pingelangus alla 10 V, tõus üle 28 V või elektroonikat kaitsva ülevoolukaitsme rakendumine, peavad väljundid alati jääma fikseeritud olekusse. Selle tagamiseks on MOSFET-ide paisu ja maa vahele lisatud 10 K $\Omega$  *pull-down* takisti.

Kasutatud suure voolu MOSFET-i paisu ja läte vaheline maksimaalne potentsiaalide vahe võib olla 20 V. Kuna seadme sisendpinge võib olla vahemikus 10-28 V, ületaks 28 V sisendpinge korral paisu ja läte vaheline pinge maksimaalselt lubatud väärtust, seetõttu on paisu ja nõrga signaali transistori vahele lisatud pingejagur, mis langetab selle 14 V. Kuna tekitatud pingejagur tarbib aktiivse väljundi korral pidevalt voolu, on kasutatud 10 K $\Omega$  takistit, tänu millele on aktiivse väljundi voolutarve kõigest 800  $\mu$ A:

$$I = \frac{V_{BAT}}{R_{201} + R_{202}} = \frac{16V}{20 * 10^3\Omega} = 800 * 10^{-6}A.$$

Projekteeritava seadmel on igal väljundil valgusdiodid, seetõttu ulatuks väljunditel olevate valgusdiodide maksimaalne voolutarve nominaalvoolu korral 400 mA. Seadme voolutarbe vähendamiseks on suurendatud valgusdiodi jadatakistit 3,3 K $\Omega$ , tänu millele langeb iga valgusdiodi voolutarve 4,2 mA ning summaarne voolutarve 84 mA:

$$I = \frac{V_{BAT} - V_{LD200}}{R_{203}} = \frac{16V - 2,1V}{3,3 * 10^3\Omega} = 4,2 * 10^{-3}A.$$

Kuigi suurema jadatakisti tõttu väheneb valgusdiodide heledus, ei ole see antud kasutusvaldkonnas probleem, kuna nad ei pea olema erksa valguse käes nähtavad.

Vastavalt Formula Student-i reeglistikule, ei tohi turvaahelad olla tarkvaraliselt kontrollitavad, seetõttu juhitakse TSAL-i väljundiga otse PDM-i üheksandat väljundit, mis kontrollib turvakaare all paiknevat valgusdiodriba.



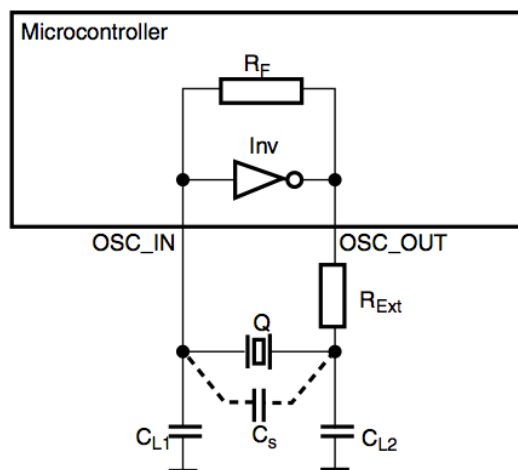
## 2.4 Juhtelektroonika kontseptsioon

Seadme juhtelektroonika tuumiku moodustab mikrokontroller, mille valimine oli pikk ja põhjalik protsess. Vormeli töökindluse suurendamiseks ja arendusaja vähendamiseks oli selle hooaja üheks peamiseks eesmärgiks kogu juhtelektroonika viimine ühtsele platvormile. Kuna eelmistel aastatel on samaaegselt kasutatud nii Atmeli AVR-i, Microchip-i PIC-i kui ka NXP LPC seeria mikrokontrollereid, oli arendusprotsess killustunud ning töö käigus tuli luua sama perifeeria draivereid kõikidele platvormidele, samuti tuli igale mikrokontrollerile luua uus elektriskeem.

Kõikide moodulite vajadustele vastava mikroskeemi leidmisel osutusid peamiseks kriteeriumideks sisemise CAN-i kontrolleri olemasolu, suure arvu analoogsisendite võimekus ning võimalikult vähese jalgade arvuga pakendite leidumine. Platvormi jätkusuutlikkusest ja arendusmeeskonna varasematest kogemustest lähtuvalt tehti valik kolme tootja ARM Cortex-M tuumaga mikrokontrollerite vahel. Kuigi BGA pakendis komponentide kasutamine vähendaks trükkplaadi mõõtmeid, ei olnud nende kasutamine võimalik, kuna vajadusel peab olema võimalik komponentide vahetamine ilma spetsiaalse ladumismasinata, seega jäid valikusse peamiselt erinevate jalgade arvuga LQFP pakendid. Kuna NXP ega Atmeli tootevalikus ei leidunud alla 100 jalaga Cortex-M seeria mikrokontrollereid, mis vastaksid püstitatud kriteeriumidele, langes otsus STMicroelectronics-i kasuks. STM32F3 seeria mikrokontrollerid pakkusid valikus olnutest ainsana sisemist CAN-i kontrolleri ning suurt arvu analoogsisendeid LQFP-64 pakendis, tänu millele kadus vajadus välise analoogsisendeid mõõtva komponendi järele, mis omakorda võimaldas kompaktsama trükkplaadi loomise. Objektiivsuse huvides tuleb märkida, et 2014. aasta kevadeks on NXP tootevalikusse lisandunud suur arv väikses pakendis Cortex-M seeria mikrokontrollereid, millel on CAN-i tugi, kuid mis muutusid laias ulatuses kättesaadavaks alles pärast käesoleva süsteemi valmimist.

## 2.5 Juhtelektroonika elektriskeemi projekteerimine

STM32F3-e taktsignaali genereerimiseks on kasutatud välist kvartsi. Sisemist taktsignaali kordistit kasutades on võimalik seda tõsta 72 MHz, seega on 8 Mhz väline kvarts piisav. Välist taktsignaali genereeriv ahel on loodud vastavalt tootjapoolsetele soovitudele, mis on leitavad allikast 2.



Joonis 2.4 Mikrokontrolleri kvartsi ühendusskeem

Allikas: AN2867 Application note

Kuna kasutatud kvartsi koormusmahtuvus  $C_L$  on 18 pF, parasiitne mahtuvus  $C_S$  on enamikes allikates märgitud 5 pF ning  $C_{L1} = C_{107}$  ja  $C_{L2} = C_{108}$ , võib kondensaatorite väärtused leida järgnevalt:

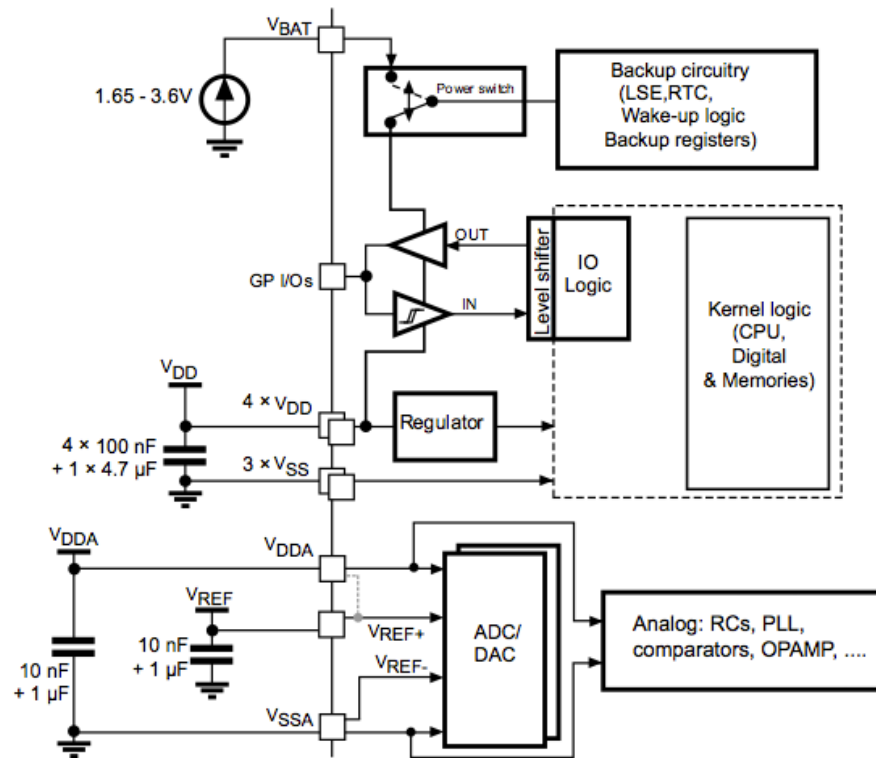
$$C_L = \frac{C_{107} * C_{108}}{C_{107} + C_{108}} + C_S$$

$$C_L - C_S = \frac{C_{107}^2}{2 * C_{107}} = 13 * 10^{-12} F, \text{ seega } C_{107} = C_{108} = 26 * 10^{-12} F.$$

Kvartsi efektiivseks tööks tuleb elektriskeemi projekteerides tagada, et selles eralduv võimsus ei ületaks tootjapoolset spetsifikatsiooni. Selle vältimiseks on  $R_{106}$  ja  $C_{108}$  kombinatsioonina loodud madalpääsfilter, mis tagab ostsillaatori töö nominaalsagedusel, kuna RC-filtriga eemaldatakse harmoonilised sagedused. Kuigi kasutatud kvarts ei vaja välist takistit, on tulevaste BOM-i muudatuste lihtsustamiseks lisatud jadatakisti võimekus, mis on hetkel asendatud nulltakistiga.

Mikrokontrolleri stabiilse töö tagamiseks on kõikidele toitesisenditele lisatud kondensaatorid, mis talitlevad madalpääsfiltrina ning lokaalse energiaallikana ning mille väärtused on valitud vastavalt andmelehes soovitatule. Analoogsisendite võimalikult stabiilse töö tagamiseks on ADC toitepinge genereeritud eraldi lineaarregulaatorit kasutades. Kuigi lülitusregulaatori väljundi ferriidiga filtreerimine on lihtsam ja odavam eraldi regulaatorist, ei suuda selline lahendus tagada spetsiaalse regulaatoriga võrreldavat stabiilsust. Kasutatud mikrokontrolleeril on võimalik välise patareiga toita nii sisemist reaalaraja kella kui ka nelja 32-bitist registrit, mis

võimaldavad säilitada andmeid ka välise toite eemaldamisel. Kuigi teistel FEST14-e moodulitel on seda rakendatud, ei ole antud moodulil selle järgi sisulist vajadust, seega on  $V_{BAT}$ -i sisend ühendatud toitepingega.



Joonis 2.5 Mikrokontrolleri toiteskeem

Allikas: STM32F303xB STM32F303xC

Kuna mikrokontroller ühendub moodulivälise süsteemiga, võib pistiku valel ühendamisel tekkida lühis, mis põhjustab suure voolu tekke läbi mikrokontrolleri jala. Selle vältimiseks on SPI signaalidele lisatud jadatakistid, mis piiravad jalga läbiva voolu 22 mA:

$$I = \frac{V_{CC}}{R_{502}} = \frac{3,3V}{150\Omega} = 0,022A.$$

STM32F3-e programmeerimiseks on kasutatud UART-i ja SWD-d. Kahe erineva liidese kasutamise põhjuseks on nende sobivus eri rakendusteks: UART sobib kiireks ja lihtsaks tarkvarauuenduseks, SWD aga tarkvara analüüsiks ja vigade otsimiseks, võimaldades GDB kasutamist.

