



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

IEE70LT

Püsimagnetitega sünkroonmootori juhtkontrolleri riistvara arendus

Elektroonika ja kommunikatsiooni õppekava

Magistritöö

Juhendaja:

Argo Kasemaa

Lõpetaja:

Joonas Karu

Tallinn 2015

Autori deklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroonika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroonika ja kommunikatsiooni erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Püsimagnetitega sünkroonmootori juhtkontrolleri riistvara arendus
Üliõpilane:	Joonas Karu, 132705IVEM
Lõputöö juhendaja:	Argo Kasemaa
Lõputöö esitamise tähtaeg:	1.juuni 2015

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Mootori kontrolleri riistvara arendamine elektrilise mootorratta jaoks.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on valmis disainida mootorikontroller, mis juhib püsimagnetitega sünkroonmootorit IGBT jõutransistoritega, kasutades väljavektorite modulatsiooni.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. püsimagnetitega sünkroonmootori juhtimiseks vajaminevad parameetrid;
2. skeemikomponentide valik;
3. mõõteahelate süntees ja arendamine;
4. komponentide valik.

Lähteandmed:

1. Texas instruments Opamps for everyone;
2. Texas instruments Analogue engineer pocket reference;
3. Texas instrument Space vector modulatsioon for motor control;
4. The art of electronics;
5. ST Microelectronics ARM STM32F4 reference manuals.

Lõputöö annotatsioon

<i>Autor:</i> Joonas Karu	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Püsimagnetitega sünkroonmootori juhtelektroonika riistvara arendus	
<i>Kuupäev:</i> 27.05.2015	84lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Infotehnoloogia	
<i>Instituut:</i> Thomas Johan Seebeck-i nimeline instituut	
<i>Töö juhendaja:</i> Argo Kasemaa	
<i>Sisu kirjeldus:</i> Püsimagnetitega sünkroonmootori juhtelektroonika disain, milles lähtutakse ruumi vektori modulatsiooni meetodikast valmistamiseks esimest prototüüpi.	
<i>Märksõnad:</i> Skeemitehnika, elektroonika arendamine, ST Microelectronics, trükkplaadi disain, mootori juhtimine, jõutransistor.	

Abstract

<i>Author:</i> Joonas Karu	<i>Kind of the work:</i> Master thesis
<i>Title:</i> Permanent magnet synchronous motor controller design	
<i>Date:</i> 27.05.2015	<i>84 pages</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>Faculty:</i> Information technology <i>Department:</i> Thomas Johan Seebeck-i nimeline instituut	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Argo Kasemaa	
<i>Abstract:</i> Permanent magnet synchronous motor controller design according to space vector modulation to design first prototype.	
<i>Key words:</i> Schematic design, electronics development, ST Microelectronic, Printed circuit board design, motor control, power transistors.	

Lühendite ja sümbolite loetelu

SVM – Space vector modulation – Välja vektori modulatsioon

DSP – Digitalsignaali protsessor

ARM – Advanced RISC machines

SD-kaart – Secure Digital kaart

PWM – Pulse with modulation – Pulsilaius modulatsioon

ADC – Analogue to digitaal converter – Analoog digitaalkonverter

DMA – Direct memory Access – Otse mälu ühenduvus

CANbus – Controller area Network bus

CAN – Controller area Network

ECU – Electronic Control Unit – Elektrooniline juhtüksus

JTAG – Joint Test Association Group

SWD – Serial wire debug

IDE – Integrated Development Environment – Integreeritud arenduskeskkond

BGA – Ball Grid Array

TI – Texas Instruments

ALU – Arithmetic and Logic Unit – Aritmeetika ja loogika üksus

MIPS – Millions of Instructions Per Second

FIFO – First In First Out – Esimesena sisse ja esimesena välja

SVPWM – Spae Vector Pulse With Modulation – Välja vektori pulsi laiusmodulatsioon

FLASH – Välmälu

R/D – Resolver to Digital – Resolver digitaalmuundur

Serial – Jadaühendus

PMSM - Püsimagnetitega sünkroonmootor

Sisukord

Sissejuhatus	8
1. Seletuskiri	9
1.1 Süsteemi kirjeldus.....	9
2. Skeemitehnika ja elektroonika disain	11
2.1 Mikrokontrolleri valik.....	11
2.2 Mikrokontroller.....	16
2.3 Faasi- ja aku pingemõõtmise ahelad	18
2.4 Faasivoolu mõõteahelad.....	23
2.5 Digitaalväljundid.....	29
2.6 Digitaalsisendid.....	30
2.7 Mikrokontrolleri lisaahelad.....	31
2.8 SD-kaart	33
2.9 Resolveri ja enkooderi liides.....	34
2.10 Potentsiomeetri sisend	36
2.11 CANbus	37
2.12 Toiteahelad.....	37
2.13 Temperatuuri sisendid.....	41
2.14 IGBT tagasiside ja tüürsignaale.....	44
2.15 Programmeerimise ahelad.....	46
3. Trükkplaadi disain	48
3.1 Trükkplaadi ülesehitus.....	48
3.2 Mikrokontrolleri ahelate disain.....	50
3.3 Pingemõõtmise ahelate disain.....	51
3.4 Toiteahela disain	53
3.5 Muude ahelate disain	54
4. Tarkvara rakendamine	56
5. Mõõtmised	57
5.1 Voolu ja pingemõõtmine.....	57
Kokkuvõte	60
Kasutatud kirjandus	62
LISAD	63
L.1.Skeemid	64
L.2. Trükkplaat	83

Sissejuhatus

Aastal 2013 avati Eestis üleriigiline laadimisjaamade taristu, mida võib pidada üheks suuremaks sammuks autonduse elektrifitseerimise valdkonnas. Hetkel saada olev tehnoloogia võimaldab ehitada Li-Ion (liitiumioon) akudega elektrisõidukeid, millel on tarbijale aktsepteeritav sõiduulatus. Tehnoloogia areng on ka motosporti muutnud. Praegu on LMP autod, *Le mans prototype*, minemas aasta-aastalt järjest enam hübriidenergia lahendustele. 2015. aastal startis Formula-E, mis on täielikult elektrijõul liikuvate vormelautode võistlussari.

Järk-järgult on näha, kuidas inimkond liigub rohkem elektrifitseeritud lahenduste poole. Tehnoloogia areng, mida peamiselt juhib elektroonika areng, on selle peamiseks initsiaatoriks. Elektromobiilsus on eestis tähtsal kohal ja kujutab endast suure arengupotentsiaaliga valdkonda.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on disainida püsimagneetilise sünkroonmootori jaoks kontroller, mis kasutab SVM (*Space vector modulation*) meetodit. Töö käsleb endas kontrolleri trükkplaadi disainimist vastavalt jõuahela komponentidele ja SVM spetsiifikale. Olemasolevat riistvara arvestades disainitakse juhtahelad.

Töö on jaotatud alapunktideks:

- Funktsionaalne ülevaade kontrollerist;
- Suuremate sõlmede ja lahenduste valik;
- Skeemitehnika koos simulatsioonidega ja trükkplaadi disain;
- Mõõtmised.

Lõputöös esitatud simulatsioonid on koostatud NI Multisim tarkvarapaketi. Trükkplaadi joonised ja skeemitehnika on tehtud kasutades Altium Circuitstudio-t. Joonised tehti kasutades Microsoft Excelit ja Pencil-it.

Töö käsleb endas kontrolleri trükkplaadi disaini arvestades komponente, mis on juba olemas.

Töö on jagatud neljaks osas, mis katavad disainimise algusest lõpuni. Osad on järgmised: elektroonika skeemi disain ja simuleerimine, trükkplaadi disain, tarkvara ülevaade ning reaalsed mõõtmised. Igas peatükis on alampeatükid, mis seletavad lahti ahelad, nende baasfunktsioonid ja omadused.

1. Seletuskiri

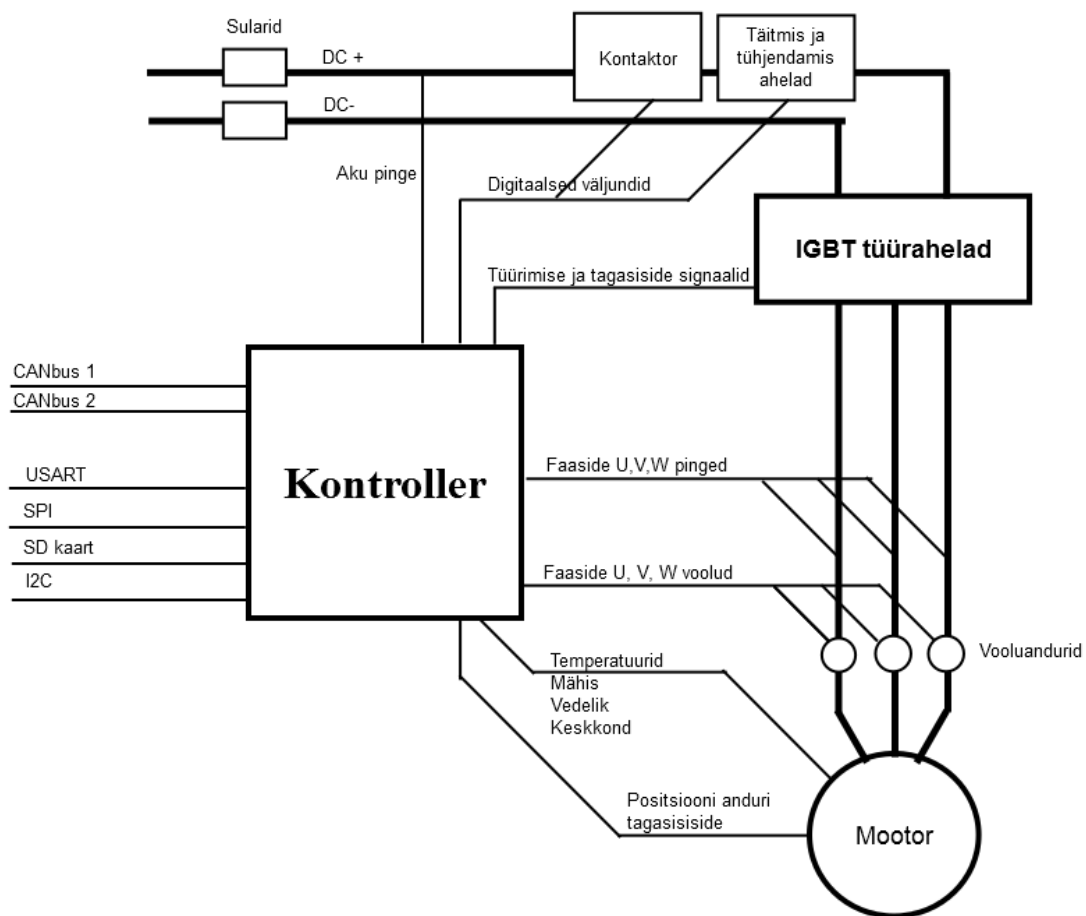
1.1 Süsteemi kirjeldus

Süsteemi lähteandmed on toodud tabel 1.1-es. Tabel kirjeldab omadusi, mida disainitav süsteem peab olema suuteline mõõtma ja arvestama.