Kasutatud mikrokontrolleri ROM-i programmeeritakse tehases sisemine *bootloader*, mis võimaldab tarkvarauuenduste tegemise jadaliideseid kasutades. Sõltuvalt kontrolleri tooteseeriast on võimalik kasutada nii USART-i, CAN-i, USB-i, SPI-d kui ka teisi

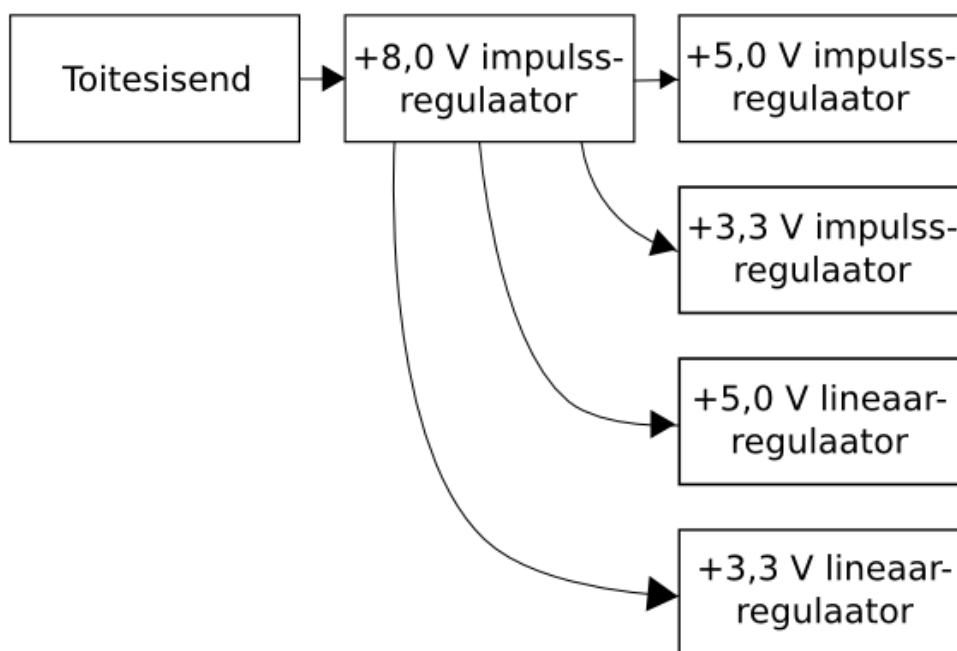
jadaliideseid, kuid kasutatud mikrokontroller toetab ainult USART-i ja USB-i. Kahest valikust on eelistatud USART, kuna tegu on lihtsama liidesega ning programmeerimiseks kasutatavat porti saab kasutada ka süsteemi töö jälgimiseks. Sisemise *bootloader*-i käivitamiseks peab BOOT0 sisendis olema kõrge nivoo, mida võendatakse taktsignaali neljandal tõusval frondil pärast seadme taaskäivitust. See on realiseeritud *pull-down* takisti R<sub>105</sub> ja lühistatava ühenduse kombinatsioonina.

Kasutades STM32F3Discovery arendusplaati, on võimalik mikrokontrolleri programmeerimine ja riistvaraline jälgimine SWD jadaliidest kasutades. Kuna OpenOCD-l on STM32F3Discovery tugi, on võimalik kasutada standardset GDB serverit, tänu millele saab laialdaselt levinud liidese kaudu riistvaraliselt jälgida kasutatavat mikrokontrollerit.

Süsteemi suure töökindluse tagamiseks on sellele lisatud väline *watchdog*, mis rakendub ergutusimpulsi kadumisel ja toitepinge langemisel alla lubatud nivoo. Toitepinge jälgimise eesmärgiks on väljundite kiire sulgemine ebastabiilse toitepinge ajal ning seadme käivitudes ja tööd lõpetades. Kuigi kasutatud mikrokontrolleril on sisemine *watchdog*, on lisatud ka väline *watchdog*, mis rakendub ka vigase binaarkoodi käivitumisel.

## 2.6 Toiteahelate projekteerimine

Lähtudes FEST14-e elektroonika kontseptsioonist, on kõikidele moodulitele vajalikud toiteplokid paigutatud PDM-le. Energia kokkuhoidmiseks ning korpuse temperatuuri madalal hoidmiseks on digitaalelektronika toiteallikana kasutatud impulssregulaatoreid, millel eralduv võimsus on palju väiksem lineaarregulaatoritel eralduvast võimsusest samaväärse voolu korral. Samuti võimaldab impulssregulaatorite kasutamine tulevikus aku pinget tõstes vähendada voolutarvet, kuna erinevalt lineaarregulaatoritest väheneb impulssregulaatorite tarbitav vool pinge tõustes. Kuigi suure voolu korral on impulssregulaatorite kasutamine väga efektiivne, tekivad lülitushetkel pingekõikumised, mistõttu ei ole selle väljund kasutatav referentspingena, seetõttu on mõõteahelate toiteallikana lisatud lineaarregulaatorid.



Joonis 2.6 PDM-i toiteskeem

Impulssregulaatoritena on kasutatud TPS5433 seeria integraalskeeme, mille lülitussagedus on 570 kHz. Kasutatud lülitussagedus on optimaalne, kuna madalama sagedusega regulaatoritel suureneb energiakadu ning suurema sagedusega regulaatorite kasutamisel tekib kõrgsageduslik müra. Tänu suurele efektiivsusele ning komponendi põhja all paiknevalt soojust edasi kandvale ühendusele on maksimaalne väljundvool 3 A, mis on vormeli voolutarvet arvestades piisav. Kuna kasutatud regulaatori väljundpinge on muudetav, pole vaja kasutada erinevaid lülitusregulaatoreid. Kuna kasutatud impulssregulaator muudab lülituskarakteristikut nii, et SNS sisendpinge  $V_{REF}$  oleks 0,8 V, on väljundpinge määratletud järgnevalt:

$$V_{OUT} = V_{REF} * \left( \frac{R_{301}}{R_{302}} + 1 \right).$$

Kuna kasutatud komponendi andmelehes on välja toodud  $R_{301}$  soovitatava väärtusena 10 K $\Omega$ , on  $R_{302}$  väärtus leitav järgnevalt:

$$R_{302} = \frac{V_{REF} * R_{301}}{V_{OUT} - V_{REF}} = \frac{0,8V * 10^3 \Omega}{8 - 0,8} = 1,1 * 10^3 \Omega.$$

Väljundfiltri induktori väärtus on leitav vastavalt andmelehes toodud juhiste. Kuna väljundfiltris on kasutatud madala jadatakistusega keraamilisi kondensaatoreid, on

koefitsiendi  $K_{IND}$  väärtuseks võetud 0,3. Teades, et impulseregulaatori lülitussagedus on 570 kHz ning maksimaalne tööpinge on 24 V, on induktori  $L_{300}$  väärtus leitav järgnevalt:

$$L_{300} = \frac{V_{OUT} * (V_{IN} - V_{OUT})}{V_{IN} * K_{IND} * I_{OUT} * f_{switch}} = \frac{8V * (24V - 8V)}{24V * 0,3 * 3A * 570 * 10^3} = 10,3 * 10^{-6}H.$$

Kuna väljundfiltri pääsuala piirsagedus on 25 kHz, on selle kondensaatorite minimaalne väärtus leitav järgnevalt:

$$C_{306} = \frac{1}{2 * \pi * V_{OUT} / I_{OUT} * f_{crossover}} = \frac{1}{2 * \pi * 8V / 3A * 25 * 10^3 Hz} = 2,38 * 10^{-6}F.$$

Impulssregulaatori poolt eraldatav võimsus on ligikaudselt leitav juhtivus-, lülitus- ja lekkekadude ning regulaatori toitekadude summana:

$$\begin{aligned} P &= I^2 * R_{DS} * \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} + \frac{1}{2} * 10^{-9} * V_{IN}^2 * I_{OUT} * f_{switch} + 22,8 * 10^{-9} * f_{switch} + 0,11 * 10^{-3} \\ &\quad * V_{IN} \\ &= 3A^2 * 80 * 10^{-3} Hz * \frac{8V}{16V} + \frac{1}{2} * 10^{-9} * 16V^2 * 3A * 570 * 10^3 Hz + 22,8 \\ &\quad * 10^{-9} * 570 * 10^3 Hz + 0,11 * 10^3 = 0,59W. \end{aligned}$$

## 2.7 Kaitseahela projekteerimine

FEST14-e elektroonika on kallim ja keerukam, kui eelnevate aastate seadmetel, seetõttu on äärmiselt oluline tagada süsteemi töökindlus valesi ühendatud või seadistatud toiteallikate korral. Selle saavutamiseks on vaja toitesisendile luua kaitseahel, mis suudab elektroonika isoleerida ülejäänud autost nii ülepinge, alapinge, vastupinge kui ka ülevoolu korral. Soovitud süsteemi on võimalik realiseerida kas diskreetseid komponente või spetsiaalset mikroskeemi kasutades.

Spetsiaalse mikroskeemi peamised eelised diskreetsete komponentidega võrreldes on:

1. Väiksem arv komponente, tänu millele on ka trükkplaadil hõivatud ala väiksem
2. Kaitseahela parameetreid on väga lihtne ja kiire korrigeerida väliste komponentide nominaalväärtuseid muutes

3. Elektriskeemi arendus- ja juurutamiskulud on väiksemad
4. Elektriskeemi arendusele ja juurutamisele kuluv aeg on väiksem

Diskreetsete komponentidega loodud kaitsehela eelised spetsiaalse mikroskeemiga võrreldes on:

1. Väiksemad tootmiskulud
2. Võimalus luua väga spetsiifiline lahendus

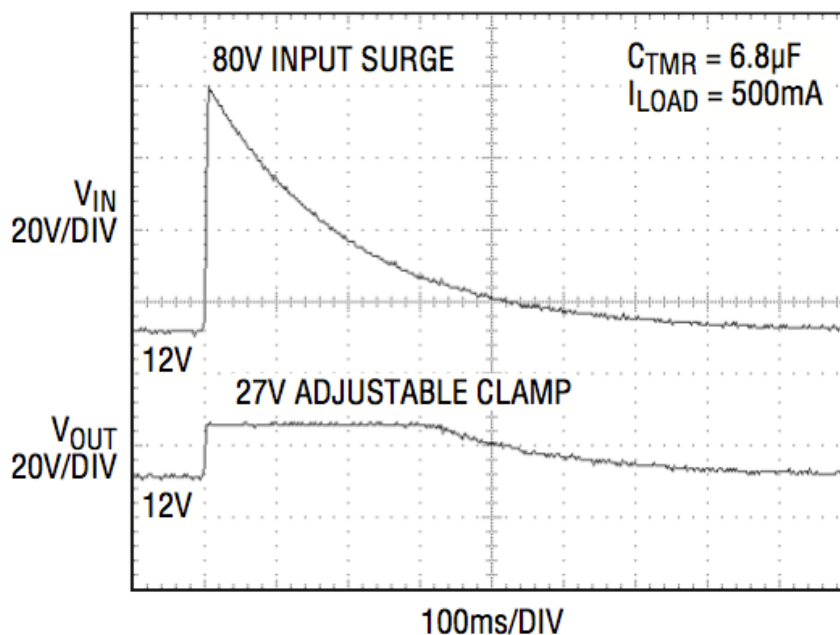
Kuna loodava süsteemi puhul ei ole tarvidust tootmiskulude optimeerimiseks, vaid arendusele kuluva aja ja ressursside vähendamiseks, on spetsiaalse mikroskeemi kasutamine sobivam lahendus. Antud süsteemi nõuetele vastab kõige paremini Linear Technology LT4356 seeria mikroskeem, mis suudab lisaks eelnevalt mainitule oodata taimeriga määratud ajaperioodi enne, kui süsteem isoleeritakse toiteallikast. Valitud kaitsehelas on väga väike pingelang, kuna vastupinge kaitsena kasutatakse Schottky diodi asemel kahte vastakuti MOSFET-i. Kuna LT4356-l on sisemine laengupump, võib kasutada N-kanaliga MOSFET-e, mille kanali takistus on madalam tavaliselt *high side* ahelates kasutatavatest P-kanaliga MOSFET-idest.

Seadme maksimaalne tööpinge on seadistatav tagasisideahelaga väljundilt LT4356-e FB sisendile. Tagamaks seadme töö lühikeste ülepingeimpulsside jooksul, juhitakse jadatransistore ülepinge korral nende lineaarregioonis, tänu millele püsib kaitsehela väljundpinge tagasisideahelaga määratud maksimaalsel nivool. Kuna MOSFET-i töö lineaarreežiimis eraldab suurt võimsust, on see võimalik ainult lühikese perioodi vältel. Eeldades 10 V potentsiaalide vahe teket jadatransistoridel, on selle perioodi pikkus määratud TMR-i sisendile paigutatud kondensaatori väärtusega järgnevalt:

$$t_{TIMER} = t_{FAULT} + t_{WARNING} = \frac{C_{400}}{1 * 10^{-6}F} * (93,75 * 10^{-3}s + 20 * 10^{-3}s).$$

Seadme töötamiseks kuni 100 ms pikkuste ülepingeimpulsside ajal, on kondensaatori  $C_{400}$  väärtus leitav järgmiselt:

$$C_{400} = \frac{100 * 10^{-3}s}{113,75 * 10^{-3}s} = 880 * 10^{-9}F.$$



Joonis 2.7 Elektroonilise kaitse töö lühiaegses veaolukorras

Allikas: LT4356-1/LT4356-2

Kasutatav taimer väldib seadme väljalülitumise lisaks lühikestele ülepingeimpulssidele ka lühikeste ülevooluimpulsside korral. See on tähtis tagamaks töö ka juhul, kui seadme väljundites on suure sisendmahtuvusega tarbijad, mille käivitusvool võib olla mitu korda suurem töövoolust. Taimeri vajalikkust toob esile ka see, et paljude tarbijate andmelehtedes on antud voolutarve ainult töörežiimis, seega ei ole võimalik lühikesi vooluimpulsside suurust hinnata ilma spetsiaalseid katseid läbi viimata.

Kuna jadatransistore tüüritakse operatsioonvõimendiga, mis muudab nende kanali takistust selliselt, et LT4356-e FB sisendil oleks alati 1,25 V, on maksimaalne tööpinge määratud järgnevalt:

$$V_{FB} = VCCINT_{MAX} * \frac{R_{411}}{R_{410} + R_{411}}$$

Kuna  $VCCINT_{MAX}$  on 28 V ning  $R_{411}$ -na kasutatakse 3,3 K $\Omega$  takistit vähendamaks kasutatud komponentide arvu, on  $R_{410}$  väärtus leitav järgnevalt:

$$R_{410} = VCCINT_{MAX} * \frac{R_{411}}{V_{FB}} - R_{411} = 28V * \frac{3,3 * 10^3 \Omega}{1,25V} - 3,3 * 10^3 \Omega = 70,62 * 10^3 \Omega.$$



LT4356 tuvastab ülevooluviga šunttakistil tekkivat pingelangu mõõtes. Toiteahelas tekkiva pingelangu vähendamiseks on vea tuvastamise piiriks seatud 50 mV. Kuna kaitstava ahela maksimaalne vool on piiritletud 2,5 A peale, võib mõõtetakisti väärtuse leida järgnevalt:

$$R_{402} = \frac{50 * 10^{-3}V}{I_{R_{402}}} = \frac{50 * 10^{-3}V}{2,5A} = 20 * 10^{-3}\Omega.$$

Vältimaks aku kahjustamist ning madalast sisendpingest põhjustatud vigasid, on PDM-l rakendatud alapinge kaitset. LT4356 tuvastab aku pinge langemist alla soovitud taseme  $V_{IN+}$  sisendit jälgides. Vastav sisend juhib komparaatorit, mis eemaldab sisendi tõusmisel üle 1.25 V jadatransistoride paisul oleva laengu, seega on minimaalne tööpinge määratud järgnevalt:

$$V_{IN+} = VCCINT_{MIN} * \frac{R_{409}}{R_{408} + R_{409}}$$

Kuna  $VCCINT_{MIN}$  on 10 V ning  $R_{409}$ -na kasutatakse 3,3 K $\Omega$  takistit vähendamaks kasutatud komponentide arvu, on  $R_{408}$  väärtus leitav järgnevalt:

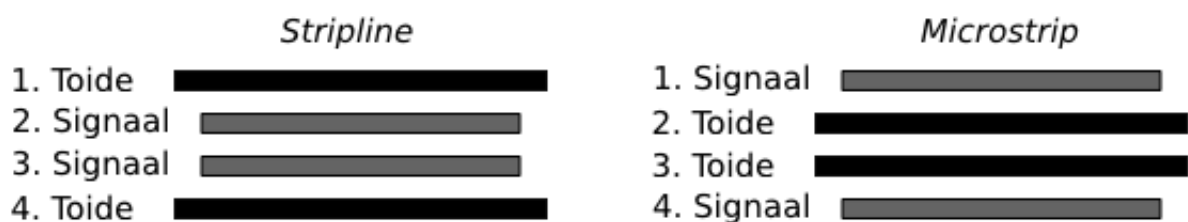
$$R_{408} = VCCINT_{MIN} * \frac{R_{409}}{V_{IN+}} - R_{409} = 10V * \frac{3,3 * 10^3\Omega}{1,25V} - 3,3 * 10^3\Omega = 23,1 * 10^3\Omega.$$

Kuigi üle- ja alapinge ning ülevoolukaitse on võimalik luua kasutades ühte jadatransistorit, ei piisa sellest vastupingekaitse loomiseks. Metalloksiid väljatransistoridel on läte ja neelu vahel tehnoloogiline parasiitdiod, mistõttu on sellel tehnoloogial baseeruvate transistoridega võimalik elektrivoolu blokeerida ainult ühes suunas. Vastupingekaitse loomiseks on kasutatud kahte vastakuti ühendatud metalloksiid väljatransistori. Tänu sellele on tehnoloogilised diodid vastakuti, seega ei saa nad samaaegselt elektrit juhtida. Kindlustamiseks vastupinge korral väljatransistoride sulgumist, on nende paisud ühendatud bipolaartransistoriga  $Q_{402}$  toitesisendiga ning bipolaartransistori baas on ühendatud maaga. Vastupidise pinge tekkimisel on  $Q_{402}$  positiivselt pingestatud ning hakkab juhtima, tänu sellele ühtlustuvad  $Q_{400}$  ja  $Q_{401}$  paisud maapotentsiaaliga ning väljatransistorid on kindlasti suletud.

### 3. Trükkplaadi projekteerimine

Autotööstuses kasutatav elektroonika peab vastama elektromagnetilise ühilduvuse nõuetele, sellega mitte arvestades võib süsteemi stabiilsus oluliselt halveneda. Vormeli konstruktsioonist lähtuvalt on juhtelektroonika paigutatud juhi selja taha, elektrimootori kontrolleri kohale. Kuigi sise põlemismootoriga vormeli korral põhjustasid süüteküünlad elektromagnetilist müra, ei ole see võrreldav elektrivormelis kasutatavat vahelduvvoolumootorit juhtiva kontrolleri poolt põhjustatud müraga, seetõttu on vormeli projekteerimisel suurt rõhku pandud elektromagnetilisele ühilduvusele. Seetõttu on väljaspool projekteeritud elektroonika mooduleid kasutatud ainult keerdpaarjuhtmetega CAN võrku, mille füüsilises kihis kasutatakse diferentsiaalsignaale, samuti on andurite signaale kandvad juhtmeköidised varjestatud. Siiski ei piisa vaid korpusest väljaspool paiknevate signaalide kaitsmisest, vaid elektromagnetilise ühilduvusega tuleb arvestada ka trükkplaadi projekteerimisel.

Loodava süsteemi jaoks on optimaalne neljakihilise trükkplaadi loomine, kuna see tagab piisava kaitse elektromagnetilise müra eest ning komponentide efektiivse paigutuse korral ei ole nende vooluradadega ühendamine väga keerukas, samas ei kasva trükkplaadi tootmise kulud väga palju kahekihiliste trükkplaatidega võrreldes. Trükkplaatide projekteerimisel on levinumad ülesehitused *microstrip* ja *stripline*.



Joonis 3.1 Levinud trükkplaadi ülesehitused, läbilõige trükkplaadist

Trükkplaadi ülesehituse valimisel langes otsus *microstrip*-i kasuks, kuna:

1. Vooluradade marsruutimine väliskihitidel on lihtsam sisekihtidel marsruutimisest.
2. Vooluradade marsruutimiseks vajalike avade arv väheneb.
3. Trükkplaadi vooluradade muutmine hilisemates versioonides on hõlpsam.

4. Välisallikate põhjustatud elektromagnetilise müra neeldumisel on *microstrip* peaaegu sama efektiivne kui *stripline*.
5. Väliskihtide volurajad on paksemad sisekihtide voluradadest, seega võib suurt voolu kandvate radade laius olla väiksem, samuti on jahutus efektiivsem.
6. Kihtidevaheline mahtuvus on väiksem, seega on signaali maksimaalne tõusufont järsem.
7. Kontrollitud näivtakistusega voluradade loomine on lihtsam.

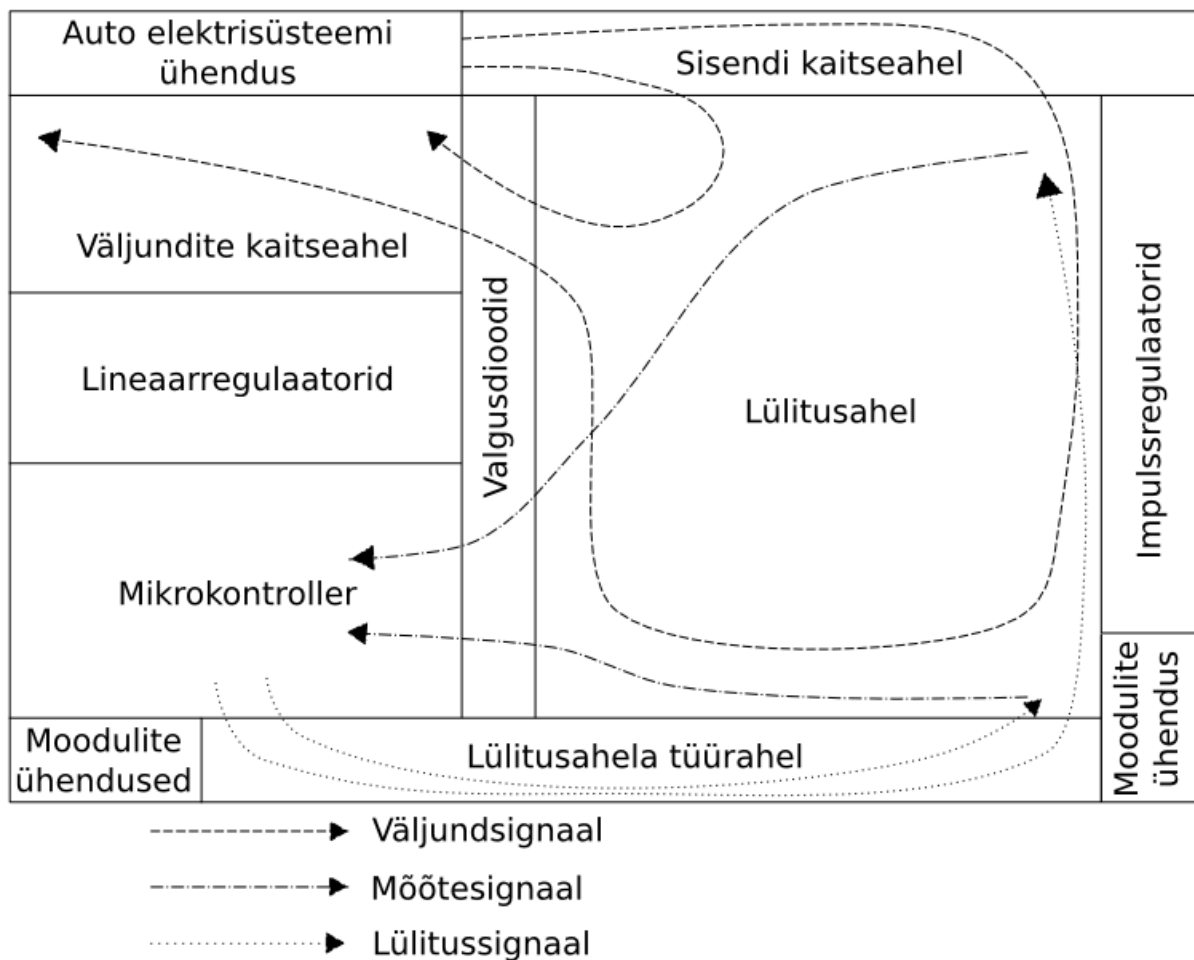
*Microstrip*-i puudustena *stripline*-ga võrreldes võib esile tuua järgneva:

1. Trükkplaadi voluradade poolt genereeritavat elektromagnetilist müra ei filtreerita samaväärselt *stripline*-iga.
2. Toite- ja maakihtide vaheline mahtuvus on väiksem, seega on suurem vajadus kondensaatorite järele.