Tabel 1.1. Lähteandmed

Parameeter	Väärtus
Sisendpinge nominaal väärtus	480V
Aku sisendpinge maksimaalne väärtus	540V
Faasivool maksimaalne	400A
Faasivool nominaalne	200A
Faasisagedus maksimaalne	500Hz
Faasisagedus nominaalne	400Hz
Faasipinge maksimaalne	600V
Faasipinge nominaalne	400V
Võimsus maksimaalne	100kW
Võimsus nominaalne	45kW
Vooluanduri tüüp	LEM LF505-S
Mootori tüüp	Enstroj Emrax 228 PMSM
Maksimaalne mootori temperatuur	120C
Mootori temperatuuri andur	KTY81/210

Kontrolleri süsteemist parema ülevaate saamiseks on lisatud joonis 1.1, mis kirjeldab süsteemi ja annab piltliku ülevaate funktsionaalsest poolest.



Joonis 1.1. Kontrolleri põhimõtteskeem

Süsteem koosneb kontrollerist, kontaktorist, sularitest, laadimisahelast ja tühjenemisahelast, IGBT(isoleeritud paisuga bipolaar transistor) tüürahelatest ning vooluanduritest. Vooluandurid on süsteemis valitud vooluväljundiga, mille peamine eesmärk on vähendada müra mõju mõõdetavale suurusele. Vooluandurid on LEM LF tooteseeriast.

2. Skeemitehnika ja elektroonika disain

2.1 Mikrokontrolleri valik

Mikrokontrollerite valik on lai ja keeruline. Tööstuse liidrid mootorite juhtimise osas on Texas Instruments ja Freescale Semiconductors. Mikrokontrolleri valik peab olema kaalutletud ja põhjendatud. Valdav enamus seni turul olevatest toodetest kasutab mootorite juhtimiseks spetsiaalselt arendatud DSP-sid.

Mikrokontrolleri valiku kriteeriumid ja eelistused:

- Kiire ja võimas tuum.
 - Eelistatavalt 32bit ARM arhitektuuriga, kuna nende kohta on väga palju materjali ja kogemus selle arhitektuuri protsessoritega on suurim.
- Rohkem kui 1MB mälu.
 - Palju tabeleid ja eelkonfigureeritud parameetrid nõuavad palju mälu. Lisaks kommunikatsiooniprotokollid ja SD-kaardile salvestamise võimalus.
- Spetsialiseeritud PWM.
 - Poolsildade juhtimiseks optimeeritud PWM liides, millel on automaatne DMA funktsionaalsus.
- Mitmekanaliline ADC.
 - Hõlbustab samaaegset voolu ja pinget mõõtmist. Kolmas eraldi ADC annab lisaks paindlikuse lisaparameetrite mõõtmisel, mida ei ole vaja suure sagedusega mõõta.
- DMA funktsiooni olemasolu.
 - Kiirendab perifeeriade andmevahetust tuumaga automatiseerides tulemuse otse ettemääratud mäluridadele.
- 2 CANbus liidest.
 - Kahe erineva CANbus ühenduse loomiseks. Esimene suhtleb juhtajuga ja teine detsentraliseeritud akujuhtimise süsteemiga.
- Ujukoma tehete jaoks optimeeritud tuuma olemasolu.
 - Suurendab märkimisväärselt ujukomatehete kiirust tuumas. Arvutuskiiruse vahed ulatuvad suurusjärgudesse.

- Rohkem kui 128KB RAM.
 - Muutujate salvestamiseks ja hoiustamiseks.
- JTAG ja SWD liidese olemasolu.
 - Kiire ja lihtne viis programmeerimiseks ja süsteemi oleku jälgimiseks.
- Eclipse baasil IDE.
 - Tasuta alternatiiv programmeerimise alustamiseks.
- Odav programmeerimise alustamiseks.
 - Põhifunktsionaalsuse saamiseks on vajalik odav ja lihtne programmeerimise alustamine.
- Lihtne joota trükkplaadile.
 - Mitte BGA tüüpi kiip.
- Lihtne saadavus.
 - Saadaval edasimüüjate käest.

Lähtudes paikapandud kriteeriumitest jäi lõppvalikusse kolme firma mikrokontrollerid: Piccolo seeria Texas Instrumenti-lt, Kinetis KVx seeria Freescale-lt ja STM32F4 seeria ST Microelectronics-lt.

TI (Texas Instrument) on spetsiaalne tooteseeria selle jaoks, C2000, milles on Piccolo ja Delfino 32-bitised protsessorid, mis saavad hakkama sarnaste ülesannetega. Mõlemad on arvestatava võimsuse ja tugevustega. Piccolo seeria on 90MHz taktsagedusega ning omab spetsiaalset PWM skeemilahendust, mis on optimeeritud kolmeafaasiliste süsteemide juhtimiseks, omades poolsildade juhtimiseks kasulikku surnud aja genereerimise tsooni. See on kasulik vältimaks lühiajalist lühist jõuahelas. Mootori juhtimine koosneb suurest osast trigonomeetriliste tehete teostamisest. Selleks jaoks on Piccolo ja Delfino seeria toodetel suur ALU, mis kiirendab elementaartehte arvutamist. Mõõteandmete jaoks on olemas ADC, mis on 12-bitise resolutsiooniga sissehitatud riistvaralise keskmistamise toega. Hea lisana on seal ka CAN liides koos paljude erinevate kommunikatsiooniprotokollidega.

Freescale semiconductors omab samuti võimekat tooteportfelli mootorijuhtimise osas. Nende tootevalikus on Kinetis KV tooteperekond, mis on mõeldud mootorite juhtimiseks. Selles tooteperekonnas on kasutusel 32-bitised ARM arhitektuuriga mikrokontrollerid, mis küündivad kuni 150MHz taktsageduseni. Freescale-le omaselt on nende toodetes rakendatud autotööstuse standardeid - see tähendab, et mikrokontrolleri viigud kasutavad kahte ühendussilda. Samuti omab ta spetsialiseeritud PWM moodulit, mis on mõeldud mootorite juhtimiseks.

ST Microelectronics pakub oma tooteseerias 32bit ARM protsessoreid, mis on väga võimekad. Arvutusvõimsust küündib 225MIPS-ini 180 MHz taktsageduse juures. Funktsionaalsust laiendab spetsialiseeritud PWM väljund mootorite juhtimiseks ja kolm eraldiseisvat ADC muundurit, mis hõlbustab mõõteandmete kogumise. ADC suudab riistvaraliselt keskmistada mõõteandmeid, et filtreerida müra. ST Microelectronics kasutab ka valdavates toodetes autotööstusele sobilikke standardeid.

Kokkuvõtvalt on mikrokontrolleri valik keeruline. Koondtabel 2.1 annab ülevaate kõigist kolmest mikrokontrollerist ja nende peamistest omadustest. Valiku teeb keeruliseks mootori juhtimiseks vajaliku algoritmi keerukus. Kuna tegu on reaalaja süsteemiga, on selle operatsioonid aegkriitilised tagamaks funktsionaalsust.

Valitud mikrokontrolleriks on ST Microelectronicsi STM32F439. Valiku põhjuseid on mitu. Esiteks on olemas tasuta IDE, mis hõlbustab arendamist ja programmeerimist. Teiseks on sellel mikrokiibil odavad alternatiivid programmaatoritele. ST jagab odavate arendusplatvormidega sissehitatud programmatooreid nimega ST-Link. Vastav arendusplaat, mille hinna suurusjärg on 10€, on täiesti funktsionaalne programmaator ST Microelectronicsi mikrokontrolleritele. ST Microelectronicsi-t toetavad ka lisaks muud kõikvõimalikud professionaalsed programmaatorid, millel on edasiarendatud JTAG ja SWD funktsionaalsus nagu näiteks Segger J-Link. Tähtsamatele liidestele on integreeritud FIFO, mis lihtsustab andmevahetust üle CANbus-i ja teiste andmeliidestega. Lisaks on STM32F4 Seeria tooted 5V tolerantsete viikudega. See tähendab, et olukordades, kus 5V võib viigule jõuda, ei juhtu kiibiga midagi. Heaks lisaks on ADC puhul ka temperatuuriandur kiibi sees ja toitepinge monitoorimine, et viia vajadusel sisse vastavaid parandusi.

Tabel 2.1. Mikrokontrollerite võrdlustabel

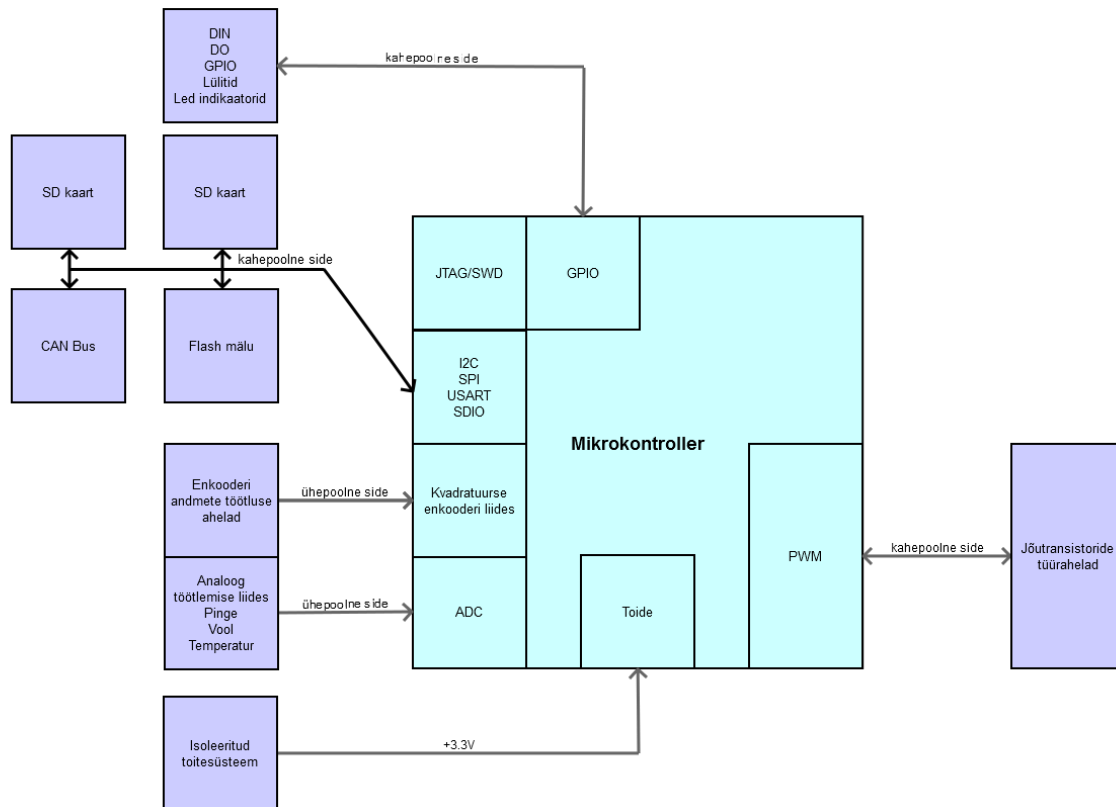
Atribuut	ST Microelectronics	Freescale	Texas Instruments
Mudelinimi	STM32F439	Kinetis KV46F256	TMS320F28069
Taktsagedus	180MHz	150MHz	90MHz
Tuuma arhitektuur	ARM Cortex M4	ARM Cortex M4	TMS320C280X
ADC kanalite arv	16	16	16
ADC hulk	3	2	2
ADC bittide arv	12	12	12
ADC võendamise sagedus	2.4MSPS	4.1MSPS	3.46MSPS
ADC DMA	Jah	Jah	jah
Spetsialiseeritud PWM	Jah	Jah	Jah
Spetsialiseeritud PWM moodulite hulk	2	1	1
PWM resolutsioon	16 bit	16 bit	16 bit
Kvadratuurliides	Jah	Jah	Jah
SPI liideste hulk	6	2	2
I2C Liideste hulk	2	1	1
CAN liideste hulk	2	2	1
Toitepinge	3.3V	3.3V	3.3V
Sisemine alapinge kaitse	Jah	Jah	Jah
Sisemise süsteemi jälgimise kaitse	Jah	Jah	Jah
SD-kaardi tugi	Jah	Ei	Ei
Saadavus	Jah	Ei	Jah
Programmaatori saadavus	Hea	Keskpärane	Keskpärane

Joonis 2.1. kujutab mikrokontrolleri süsteemi kirjeldust väliste elektrooniliste ahelatega. Lillad kastid näitavad ahelaid, mis ei ole mikrokontrolleri sees. Lillad blokid seletatakse lahti peatükis 2.