Loodaval trükkplaadil on välditud maetud ja pimedate avade kasutamist, kuna see muudab trükkplaatide valmistamise ligi kaks korda kulukamaks. Kuna kasutatavate komponentide mõõtmed ja vahekaugused on ka suhteliselt suured, puudub suur vajadus maetud ja pimedate avade kasutamiseks.

Komponentide paigutamisel trükkplaadile oli peamisteks eesmärkideks mürarikaste ahelate eraldamine, suurt voolu juhtivate voluradade pikkuse minimeerimine ning voluradade marsruutimine võimalikult väikest arvu avasid kasutades. Trükkplaadi ahelate paigutus on illustreeritud joonisel 3.2, kus on esitatud lisaks paigutusele ka peamiste signaalide teekond. Kuna nii elektrooniliselt kaitstud kui ka impulssregulaatoritega toidetavate ahelate volutarve on väike, kuid toiteahela poolt tekitatud müra ja temperatuur on kõrged, on need paigutatud piki trükkplaadi äärt võimalikult kaugele mõõte- ja juhtahelatest. Väljundahelad, mida läbib suur vool, on paigutatud pistiku ja kaitseahela lähiümbrusse, hoidmaks suure vooluga voluradade pikkust minimaalsena. Suure vooluga signaalid on joonisel esitatud lühikese joonena, väiksema vooluga väljundahelad on paigutatud pistikust kaugemale ning need on tähistatud pikema joonega. Lülitusahelad on marsruuditud väliskihtides, kuna nende paksus on suurem sisekihtide omast ning jahutus efektiivsem. Iga lülitusahel on ühendatud mikrokontrolleriga nii mõõte- kui ka juhtsignaaliga. Need signaalid on marsruuditud

keskmistel kihtidel, kuna need hõivavad vaid väikse osa toitekihtidest, mistõttu ei halvene trükkplaadi elektromagnetilise müra filtreerimise võimekus. Mõõtesignaalide pikkuse vähendamiseks on mikrokontroller paigutatud lülitusahelate kõrvale. Kuna väljundahelate lülitussignaal peab läbima mikrokontrolleri ja lülitusahela vahelisi lisaahelaid, on need paigutatud lülitusahela alla, tänu millele ei pikene voluradade pikkus märgatavalt. Vältimaks voluradade üksteisest üleviimist, on elektriskeemis ühendused tehtud nii, et sama tüüpi signaale oleks võimalik kõrvuti marsruutida. Kuna mikrokontrolleri ja lineaarregulaatorite kohale kinnitub turvaahelate moodul, on valgusdiodid paigutatud lülitusahela ja kaitseahela vahele. Kõik kasutatud valgusdiodid on paigutatud ühtsesse jadasse, tänu millele on vigase ahela tuvastamine lihtne, kuna töökorras seadmel peavad kõik valgusdiodid põlema.

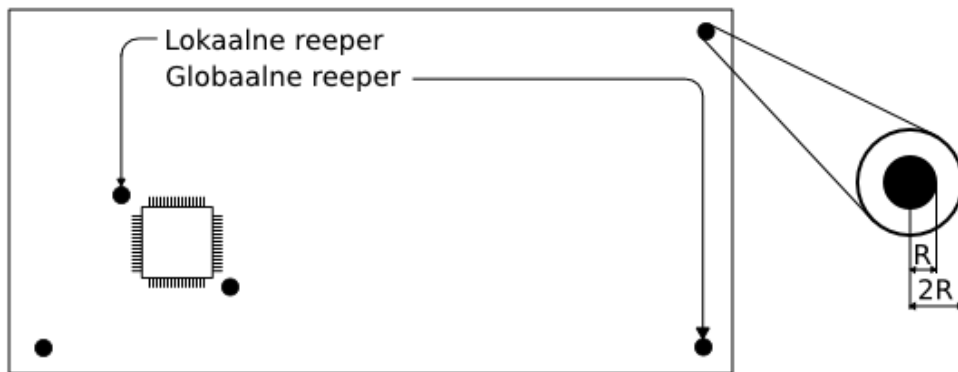


Joonis 3.2 PDM-i ahelate paigutus trükkplaadil

Komponentide pakendite valimisel on kasutatud võimalikult palju pindmontaaži pakendeid, kuna nende mõõtmed on palju väiksemad vastavate läbiviikkomponentide omadest, samuti puuduvad tänapäeval suuremale osale pindmontaaži komponentidest alternatiivsed tooted läbiviikpakendis. Pakendite valimisel on peamiseks piiranguks käsitsi joodetavuse nõue, kuna

trükkplaatide parandamine peab olema võimalik ka võistlustel, seetõttu polnud võimalik BGA ja QFN pakendis integraalskeemide kasutamine. Moodulite ühendamiseks on kasutatud lintkaableid ja piikribasid, kuna need on vibratsioonile ja mehaanilistele löökidele vastupidavad.

Trükkplaadile on lisatud reeperid, võimaldamaks seadme koostamist tootmisettevõttes. Kuna trükkplaadid paiknevad ladumismasinas alati veidi erineva nurga all, tuleb iga trükkplaat täpselt positioneerida. Trükkplaadi kolmes nurgas on globaalsed reeperid, mida kasutatakse trükkplaadi asukoha määramiseks. Kasutatav mikrokontroller on saadaval väikse sammuga LQFP-64 pakendis, mis vajab trükkplaadi suurte mõõtmete tõttu lokaalseid reepereid. Lokaalseid reepereid kasutades ei kandu plaadi mõõtmetest tulenevad ebatäpsused edasi mikrokontrolleri positioneerimisele.



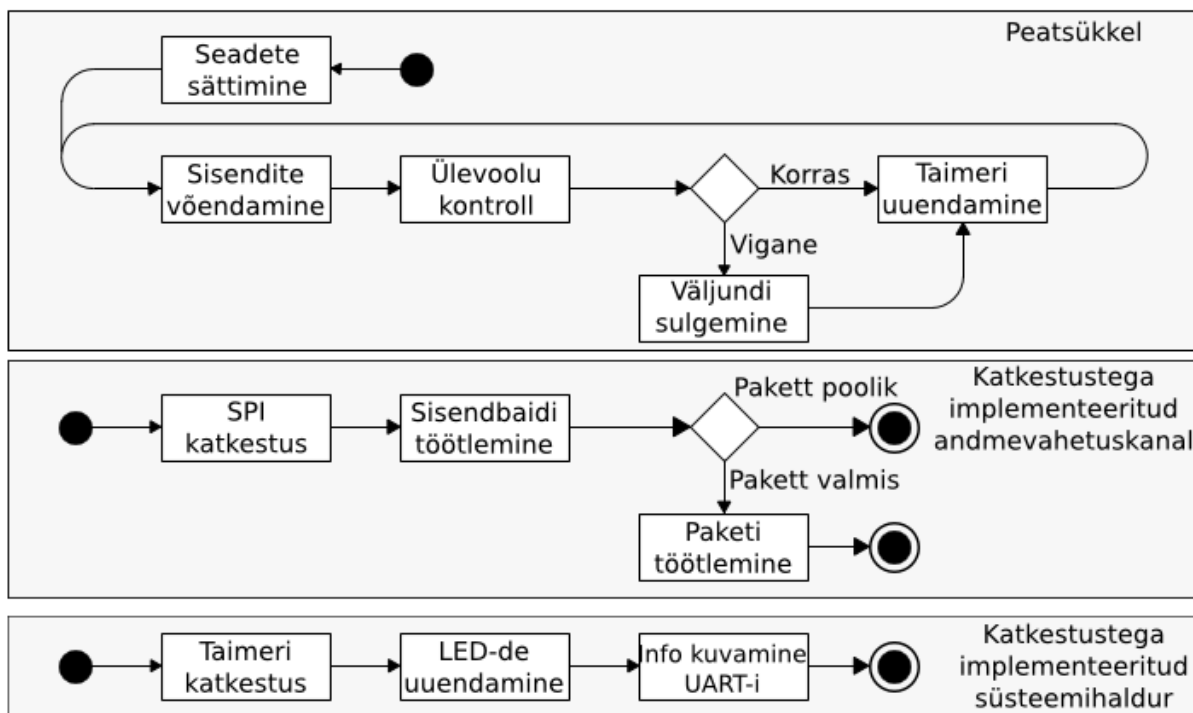
Joonis 3.3 Reeperite kasutamine trükkplaadil

Antud ideedest lähtuvalt projekteeritud trükkplaadi kolmemõõtmeline mudel on esitatud lisa 2.

## 4. Tarkvaralise kontrollsüsteemi arendamine

Tarkvaraarenduseks on kasutatud vabavaralisi tööriistu, mis peavad olema saadavad nii Mac OS X-le kui ka Linuxile. Seetõttu on kasutatud kompileerimiseks ja mikrokontrolleri töö jälgimiseks GNU ARM-i tööriistu, tarkvara kirjutamiseks Eclipse-i ning mälu programmeerimiseks OpenOCD-d.

Tarkvara arhitektuuri loomisel oli eesmärgiks ülevoolu korral väljundi sulgumise aja minimeerimine, seetõttu on peatsüklist eemaldatud kõik peale šunttakistil tekkiva pingelangu mõõtmise, veaolukorra tuvastamise, väljundi sulgemise ning välise *watchdog*-i taimeri uuendamise. Kuna kõikidele ülejäänud tegevustele kulub alla 0,1% protsessori tööajast, käivitatakse need asünkroonselt katkestusi kasutades.



Joonis 4.1 Tarkvara arhitektuur

Sisemise taimeriga on implementeeritud süsteemihaldur, mis kuvab süsteemi staatust. Selleks on lisatud valgusdiodid, mis näitavad funktsionaalsuse korrasolekut ning UART, kuhu kirjutatakse süsteemi parameetreid: sisendpinge, temperatuur, voolud, ülevooluga väljundid ja SPI vigade arv. Süsteemihalduri taimeri periood on üks sekund, kuna väiksema perioodi korral ei ole UART-i väljund terminalis kergesti jälgitav, samuti on sekundilise perioodiga

võimalik lisada valgusdiodidele lisaks kolmas olek – vilkumine. Baitide saatmine üle UART-i on implementeeritud DMA-ga, kuna kuvatavat süsteemi infot sisaldava puhvri suurus on ligikaudu 300 baiti, seetõttu kulub protsessoril vähem aega andmete liigutamiseks.

PDM-i infovahetuseks ECU-ga on kasutatud levinud HDLC protokolliga modifitseeritud varianti. HDLC protokolliga eelisteks antud rakenduses on eelkõige lihtsus ning paketti kirjeldavate baitide väike arv. Kuna liidesega on ühendatud ainult kaks seadet, kusjuures siini kiirus on määratud *master*-i taktsignaali, puudub vajadus keerukaks lisafunktsionaalsuseks, nagu siini kiiruse automaatne tuvastamine ja seadme valimine. Kuna siini taktsignaal on palju väiksem mikrokontrolleri taktsignaalist ning katkestuste ajal tehtavad arvutused ei ole mahukad, puudub ka vajadus mikrokontrolleri küllastust vältiva kontrollsignaali kasutamiseks. Tuvastamiseks paketi algust ja lõppu, kasutatakse paketi esimest ja viimast baiti eeldefineeritud väärtusega indikaatorina. Pärast paketi algust tuvastavat baiti saadetakse paketi identifikaator, mis määratleb selle, kuidas järgnevat andmeid tuleb tõlgendada. Järgmisena saadetakse andmebaitide arv ning andmed.

Paketi alguse indikaator	Identifikaator	Andmebaitide arv n	Andmebait 1	...	Andmebait n	Paketi lõpu indikaator
--------------------------	----------------	--------------------	-------------	-----	-------------	------------------------

Joonis 4.2 Andmevahetuseks kasutatav protokoll

Saabuvate pakettide dekodeerimiseks on kasutatud olekumasinat, mis võimaldab saabuvate baitide lihtsat kontrolli ja andmete paketti kirjeldavasse struktuuri kirjutamist. Olekumasina kasutamise eelis seisneb ka paketi struktuuri muutmise lihtsuses, näiteks piisab veatuvastuskoodi kasutamiseks ühe oleku lisamisest. PDM-i väljundite olekut saab seada ja neid läbivat voolu vajadusel lugeda ükshaaval, kuid see koormab liidest ning protsessorit. Selle vältimiseks on protokolliga lisatud võimalus maskiga seada kõikide väljundite olekuid ning lugeda kõikide väljundite voolutarvet ühe paketiga. See vähendab saadetavate baitide arvu märgatavalt, näiteks tuleb 16 väljundi oleku muutmiseks saata 96 baiti asemel 8 baiti.

## **Kokkuvõte**

Tudengivormeli projekti raames on projekteeritud ja ehitatud kuus vormelit. Viimastel hooaegadel on meeskond loonud üha rohkem elektroonilisi süsteeme, mille tähtsus kasvas oluliselt üleminekul sisepõlemismootorilt elektrilistele jõuallikatele. Eesti esimese elektrivormeli elektroonika oli killustunud ning palju funktsionaalsust oli dubleeritud. Selle probleemi lahendamiseks loodi FEST14-t arendades täiesti uus elektrooniliste moodulite süsteem, mille keskseks osaks on toite- ja lülitusmoodul. Antud töö keskendub elektrivormeli toite- ja lülitusmooduli elektriskeemi ja trükkplaadi projekteerimisele ning tarkvaralise kontrollsüsteemi programmeerimisele.

Projekteeritava seadme ülevaates esitatakse varasemate vormelite elektroonika puudused, vaadeldakse FEST14-e elektroonika arhitektuuri ja kirjeldatakse loodava seadme eesmärke ning eeliseid. Elektrisüsteemi projekteerimisel on põhjendatud komponentide ja ahelate valiku kriteeriume ning esitatud peamised arvutused. Trükkplaadi projekteerimisel on toodud trükkplaadi ülesehituse ja komponentide paigutuse tagamaad, samuti on esitatud kasutatud pakendite eelised. Tarkvaralise kontrollsüsteemi arendamisel on selgitatud selle arhitektuuri ning implementeerimise põhimõtteid.

FEST14 on bakalaureusetöö valmimise hetkeks läbinud esimesed testisõidud ning praeguse seisuga on projekteeritud moodulid osutunud töökindlaks ning vormeli elektroonika arhitektuur jätkusuutlikuks. Kuigi esimene testperiood on osutunud edukaks, saab põhjalikumad järeldused loodud süsteemi töökindluse kohta teha alles pärast võistlushooaja lõppu. Meeskonna eesmärgiks on saavutada võimalikult head tulemused võistlustelt, kuid sageli kasutatakse vormeleid ka pärast võistlushooaja lõppu, näiteks sõidetakse esimese tudengivormeliga senini. Seetõttu saab järeldusi FEST14-e elektroonika vastupidavuse kohta pika perioodi vältel teha alles aastate pärast.



## Summary

The Estonian team participating in the Formula Student series has designed and manufactured six formulas. Due to the transition from internal combustion engines to electric drivetrain during the last season, the team has had to develop a growing number of electronic systems. The electronics that was developed for the first electric formula designed in Estonia was fragmented and a lot of functionality had been duplicated. To solve these problems the electronics was redesigned from scratch and a completely new system of electronic modules was developed for FEST14. This thesis describes the development of the schematics, the PCB and the control logic for the power distribution module that is the central module of the new electronic system.

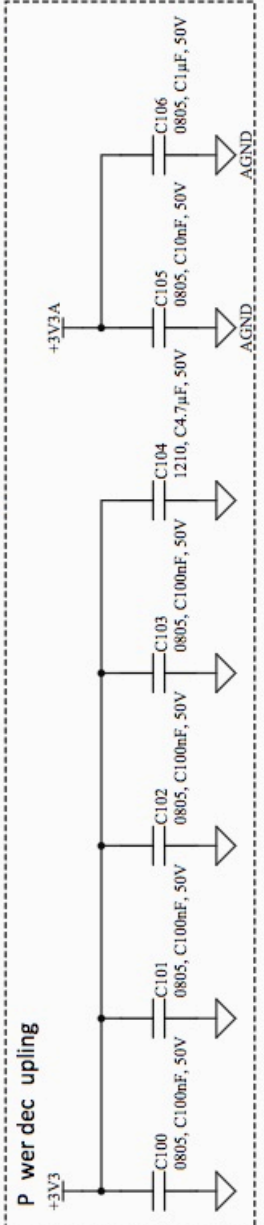
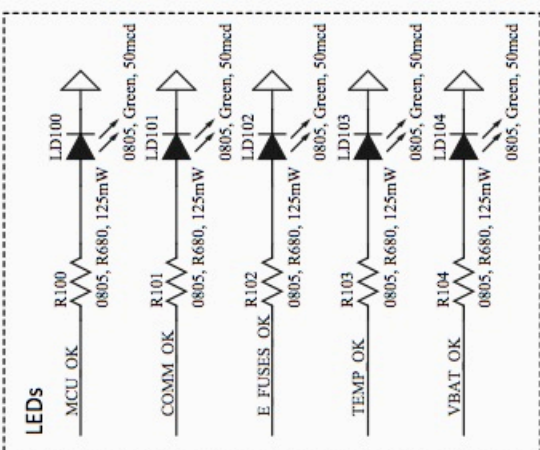
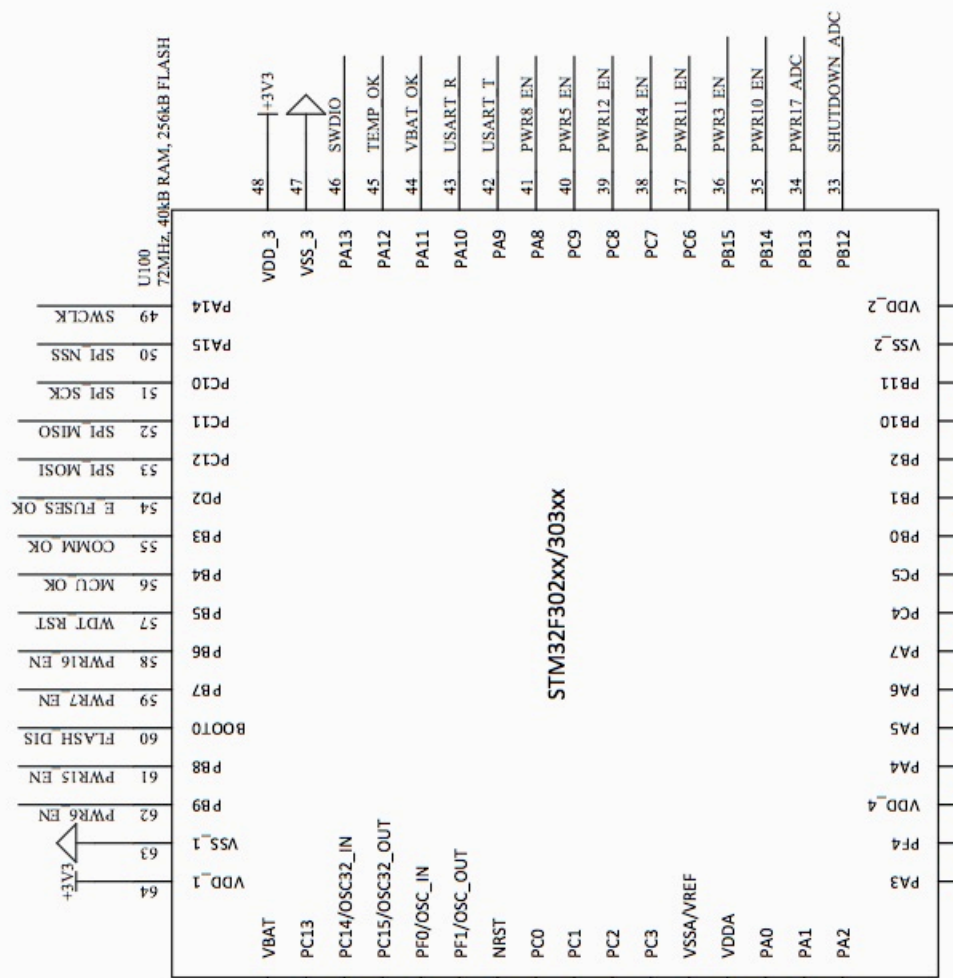
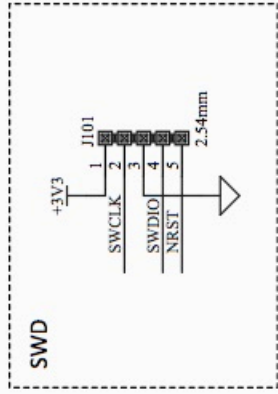
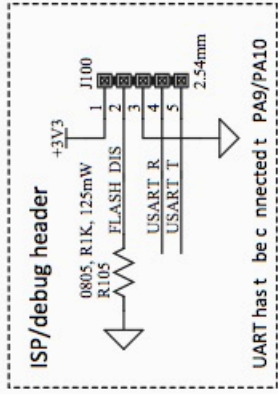
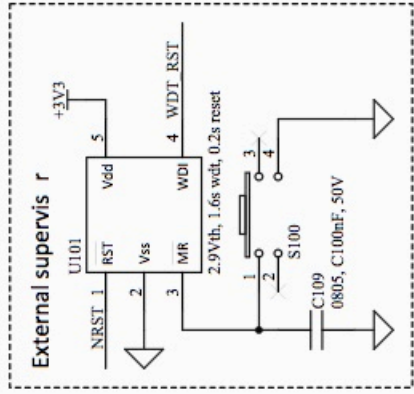
The first chapter describes the flaws of the previous formulas, presents the architecture of the new system and the pros and cons of the developed device. The second chapter focuses on the development of the schematic sheets that include the selection of the components and circuits as well as the basic calculations. The third chapter presents the development of the PCB, the criteria that were used to select the stack-up for the board, the placement of electric circuits and the selection of the component packages. The last chapter focuses on developing the control system, its architecture and the basics of the implementation.