Parema funktsionaalsuse ülevaateks on loetelu liidestest ja skeemiosadest:

- Faasipinge ja sageduse mõõteahelad;
- Faasivoolu mõõteahelad;
- Resolveri ja kvadratuur enkooderi liides;
- SD-kaardi liides;
- Digitaalsete väljundite liides;
- Digitaalsete sisendite liides;
- CANbus liides;
- Alalispinge mõõtmise ahel;
- Temperatuuri mõõtmise ahelad;
- Programmeerimise ahelad;
- Konfigureerimise ahelad ja LED indikaatorite ahelad;
- Toiteahelad.

Peatükis nr 2 käsitletakse elektroonika disaini ja simuleerimist ahelates, mida on otstarbekas simuleerida.

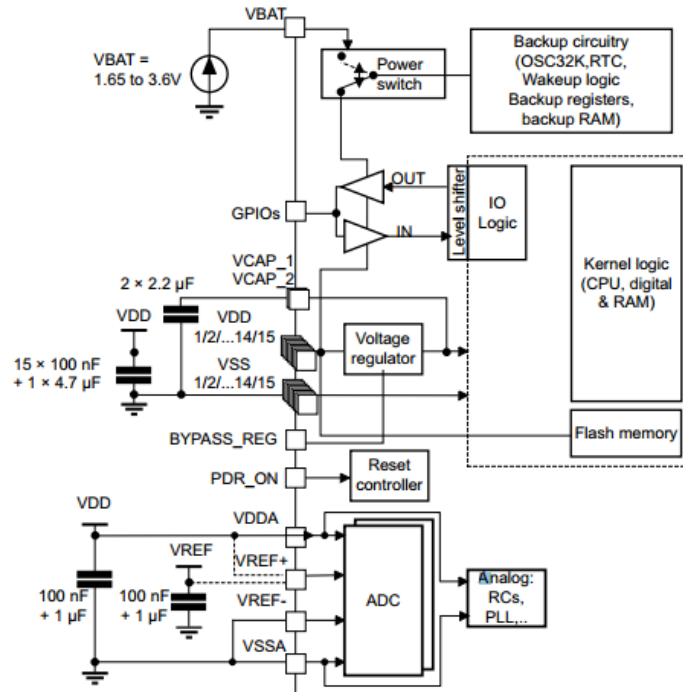


Joonis 2.1. Mikrokontrolleri funktsionaalne skeem

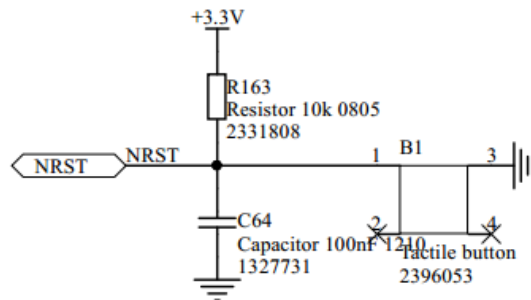
Disaini eesmärgiks on kasutada lihtsaid skeeme vältimaks simuleeritud olukordadest kõrvalekaldeid, mis tekitavad kaootilisi probleeme.

2.2 Mikrokontroller

Mikrokontrolleriks on STM32F439, mis on STM32F4 seeria kiireim ja suurima arvutusvõimsusega mikrokontroller. Kasutatakse 144-viigulist varianti, millel on integreeritud toide tuuma jaoks. Olenevalt rakendusest võib mikrokontrollerile lisada radiaatori. Joonis 2.2. näitab tootjapoolset soovitatud toiteskeemi lahendust. Ära on toodud ka soovitatavad kondensaatori mahtuvused ja kogused. Digitaalsele osale on ette nähtud 15 100nF kondensaatorit ja üks 4.7µF kondensaator. Digitaalohela kondensaatorite mõte on lühista kõrgsageduslike komponente, mis tekitavad häireid. Sellegi poolest on soovitatav eraldada digitaal ja analoog osa, et vältida häiringuid ning müra. Analooghela osadele on ette nähtud 100nF ja 1µF kondensaator, et hoida toite- ja referentspinget stabiilsena. Joonis 2.3 näitab standardset skeemilahendust algkäivitus lüliti jaoks.



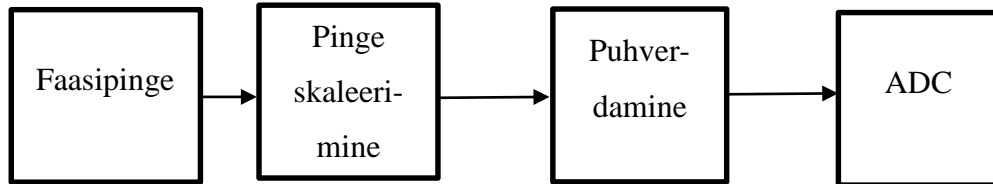
Joonis 2.2. Toitesüsteem[13]



Joonis 2.3. Reset lüliti

2.3 Faasi- ja aku pinge mõõtmise ahelad

Faasipinge mõõtmine käib jõuahela sisendpinge negatiivse pinge suhtes. Järgneval joonisel 2.4. kujutatud plokk skeem näitab ahela üldist funktsionaalsust. Iga faasi jaoks on ahel identne. Sama mõõteahel on kasutusel ka süsteemi alalispinge mõõtmiseks.[1]



Joonis 2.4. Faasipingete töötlemise skeem

Lahendus kätkeb endas operatsioonivõimendite kasutamist koos mõningate kaitseahelatega. Kaitseahelateks on diodid, mis on ühendatud nullpotentsiaali ja toitesse.

Mõõteahela koostamiseks peab teadma, kuidas ja mis suuruses mõõdetav pinge muutub. Arvestades, et mootoriks saab olema Enstroj Emrax 228 mootor, keskmise pinge konfiguratsiooniga, on V_{LL} ehk liinipinge $\sqrt{3}$ korda suurem V_f . Kuna null punktiks on aku miinus potentsiaal, moduleeritakse siinus kõver aku potentsiaalide vahele. Siinuse negatiivne periood toetub alati akupinge negatiivsele pingeniivoole. Andmeleht ütleb, et maksimaalse pöördekiiruse saavutamiseks on lubatud akupinge kuni 540V. See tuleb mootori isolatsioonimaterjalist ja võlli pöörlemiskiirusest. V_{PP} on 540V, sellisel juhul on $V_{RMS} \sim 191V$. Kontrolleri amplituuda suurendamiseks on maksimaalseks mõõtepingeks võetud 1000V ja maksimaalseks sageduseks 1200Hz. Mootori pooluspaaride valem,

$$n = \frac{2 * 60 * f}{p}, \quad 2.1.$$

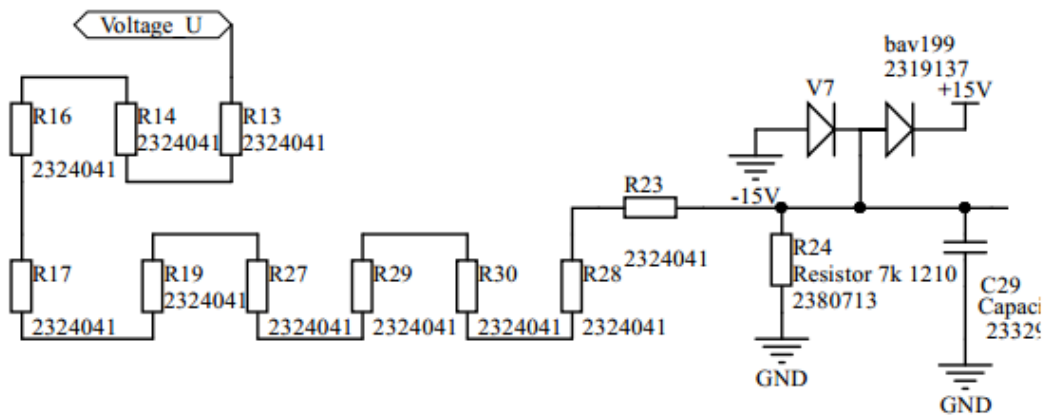
annab pooluspaaride arvu vastavalt pöörlemiskiirusele. Leiame samast valemis sageduse,

$$f = \frac{10 * 6500}{60 * 2} = 541Hz, \quad 2.2.$$

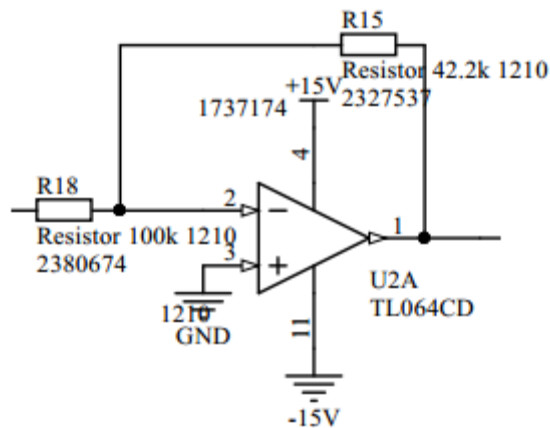
mille vastus on 541Hz. Arvutus näitab mootori maksimaalset pöörlemiskiirust. Sellest saab tuletada ka minimaalse aja, mille jooksul peab mikrokontroller suutma arvutada järgmise lülitusimpulsi pikkuse.

Pinge mõõtmise ahela jaoks on kaks peamist parameetrit— pinge ja sagedus. Neid kahte põhiparameetrit arvestades tuleb luua vastav pinge mõõtmise ahel. Kogu ahela peamine eesmärk on maksimaalselt 1000V pinge puhul teha sellest ADC-le maksimaalne mõõdetav väärtus, mis hetke lahenduses on 3.3V.

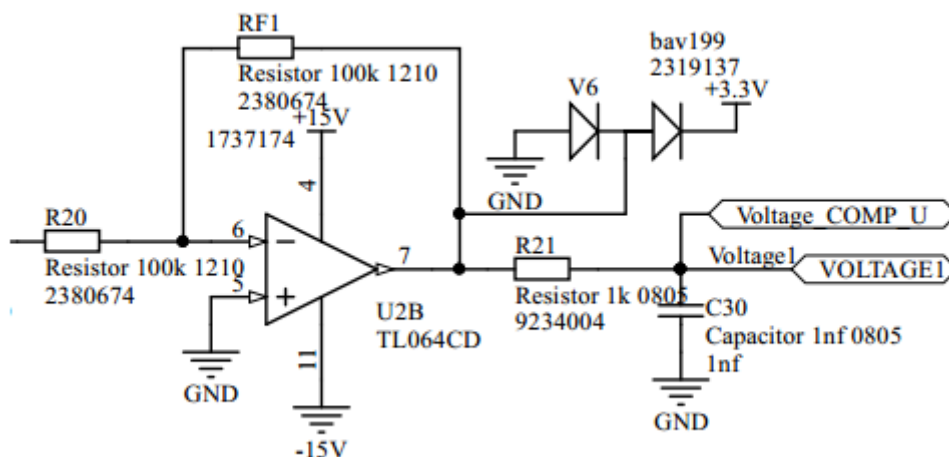
Kogu ahel on mahutatud kolme joonise osa peale: joonis 2.5, 2.6, 2.7.



Joonis 2.5. Pingejaguri skeem



Joonis 2.6. Esimene kaskaad ahel



Joonis 2.7. Teine kaskaad ja ahela lõpp

Pinge vähendamine toimub pingejaguri põhimõttel, mida väljendab valem,

$$V_o = \frac{R_2 * V_i}{R_1 + R_2} = \frac{7k\Omega * 1000V}{2200k\Omega} = 3,3V. \quad 2.3.$$

Arvutusest näeme, et 1000V sisendpinge korral, kui R2 on 7kΩ, on ahela väljund 3,3V.

Hetke lahenduses kasutatakse invertteerivas režiimis operatsioonivõimendit. Eesmärk on õppida ahelat hiljem kasutama tagasisidestamata süsteemi puhul. Ideaalse operatsioonivõimendi valem, mis kehtib invertteerivas režiimis, on järgmine,

$$V_o = \frac{-R_f}{R_{in}} * V_{in}. \quad 2.4.$$

Kuna operatsiooni võimendi on kasutuses invertteerivas režiimis, muutub väljund 0V ja -3.3V vahel. Lahenduse kasutamiseks peab olema impedants suurem kui eelnevas pingejaguris, sest muidu jaguri suhe muutub ja pinget skaleeritakse valesti. Selle vältimiseks on kaskaadi sisendtakistuseks R_{in} , 100kΩ. Leiame valemist 2.4 R_f väärtuse, mis näitab tagasiside takistuse väärtust,

$$R_f = \frac{-100000}{-3,3 * 3,3} = 100k\Omega. \quad 2.5.$$

Antud lahendus näeb ette selle kaskaadi pinge võimendustegurit -1-na. Arvutused ja simulatsioon viiakse läbi operatsioonivõimendiga TL064CD, mis on sobilik praeguse rakenduse jaoks. TL064CD on JFET sisendiga, mis tähendab et sisendtakistus on suurusjärgus kuni $10^{12}\Omega$, mis on parem kui BJT transistoridel baseeruvad operatsioonivõimendid, kuna see tagab sisendsignaali parema võimenduse.

Reaalsel operatsioonivõimendil on alati väiksem võimendustegur kui ideaalsel. Kaod tekivad sisendi ja väljundi takistuse tõttu.

Esimesele operatsioonivõimendile järgneb teine, mis invertteerib signaali tagasi originaalsesse faasi. Selle operatsioonivõimendi võimendustegur on -1. See tagab, et ADC poolt mõõdetav signaal on samas faasis kui sisendis mõõdetav suurus.

Lisaks on lõpetuseks RC madalpääsfilter, mis lõikab välja üleliigse müra. Selle saavutamiseks on vaja leida sobilik RC ahel. Võttes takistuseks $1k\Omega$ ja mahtuvuseks $2.2nF$ leiame,

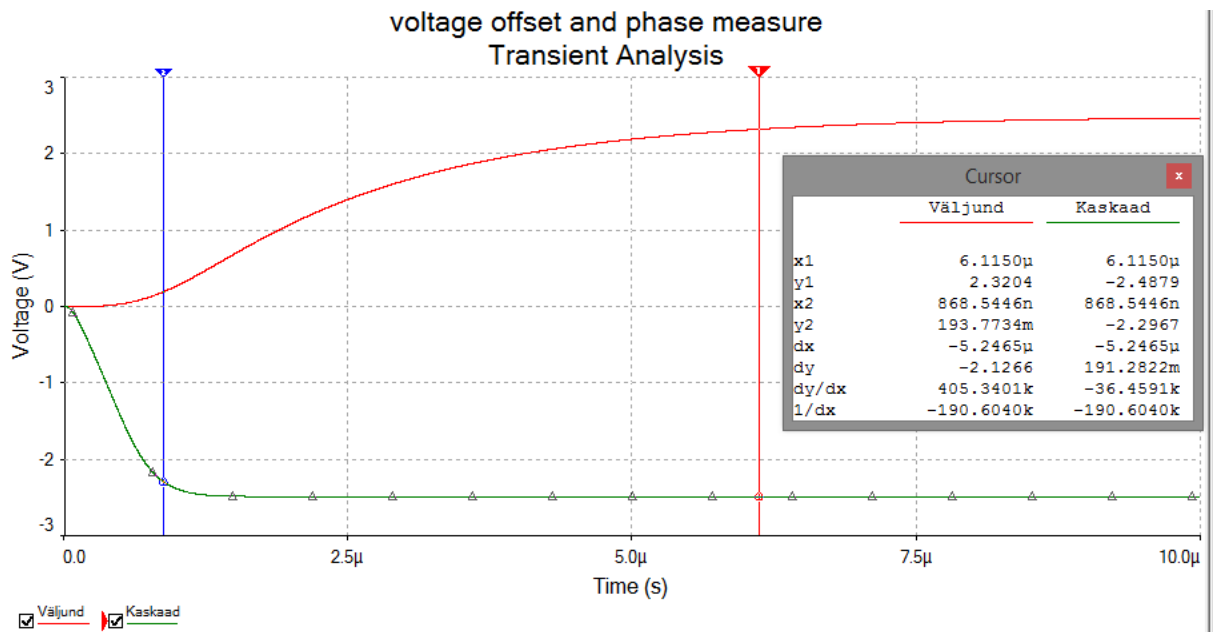
$$c = \frac{1}{2 * \pi * R * C} = \frac{1}{2 * \pi * 1000 * 2.2 * 10^{-9}} = 72343Hz, \quad 2.6.$$

et lõikesagedus on $72.30kHz$. Hetkel on see sobilik, probleemide esinedes võib seda muuta, et saavutada paremat lõikesagedust.

Eelnevalt kirjeldatud lahendus on hetkel mõeldud arenduse jaoks. Sellesse samasse lahendusse on tulevikus plaanis lisada komparaatoritel põhinev faasijärjestamise loendur, eesmärgiga hüljata enkooder mootori juhtimiseks. Vahekaskaad on mõeldud uurimiseks ja arenduse üheks tsüklikuks.

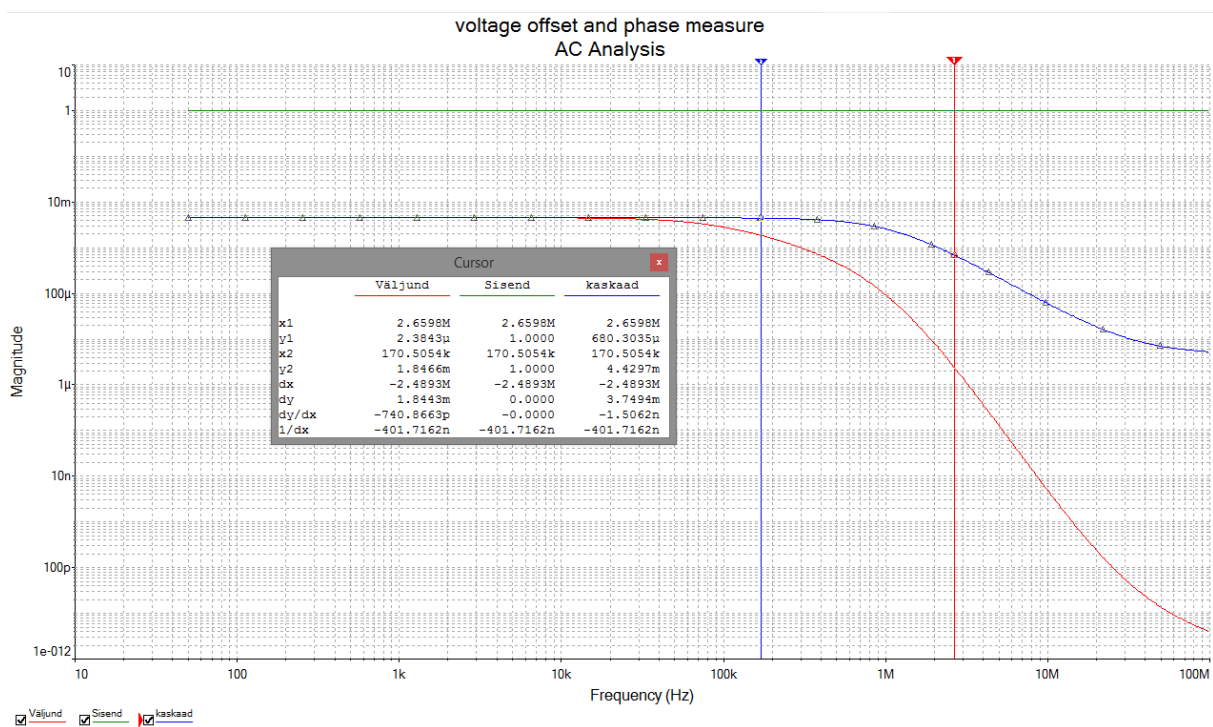
Simulatsioonis kasutatakse originaalse TL064CD operatsioonivõimendi SPICE mudelit, mis on täpne. Sellisel juhul saab viia sisse korrektsioonid, et leida õigeid takisti väärtuseid ja viia võimendusteguri jaoks sisse korrektsioone. Joonised 2.8, 2.9, 2.10 näitavad simulatsiooni tulemusi. Tulemused näitavad, et eesmärgi päraselt valitud komponendi väärtused on õigesti arvestatud ning töötavad ilma viperusteta.

Ühikimpulssimulatsiooni tulemus ei näita problemaatilisi suuruseid ega kõrvalekaldeid ettenähtust süsteemist. Simulatsiooni ühikimpulss oli $550V$ pingega sooritatud.