FEST14 has driven it's first miles at the time this thesis was finished and the developed systems have proven to be reliable. Although the test period has been a success, we can not make long-term conclusions about the reliability of the system until the end of the season. The primary goal of the team is to be superior during the competitions, but the formulas are often used after the racing season, for example the first formula is still used. Due to this, the final conclusions of the reliability of the formula and its electronic systems can be made after years of driving.

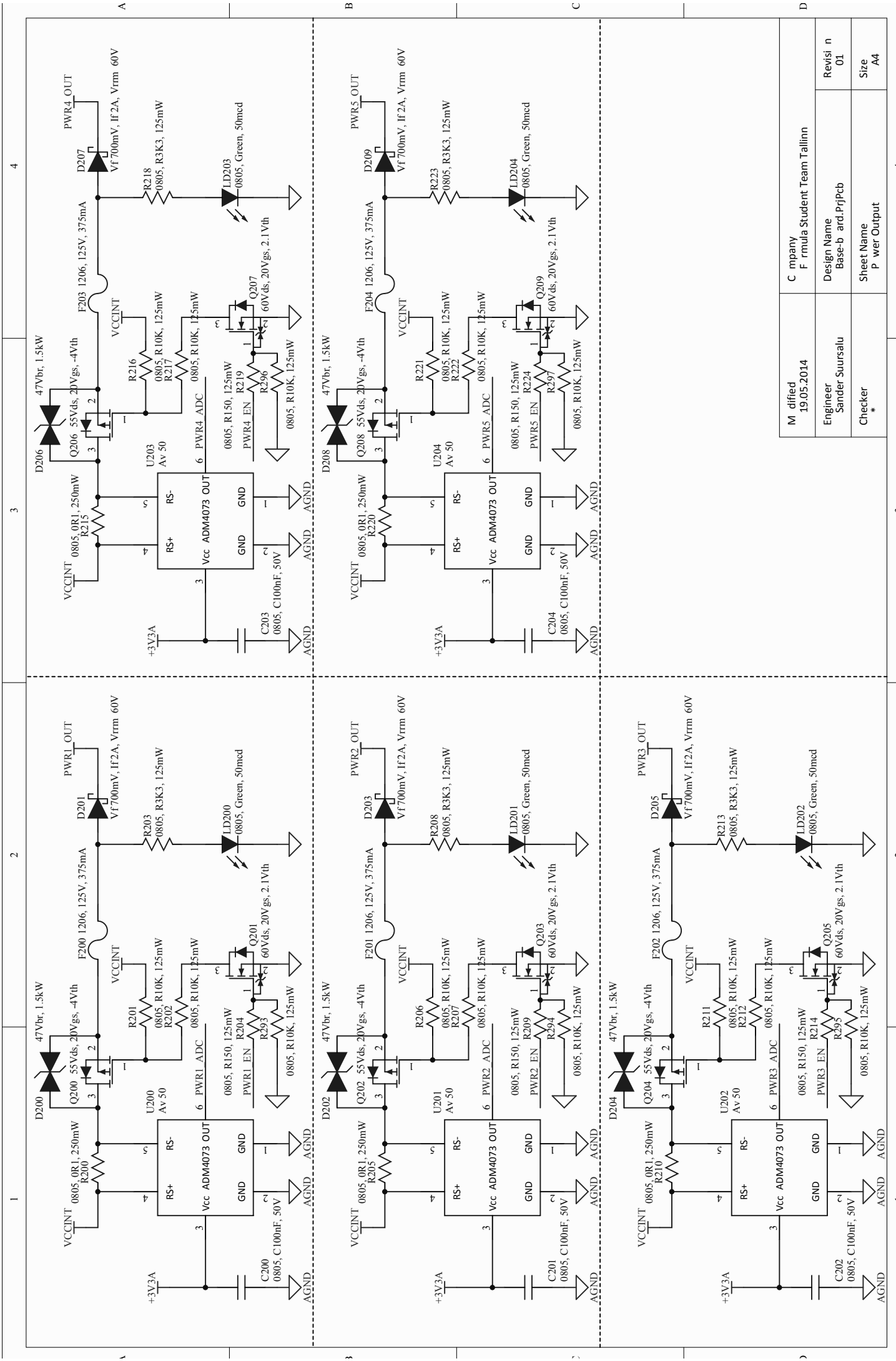
## **Kasutatud materjalid**

1. Montrose, M. I. Printed circuit board design techniques for EMC compliance. (2000)
2. AN2867 Application note. [WWW] [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application\\_note/CD00221665.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/CD00221665.pdf)  
(15.05.2014)
3. AN2606 Application note. [WWW] [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application\\_note/CD00167594.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/CD00167594.pdf)  
(15.05.2014)
4. RM0316 Reference manual. [WWW]  
[http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference\\_manual/DM00043574.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/DM00043574.pdf) (15.05.2014)
5. STM32F303xB STM32F303xC. [WWW]  
<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00058181.pdf>  
(15.05.2014)
6. MCP1804. [WWW] <http://www.farnell.com/datasheets/1789199.pdf> (15.05.2014)
7. L78MxxAB L78MxxAC. [WWW] <http://www.farnell.com/datasheets/1674523.pdf>  
(15.05.2014)
8. TPS54331. [WWW] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54331.pdf> (15.05.2014)
9. ADM4073. [WWW] <http://www.farnell.com/datasheets/690988.pdf> (15.05.2014)
10. MCP131X/2X. [WWW] <http://www.farnell.com/datasheets/1669396.pdf> (15.05.2014)
11. LT4356-1/LT4356-2. [WWW] <http://www.farnell.com/datasheets/1599513.pdf>  
(15.05.2014)
12. IRFR5305PbF. [WWW] <http://www.farnell.com/datasheets/274342.pdf> (15.05.2014)