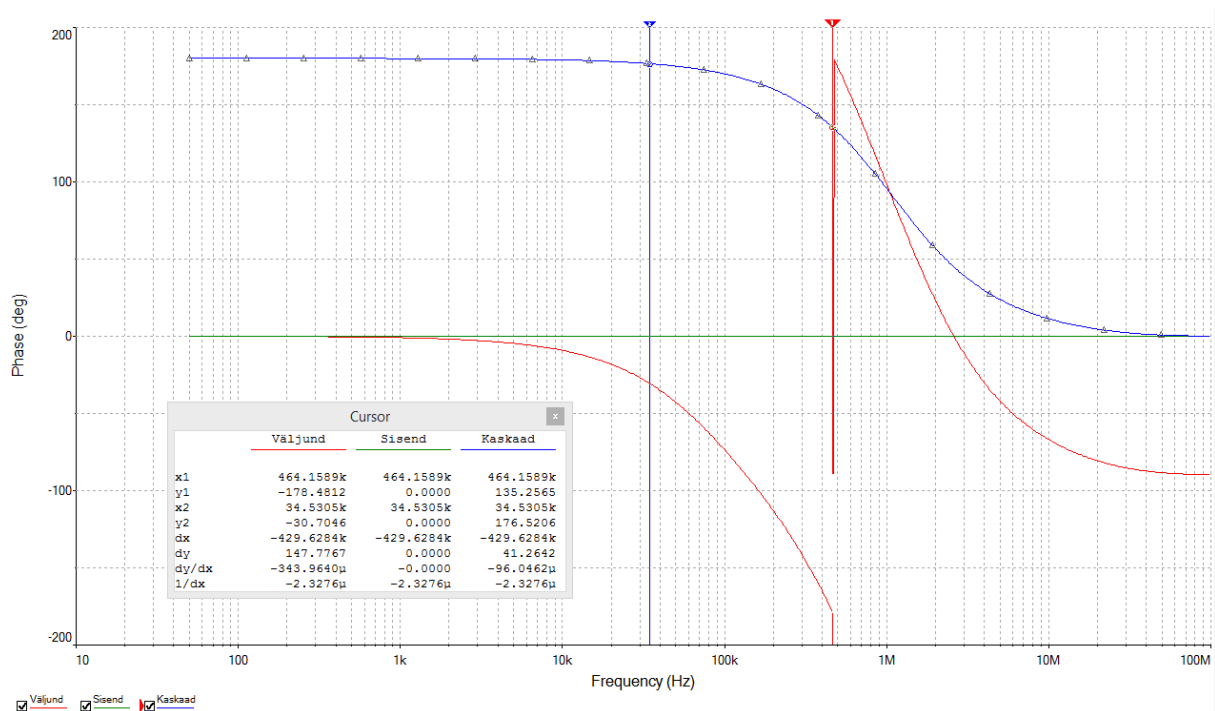


Joonis 2.8. Ühik impulssiga teostatud simulatsioon

Sageduspõhised simulatsioonid ei toonud üllatusi ja näitasid oodatud tulemusi.



Joonis 2.9. võimenduse sõltuvus sagedusest



Joonis 2.10. faasinurga sõltuvus sagedusest

Simulatsiooni tulemustest võib välja lugeda seda, et suurem tõenäosus on vähendada RC filtri lõikesagedust, kui seda suurendada. Üleliigse müra vältimiseks võib modifitseerida lõikesagedust vastavalt vajadusele. Mootorjuhtimises on suur osa harmoonikute mõõtmisel. Olenevalt mõõtepunktidest on SVM-i pingekujus alati sees komas harmooniline ja ka kõrgemad harmoonilised, mis tähendab et maksimaalsel kiirusel on kolmanda harmoonilise sagedus 1623Hz. Juhtimise realiseerimiseks kasutatakse ka suuremat järku harmoonilisi, mille eesmärgiks on madala pöörlemiskiiruse juures pakkuda optimaalset töörežiimi ja tagasiside informatsiooni.

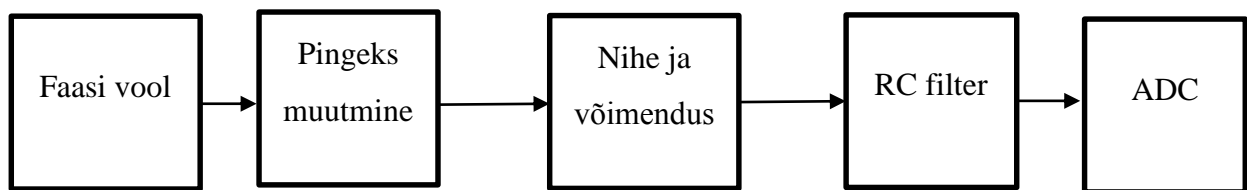
2.4 Faasivoolu mõõteahelad

Faasi voole mõõdetakse vooluanduriga, mis põhineb *Hall*-i efektil. Vooluanduriks on LEM LF505-S, mis on suure mõõtepiirkonnaga ja annab võimaluse mõõta voolu ka ülekoormuse ajal. Tabel 1.2 näitab peamisi parameetreid, mida arvestatakse ahelate disainimisel. Skeemi eripäraks on anduri bipolaarne väljundkarakteristik. Sellisel juhul tuleb mõõteahelas tekitada nihe, mis annab nii-öelda nullpunkti voolu mõõtmiseks. Disainis on nullpunkt ideaaljuhul 1,650V nivool. Selline nivoo annab suurima amplituudi, mida ADC suudab mõõta. Lisaks on võimalik mikrokontrolleri tarkvarasse sisse integreerida nullnivoo kalibreerimise funktsiooni. Tabel 2.2. loetleb vooluanduri nimiparameetrid.

Tabel 2.2. Vooluanduri nimiparameetrid

Atribuut	Väärtus
Amplituud väärtus voolul	±800A
Nominaal voolu I _{RMS}	500A
Muundamise suhe	1:5000
Lineaarsuse viga	< 0.1%
Täpsus	±0.6%
Maksimaalne vool sekundaarmähises	±160mA

Joonis 2.11 esitab plokk skeemi faasivoolu mõõtmiseks.



Joonis 2.11. Faasivoolu mõõtmise põhimõte

Arvutus 2.7. annab maksimaalse pinget, mis tekib takistil, kui voolu anduri mõõde kandja muudetakse pinget väärtuseks. Vooluväljundiga andurid on kasutusel müra rikkas keskkonnas. Nihet ja võimendust on võimalik teha ühes operatsioonivõimendis, sellisel juhul lisatakse negatiivsesse sisendisse nihkepinge väärtus.

Esimeseks etapiks on muuta vool pingeks. Vool juhitakse läbi takisti ja mõõdetakse sellel tekkivat pingelangu. Ohmi seadusele tuginedes leiame pingete ekstreemumid, kui vooluanduri maksimaalne vooluväljund on ±160mA,

$$U = \pm R * I = \pm 1.6V.$$

2.7.

Pinge hakkab selles osas vahelduma ±1,6V väärtuste vahel.

Teises etapis lisame teisendatud vooluanduri näidule uue nivoo— nullnivoo. Selleks kasutame standardset operatsioonivõimendi summeerimise skeemi. Summeeriv ahel invertteerib pinget väärtuse negatiivsesse poolde, et seda ADC-ga mõõta. Mille järel toimub uus invertteerimine

ning tulemusena on alati positiivse väärtusega mõõtetulemus. Antud lahenduses on võimendustegur 1, kuna sisendpinge jääb absoluutväärtuses väiksemaks kui 3,3V. Leiame valemi 2.8 järgi ekstreemumväärtused disainitavas ahelas,

$$V_o = \frac{-10000}{10000} * (\pm 1.6 + 1.65) = 1,65 \pm 1,6V, \quad 2.8.$$

millest leitakse, et miinimum väärtused on 0,05V ja 3,25V. Juhul, kui mõõteväärtus on üle 3,3V või alla 0V, lühistatakse signaal läbi kaitsediiodide kas toitesse või nullpotentsiaalile.

Edasises osas toimub invertteerimine, millega muudetakse mõõdetav signaal positiivsesse pingevahemikku. Signaal hakkab olema 0V ja 3.3V vahel. Selles ahelas peab olema võimendustegur -1. See saavutatakse kui R_f ja R_{in} on võrdsed. Arvutuses,

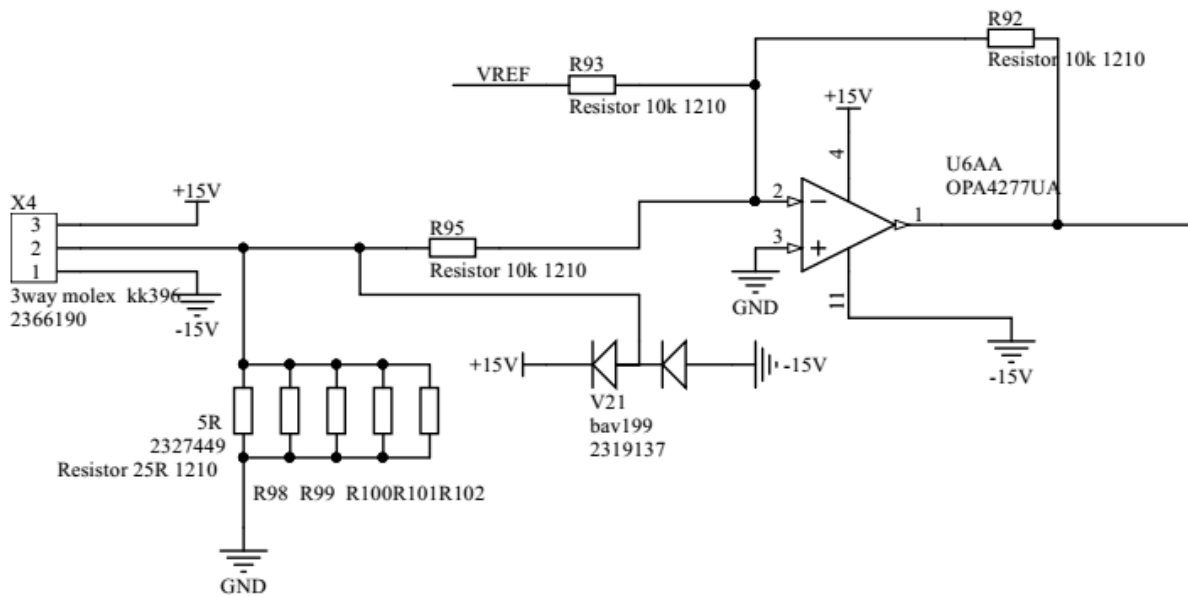
$$V_o = \frac{-R_f}{R_{in}} * V_{in}, \quad 2.9.$$

leitakse, et kui sisendtakistus on 10k Ω , siis tagasiside takistus on samuti 10k Ω .

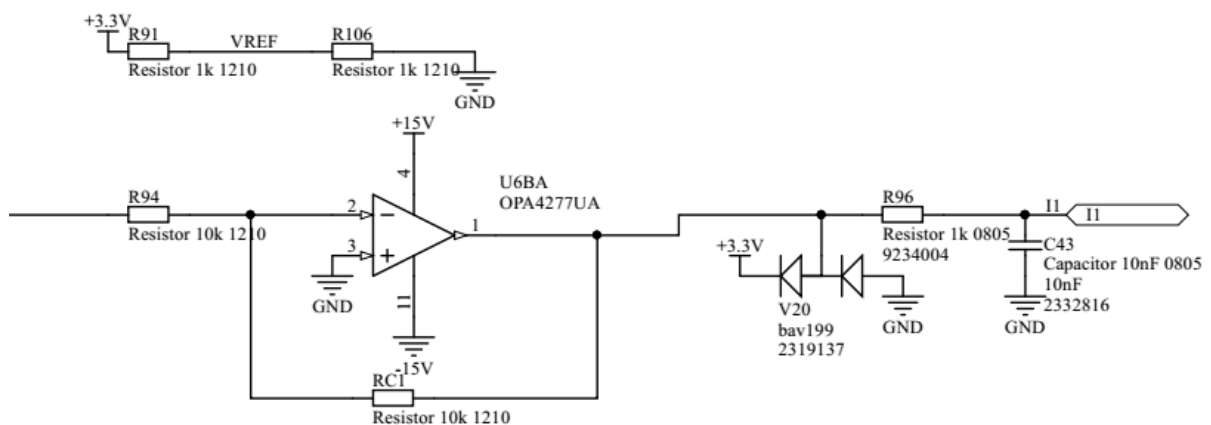
Viimaseks etapiks voolu mõõtmisel on filtreerimine. Antud lahenduse puhul kasutatakse samasugust filtreerimise lõikesagedust kui pingefiltreerimise puhul. Analoogiline arvutus tehenagu arvutus 2.6,

$$c = \frac{1}{2 * \pi * R * C} = \frac{1}{2 * \pi * 1000 * 2.2 * 10^{-9}} = 72,343\text{kHz}, \quad 2.10.$$

jõuab lõikesagedusele, milleks on samuti 72kHz.



Joonis 2.12. Voolu signaali töötlemise ahela esimene osa



Joonis 2.13. Voolu signaali töötlemise ahela teine osa

Joonised 2.12 ja 2.13 annavad ülevaate üldisest skeemist, mis on arvutatud vastavalt väljaarvestatud parameetritele.

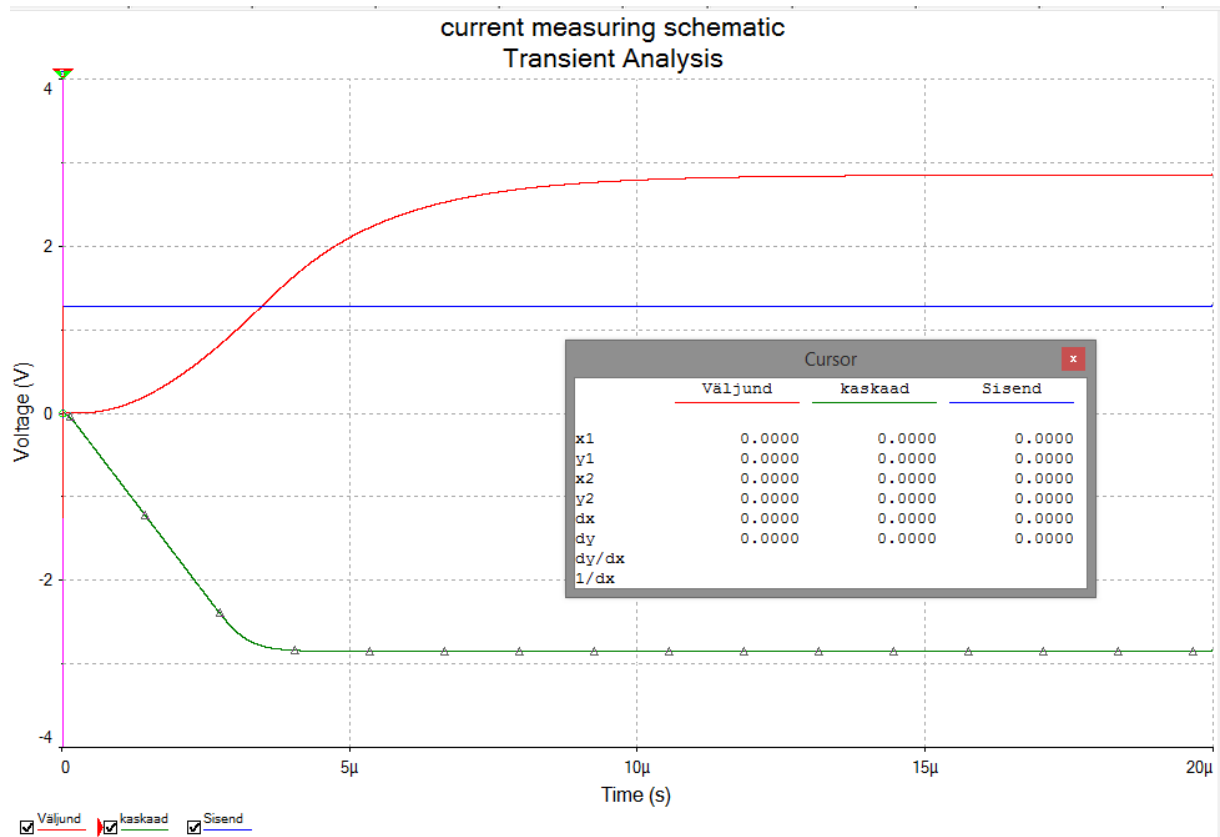
Referents pinge nivoo antakse ette pingejaguriga, järgmises lähenduses on selle jaoks eraldiseisev täpne regulaator.

Simulatsioonide läbiviimisel kasutatakse OPA4277UA mudelit, mis on OP-177 edasiarendus. OPA4277UA on mitmete heade omadustega— lai toitepinge vahemik, hea mürakindlus, madal temperatuuri nihe ja madal nihkepinge. Multisim programmis on OPA4277UA SPICE mudel

olemas. Simulatsioonid on tehtud erinevatel sisendvooludel, ilmestamaks voolu muutust. Läbi viidi 3 simulatsiooni:

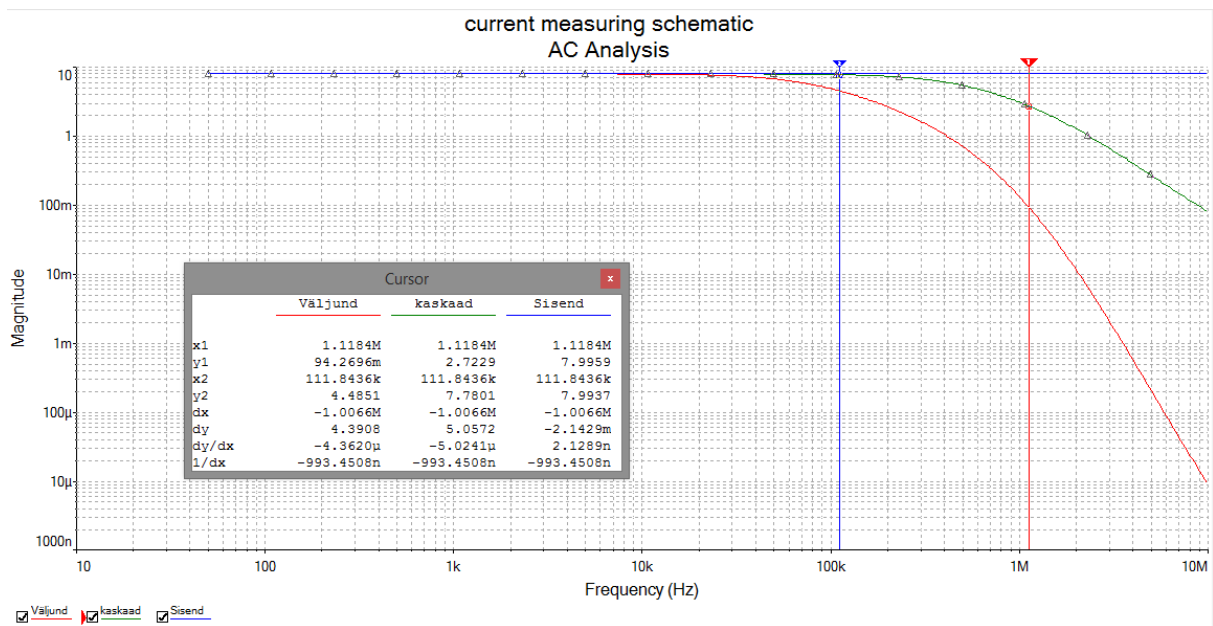
1. ühikimpulssiga simulatsioon;
2. sageduskarakteristikute hindamise simulatsioon;
3. normaalolukorrale vastav simulatsioon.

Kõik kolm simulatsiooni andsid arvutuskäigus saadud tulemustega samased väärtused. Simulatsioonigraafikud on esitatud järgmistel joonistel 2.14, 2.15, 2.16 ja 2.17.

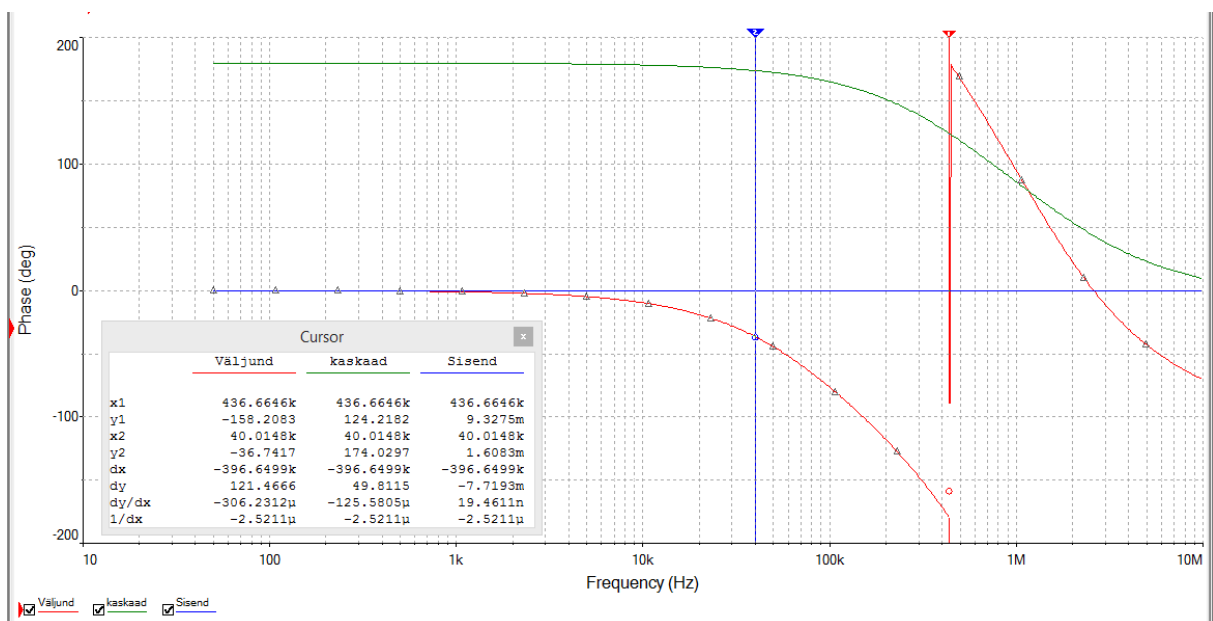


Joonis 2.14. Ühikimpulssiga simulatsiooni tulemus

Joonisel 2.14. on näha, et ühikimpulssiga simulatsioon ei toonud kõrvalekaldeid ideaalolukorrale. Samuti ei esinenud liigpinge sähvatusi ega pikema ajalisi ülepinget.