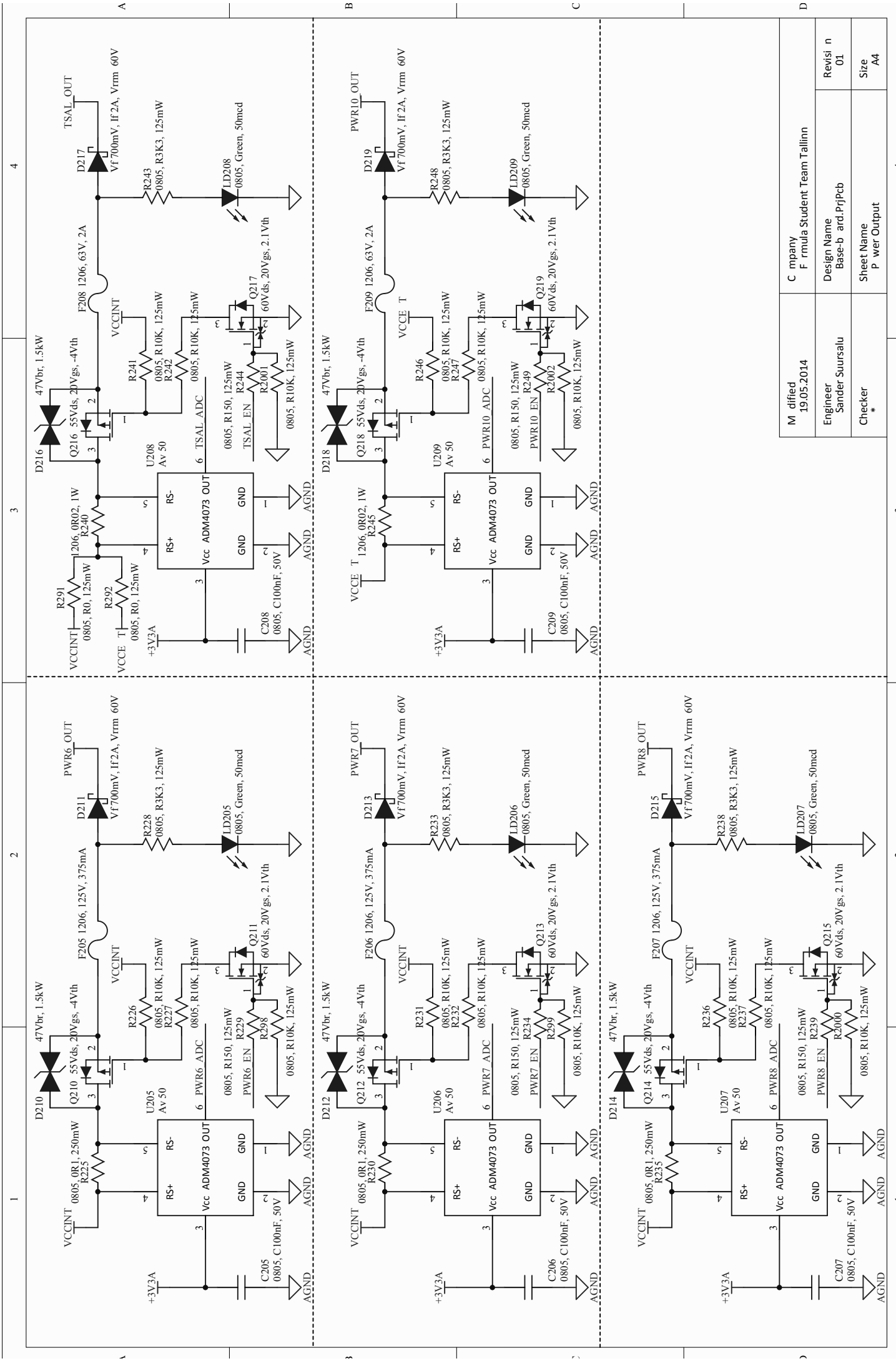
## **Lisa 1 PDM-i elektriskeem**



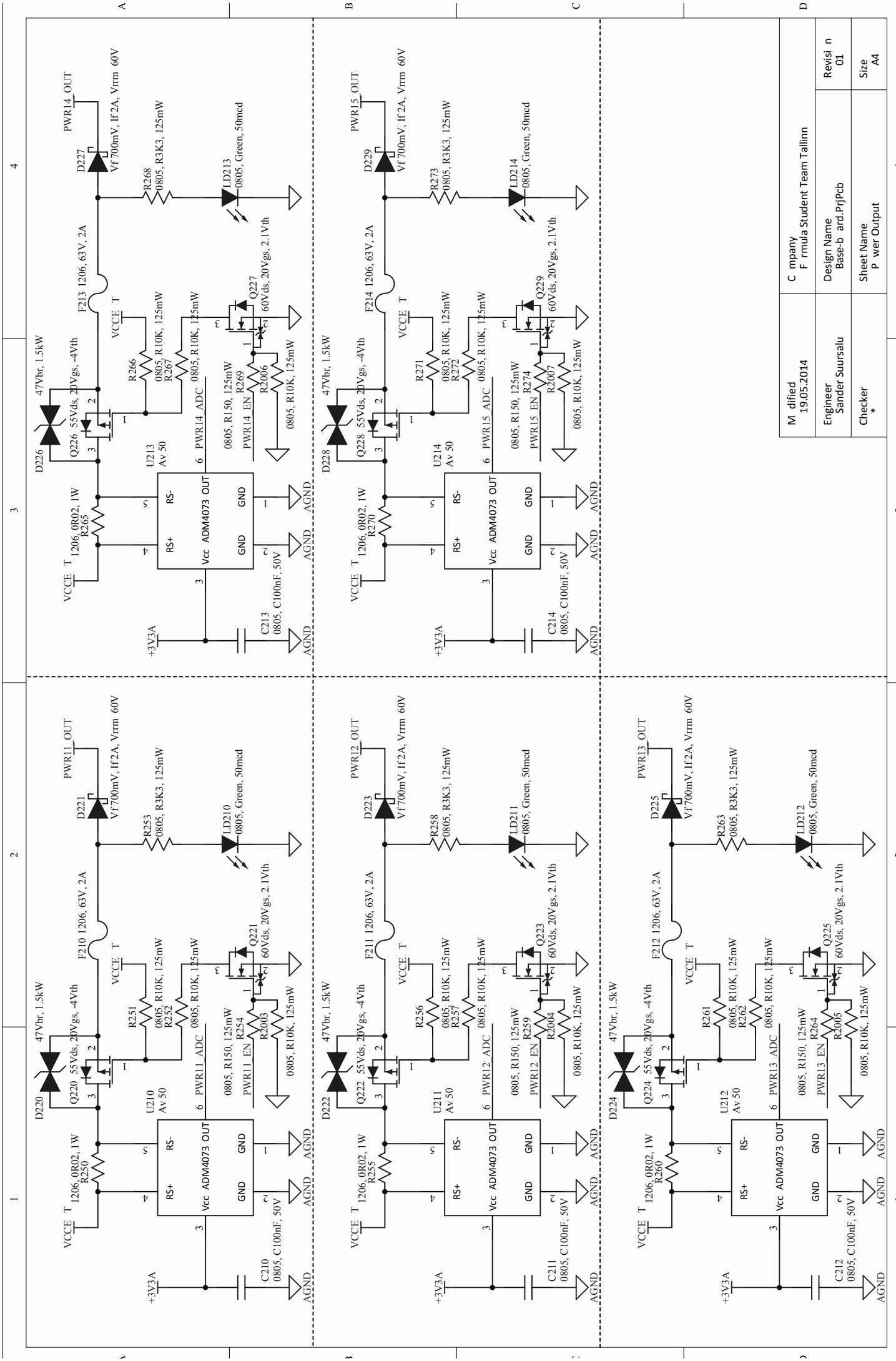
Modified: 18.03.2014	Company: Formula Student Team Tallinn
Engineer: Sander Suursalu	Design Name: Base-board.Pcb
Checker:	Revision: 01
	Sheet Name: STM32
	Size: A4



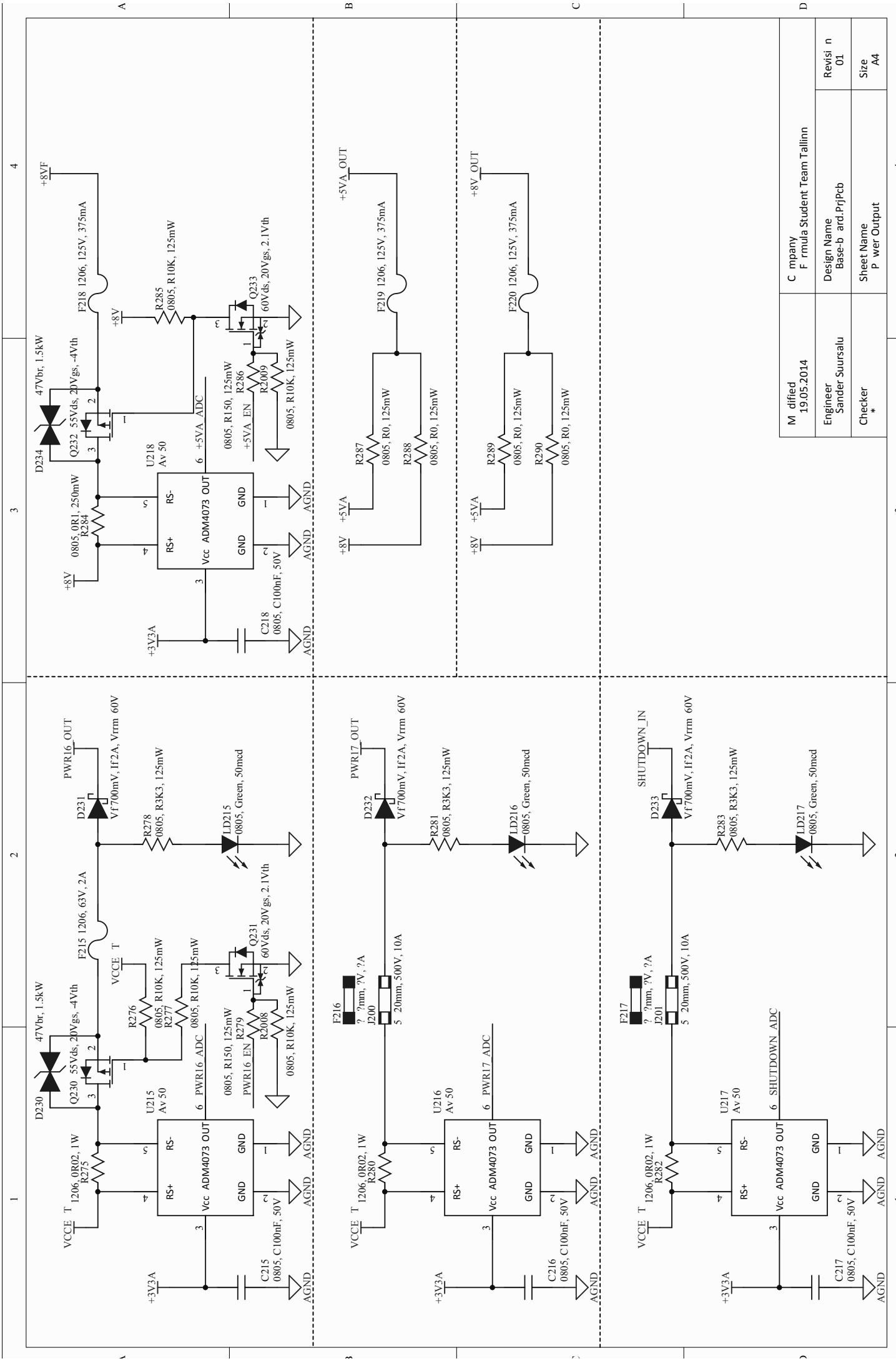
M dified 19.05.2014	C mpany F rrmula Student Team Tallinn
Engineer Sander Suursalu	Design Name Base-b and.PriPcb
Checker *	Sheet Name P wer Output
	Revisi n 01
	Size A4



Modified 19.05.2014	Company Firma Student Team Tallinn
Engineer Sander Suursalu	Design Name Base-board.Pcb
Checker *	Sheet Name Power Output
	Revision 01
	Size A4

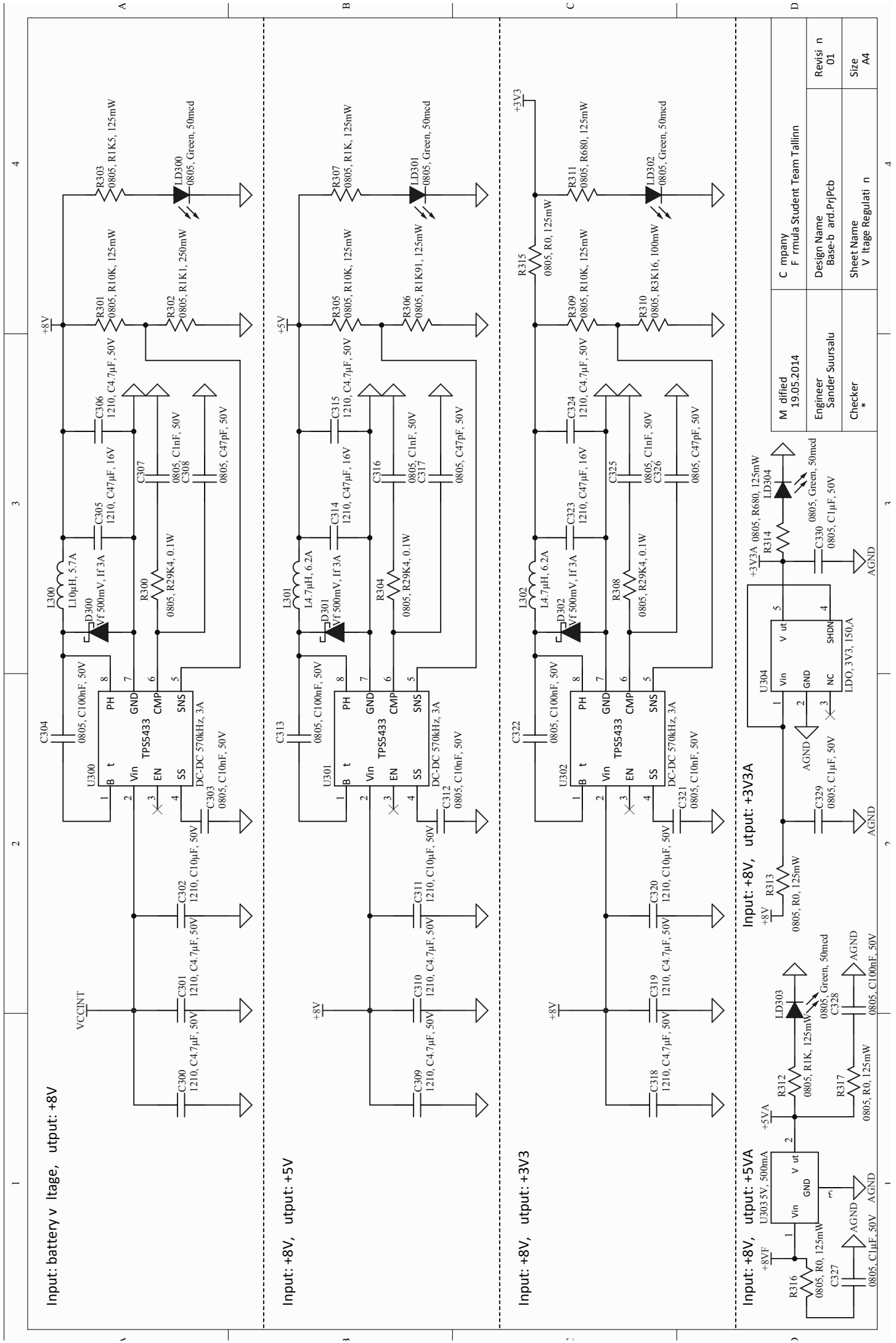


Modified 19.05.2014	Company Firma Student Team Tallinn
Engineer Sander Suursalu	Design Name Base-board.Pcb
Checker *	Sheet Name Power Output
	Revision 01
	Size A4



Modified 19.05.2014	Company Firma Student Team Tallinn
Engineer Sander Suursalu	Design Name Base-board.Pcb
Checker *	Sheet Name Power Output
	Revision 01
	Size A4