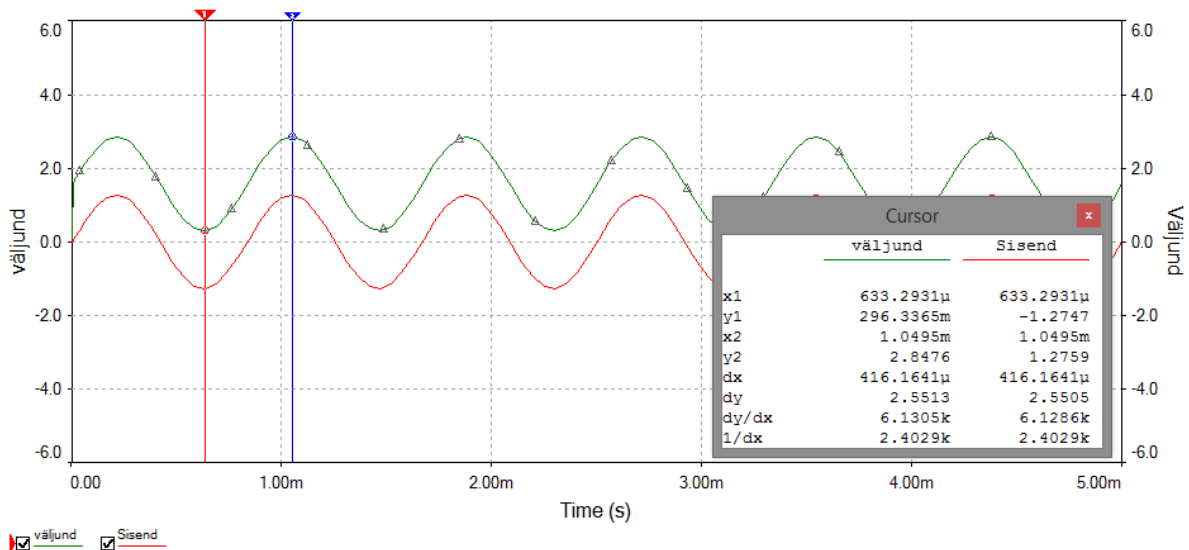


Joonis 2.15. Võimendusteguri sõltuvus sagedusest.



Joonis 2.16. Faasinurga sõltuvus sagedusest

Jooniselt 2.15 on näha et võimendusteguri sõltuvus sagedusest on stabiilne ja ettearvav. Simulatsioonid kinnitavad, et arvutuslik lõikesagedus 72KHz kattub simuleeritava lõikesagedusega. Joonis 2.16 karakteristik on ettearvatav ja käitub nagu teooria ette näeb.



Joonis 2.17. Simulatsiooni tulemused normaaltingimustel

Joonis 2.17 näitab normaaltingimustel läbiviidud simulatsiooni, mis näitab kõrvalekallete puudumist.

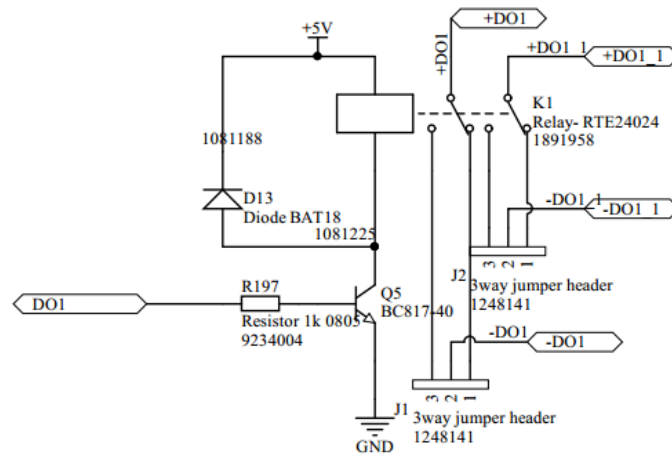
2.5 Digitaalväljundid

Digitaalväljundid on kasutusel tegemaks lülitusi, mida on vaja mootori kontrolleri funktsionaalseks talitluseks. Üks põhifunktsioon on kontaktori lülitamine ja tühjenemis- ning laadimisahela juhtimine. Peamised probleemid, mis kontaktori lülitamisel tekivad, on:

- toiteahela suur vooluimpulss, mis muudab toiteahela ebastabiilseks;
- lülituse hetkel tekkiv impulss, mis tekitab momentaalselt suure müraimpulsi.

Nende probleemide vältimiseks kasutatakse kontaktorite lülitamisel abireleesid, mis on valitud vastava koormusvoolule ja õigele kontaktipingele. Releedeks on valitud topeltkontaktidega releed, millel on vastavalt ühendusviisile võimalus lülitusahel muuta NO või NC tüübiks. Trükkplaadile jääb võimalus manuaalselt relee väljundkarakteristikut konfigurereida. See annab kasutajale võimaluse vajadusel ühendusloogikat muuta. Joonis 2.18 näitab, kuidas on skeemilahendus ellu viidud. Kasutatakse tavalist NPN transistorit (Q5) ja takistit (R197), mis tekitavad võimendatud lülituse. Diod (D13) on mõeldud transistori (Q5) kaitselemendina. See summutab mähises tekkiva liigpinge impulsi ja seeläbi kaitseb transistorit (Q5). Relee lülitusahelad on galvaaniliselt eraldatud muudest ahelatest. Takisti suurus on valitud selline, et

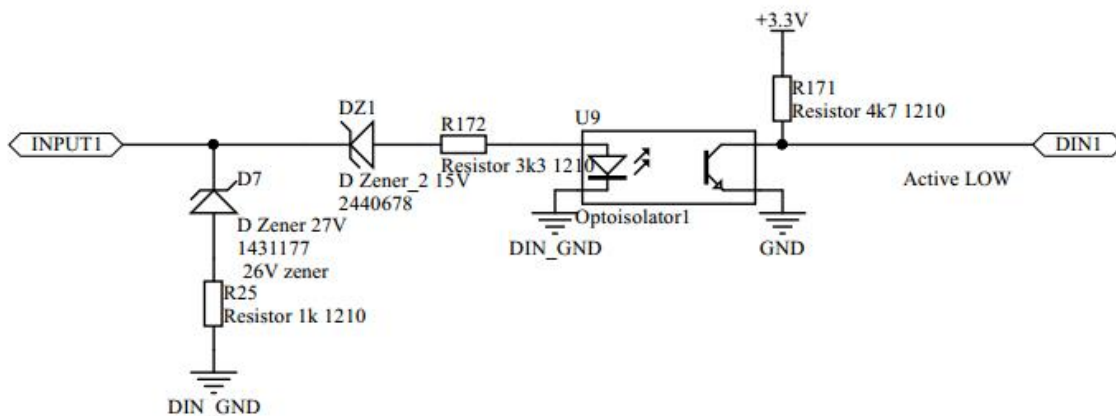
vooluvõimendus oleks piisav, et lülitada releed. Mähisetakistus sellel relee mudelil on 62Ω , mis 5V toitepinge juures annab 80mA mähisevoolu. Transistori BC817 andmelehe järgi annab 3mA baasivool voolutugevuse 0.4A, mis on viis korda suurem kui pidev mähise vool.



Joonis 2.18. Digitaalväljundi skeem

2.6 Digitaalsisendid

Digitaalsisendeid kasutatakse erinevate lisaseadmete olekute hindamiseks või tagasiside saamiseks kaitseahelatest. Näiteks lülitusimpulss süüteluku sarnasest mehhanismist. Samuti on see kasulik turvaahelate kasutusele võtmise poolest. Nendega saab ilma mikrokontrollereid kasutamata luua läbi loogikalülituste kaitsemeetmeid, mis jõuahela vea tõttu keelavad kontrolleri käivitamise. See on eriti vajalik kõrgepingeliste jõuahelate juhtimise olukorras. Joonis 2.19 näitab digitaalsisendi ahelat. Zeneri diod (D7) on mõeldud kaitsmiseks ülepinge eest. Diod (DZ1) ja takisti (R172) on optoisolaatori detektori lülitamiseks vajalikud lisakomponendid, et lülitusi oleks võimalik teha 24V lülituspingega. Isolatsioon on lisatud põhiliselt selleks, et eraldada kaks vooluahelat isegi siis, kui nende maapotentiaalid on samal tasemel. Joonis 2.19 näitab digitaalsisendi lõplikku skeemilahendust.



Joonis 2.19. Digitaalsisendi ahel

2.7 Mikrokontrolleri lisaahelad

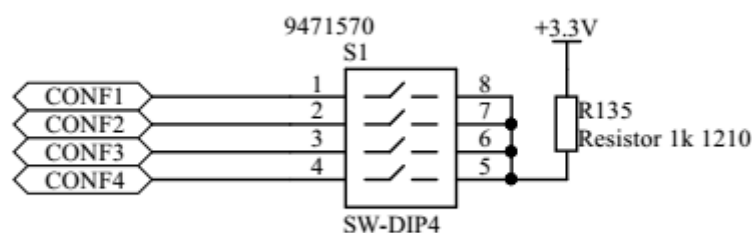
See alapeatükk käsitleb toiteahelaid, LED ahelaid ja konfiguratsioonilüliti ahelaid. LED ahelad on otse ühendatud mikrokontrolleri viigu külge. Vastavalt toitepingele 3.3V on valitud õige takisti väärtus vältimaks viigu hävinemist. Kokku on 8 LED-i mis kasutatakse programmeerimisel kiire tagasiside saamiseks. Viikude väheseks koormamiseks tuleb kasutada suurt takistust.

Leiame minimaalse takistuse väärtuse,

$$R = \frac{U - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{3.3V - 2.5V}{1mA} = 800\Omega. \quad 2.11.$$

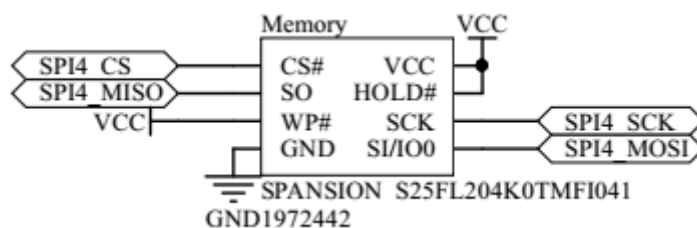
Arvutustulemusest on näha, et 1mA voolu jaoks peab takistus olema vähemalt 800Ω. Antud lahenduse jaoks on seega sobilik 1000Ω takisti, kuna sama nominaalväärtusega takistit kasutatakse ka mujal ahelates. U_{LED} ja I_{LED} on võetud toote 150080BS75000 andmelehel.

Konfiguratsioonilülidid hõlbustavad testimisel kiirelt parameetrite vahetamist. Vastavalt lülitite positsioonile on võimalik nende alla panna parameetrid ning olekusätteid. Praeguses olukorras kasutatakse nelja positsioonilist läbiaukmontaažiga lülitimaatriksit. See tagab 4-bitise andmekanali, mis annab konfiguratsioonivõimaluseks 16 erinevat väärtust. Joonis 2.20 näitab, kuidas ühendatakse konfiguratsiooni lüliti mikrokontrolleriga. Selline lahendus on standardne. Komponentide kokkuhoidmiseks kasutatakse ühte ainsat toitepotentsiaalile töstmise takistit.