Input: battery v itage, utput: +8V

Input: +8V, utput: +5V

Input: +8V, utput: +3V3

Input: +8V, utput: +5VA

Input: +8V, utput: +3V3A

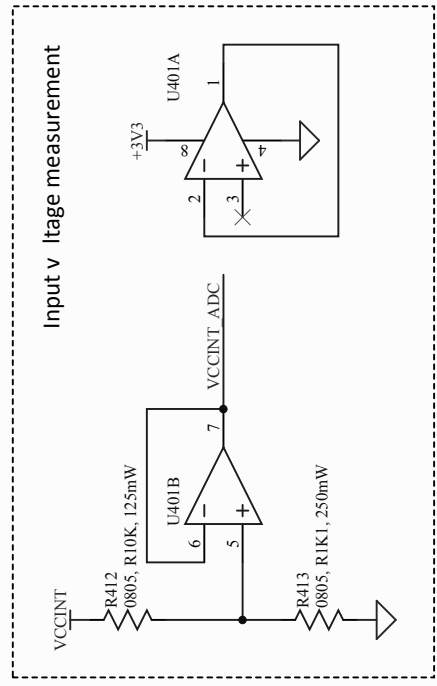
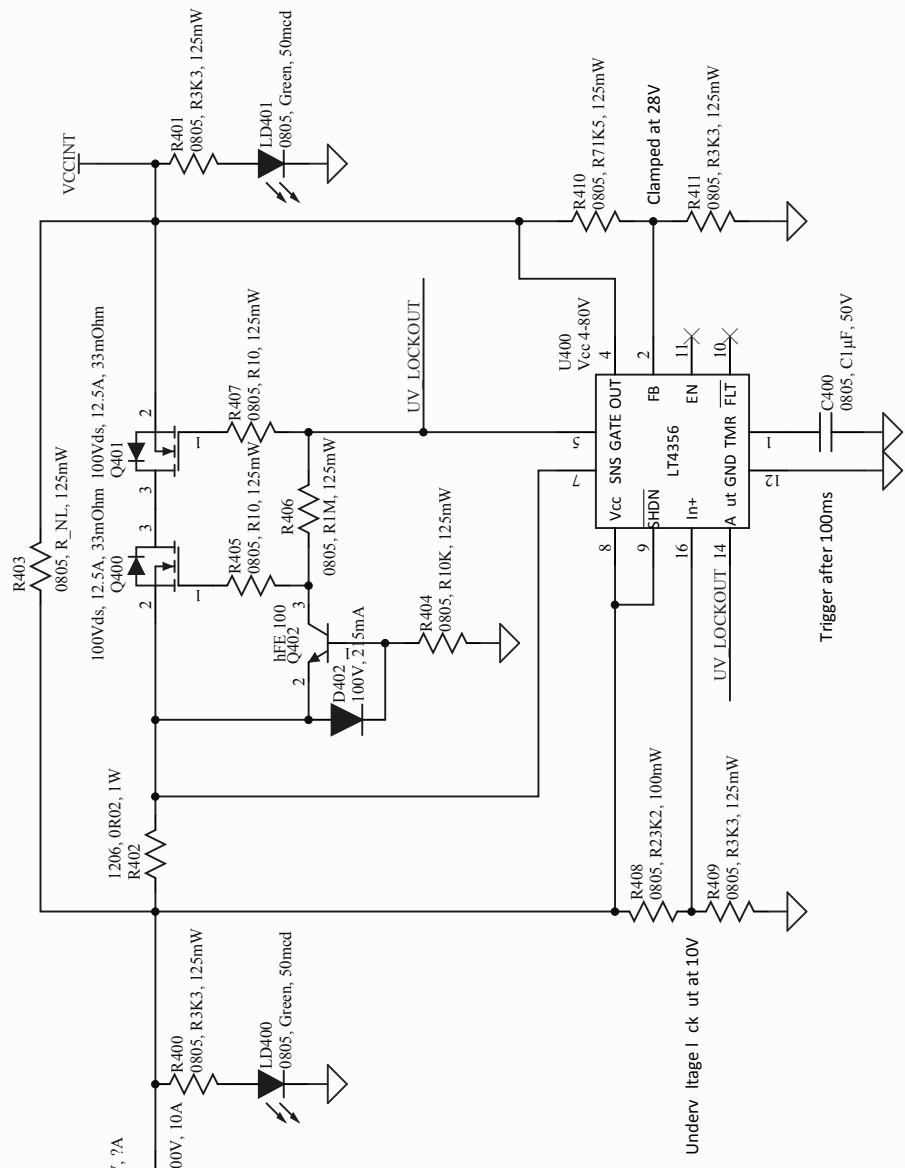
M dified 19.05.2014	C mpany F rmaula Student Team Tallinn	Revisi n 01
Engineer Sander Suursalu	Design Name Base-b and.PriPcb	Size A4
Checker *	Sheet Name V itage Regulati n	

A

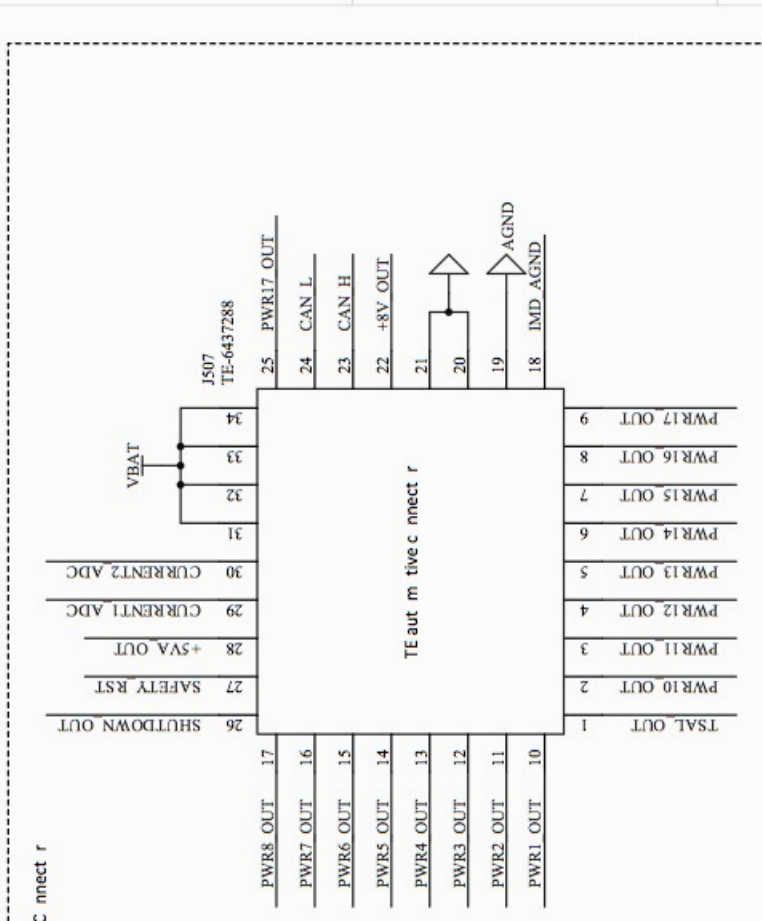
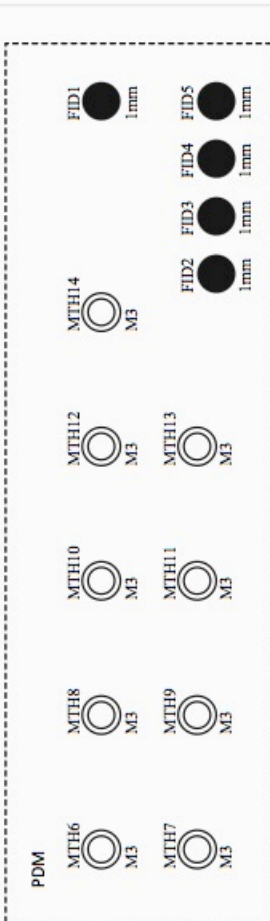
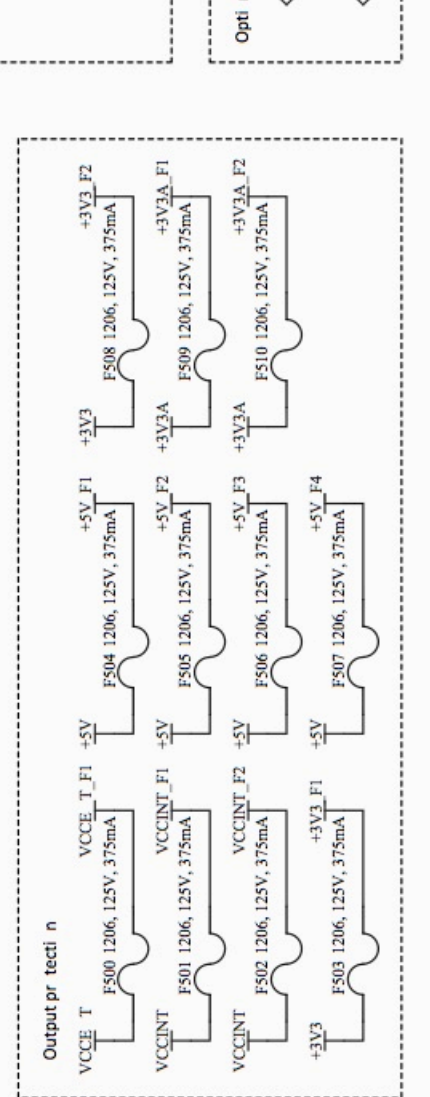
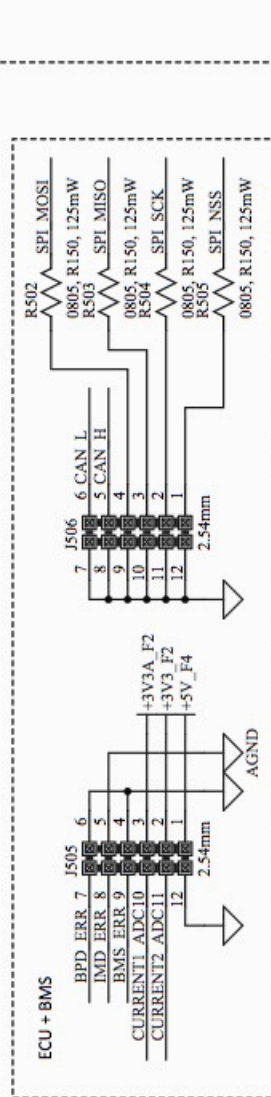
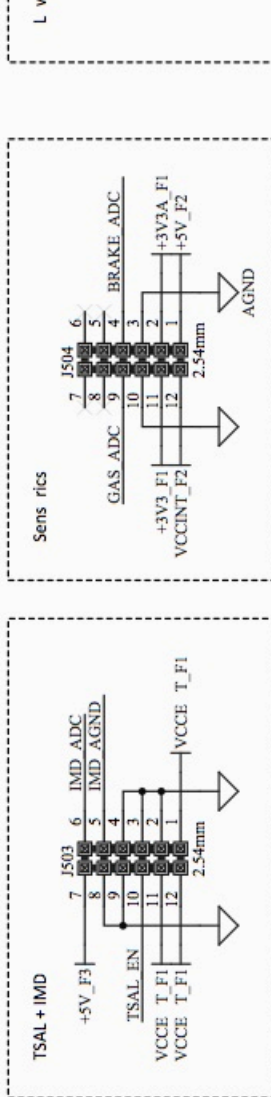
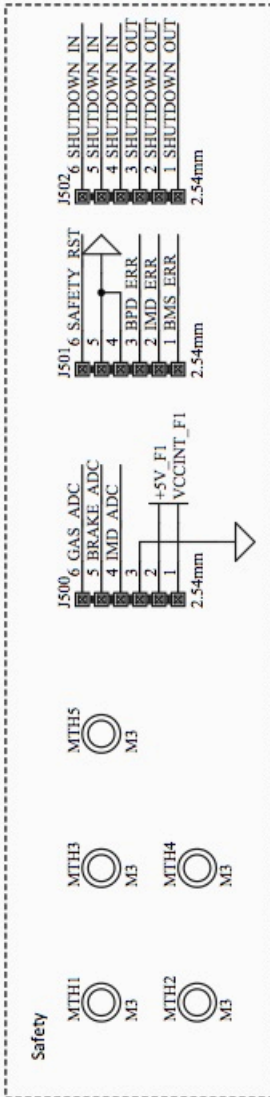
B

C

D



Modified 19.05.2014	Company Firma Student Team Tallinn
Engineer Sander Suursalu	Design Name Base-board.PjPcb
Checker *	Sheet Name Power Input
	Revision 01
	Size A4



Modified: 19.05.2014	Company: F rmlua Student Team Tallinn
Engineer: Sander Suursalu	Design Name: Base-board.PriPcb
Checker:	Sheet Name: C nnect r s
	Revisi n: 01
	Size: A4

## Lisa 2 PDM-i trükkplaadi kolmemõõtmeline mudel