Joonis 2.20. Konfiguratsioon lüliti

Mikrokontrolleril on sisemine 2MB *flash* mälu. SPI siinile ühilduva mälu eesmärgiks on mitteajakriitilise andmemassiivi hoiustamine ja salvestamine. See annab võimaluse tühendada mikrokontrolleri põhimälu ja salvestada logisid mällu kui SD kaarti ei ole või SD kaart on korrumpeerunud. Mällu saab salvestada ka põhiinformatsiooni nagu näiteks seerianumbri ja veakoodid. Joonis 2.21 annab ülevaate, kuidas ühendatakse lisamälu SPI siini külge. Toitepotentsiaalile tõstmise taksiteid pole vaja kasutada. Samuti kasutatakse kiiret SPI siini, mis mikrokontrolleri andmelehe kohaselt on kuni 45Mbit/s[13]. Lisaks on võimalus kasutada DMA kontrollerit, et vähendada koormust mikrokontrolleri tuumale.



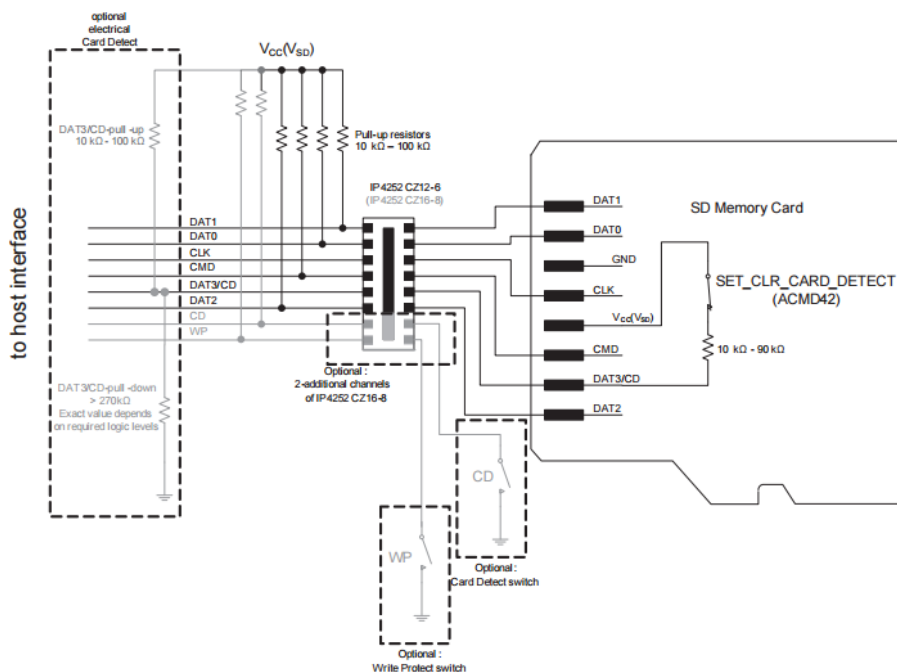
Joonis 2.21. SPI mälu siin

2.8 SD-kaart

SD-kaarti kasutatakse logifailide hoiustamiseks, see funktsionaalsus on hea testimiseks ja arendustsükli ajal.

Mikrokontrolleril on standardne SDIO liides, mis on standardiseeritud liides SD-kaardiga suhtlemiseks. Antud lahenduses kasutatakse kiireimat 4-biti laiust süsteemi, mis tagab suure andmevahetuskiiruse. SD-kaardi autoriseerimine on lahendatud SD-kaardi standardi kohaselt DAT3 viigu abil, mis on toitiesse tõstetud mikrokontrolleri enda poolt. Mikrokontrolleri andmelehe järgi on võimalus otse ühenduda SD-kaardi liidese külge, millel on riistvaraline tugi SD-kaardiga suhtlemiseks. Riistvaraline maksimaalne andmeedastus on 48MHz, mis on SD-mälu kaardi standardi versioonile 2.0 vastav. NXP rakendusjuhise annab hea ülevaate, kuidas koostada ahel SD-kaardiga suhtlemiseks. Peaasjalikult koosneb see kolmest elemendist: [2]

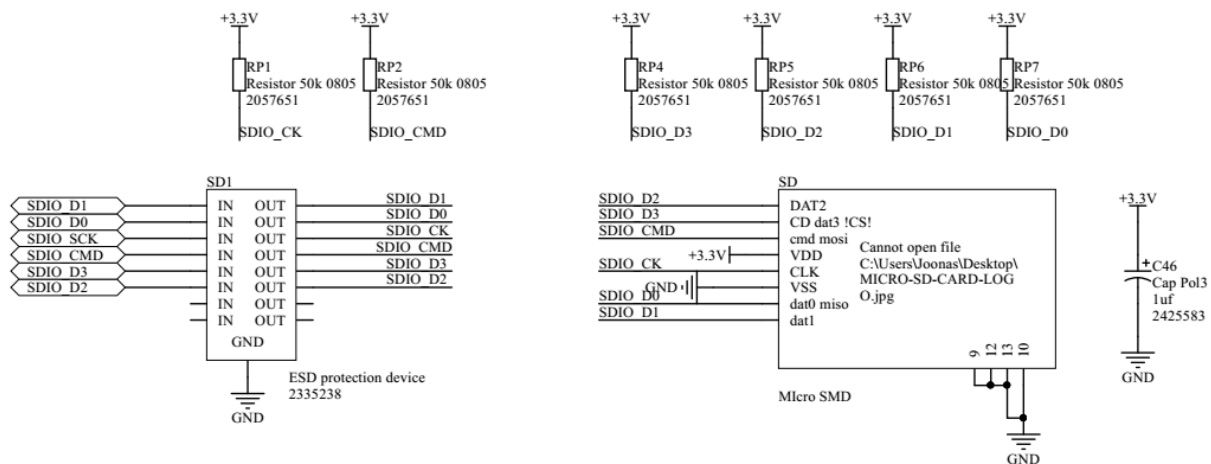
- ESD kaitse kiip;
- SD-kaardi pesa;
- toite potentsiaalile tõmbavad takistid.



Joonis 2.22. NXP soovitatav ahel [2]

Joonis 2.22 annab skemaatilise ülevaate, kuidas tüüpiliselt ühendatakse SD-kaart mikrokontrolleriga. Praegusel juhul kasutatakse analoogset lahendust.

Joonis 2.23 näitab NXP rakendusjuhise kohaselt arendatud skeemilahenduse lõpptulemust.



Joonis 2.23. SD- kaardi ahel vastavalt standardile

2.9 Resolveri ja enkooderi liides

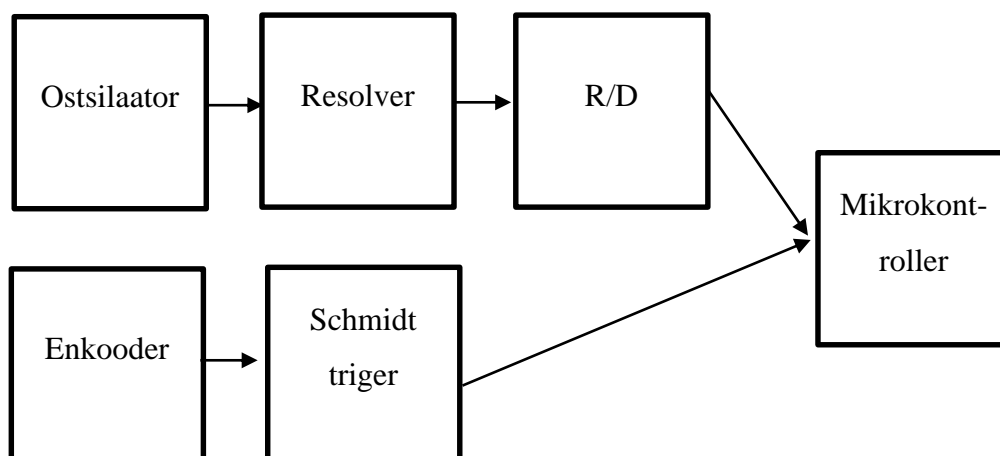
Mootori lihtsamaks ja edukaks juhimiseks on vaja teada mootori magnetvälja asukohta, mida mõõdetakse mootori võllilt. Mootori tootja paneb enkooderi või resolveri külge ja siis annab selle koos parandusteguriga kliendile. Seda on vaja, et vältida jõnksuga startimist ja nõksatustega pidurdamist. Kahe fundamentaalselt erineva mõõtemetodiga suudetakse eelmainitud olukordi välistada. Üks on järjest mõõtmine ja teine on absoluutne mõõtmine. Mõlemal on omad plussid ja miinused. Resolver on vanem, konstruktsiooniliselt lihtsam ja töökindlam, ahvatleb suurt töökindlust nõudvaid tööstuseharusid ja kasutab absoluutse mõõtmise põhimõtet. Peamised valdkonnad, kus resolverit kasutatakse on PMSM mootorite juhtimine ja lennukitööstus. Enkooder täidab sama funktsiooni, kuid enkooder ei suuda enne üht täisringi anda positsiooni absoluutset informatsiooni. Enkooder kasutab jadamisi mõõtmise meetodit. Füüsiliselt on resolver kolmemähiseline andur, mille ühte mähist ergastades kandub signaal faasinihkega teistesse mähistesse. Enkooder on pöörlev ketas, mille detektorid väljastavad digitaalseid ühiksignaale.

Tabel 1.5 näitab, kuidas erinevad omavahel funktsionaalses mõttes resolver ja enkooder.

Tabel 1.2. Resolveri ja enkooderi erinevused [3]

Atribuut	Resolver	Enkooder
Nurga mõõtmine	Absoluutne	Absoluutne või suurenev
Resolutsioon	Kuni 16 bit-i	Kuni 13 bit-i
Täpsus, kraadides	4“ kuni 40“	0.25“ kuni 6“
Ühenduvusliides	Resolver digitaal konverter	Loendur
Müratundlikus	Suur	Väike
Väljundsignaal	Analoog	Analoog või digitaal
Ehitus	Robustne	Habras
Inerts	Suur	Madal
Eluiga	Väga pikk	Pikk
Vibratsioonitaluvus	Suurepärane	Keskmine
Töötemperatuur	+150 °C	+100 °C
Mustus	Immuunne	Tundlik
Kasutuslihtsus	Keeruline	Lihne
Vahetus	Limiteeritud	Lai
Hind	Kõrge	Madal

Joonis 2.24 annab ülevaate vajaliku ahela põhimõtteskeemist. Lahendus saavutatakse eraldiseisvate kiipidega, mis on välja arendatud resolveri ja mikrokontrolleri liidestamiseks. Analog Devices on loonud selle jaoks eraldiseisva kiibi, lühendatult R/D (Resolver to Digital), AS2S90. See kiip vajab töötamiseks ostsillaatorit. Selle jaoks on kõrvale soovitatud teist Analog Devices-i kiipi, AS2S99, mis on programmeeritav ostsillaator.



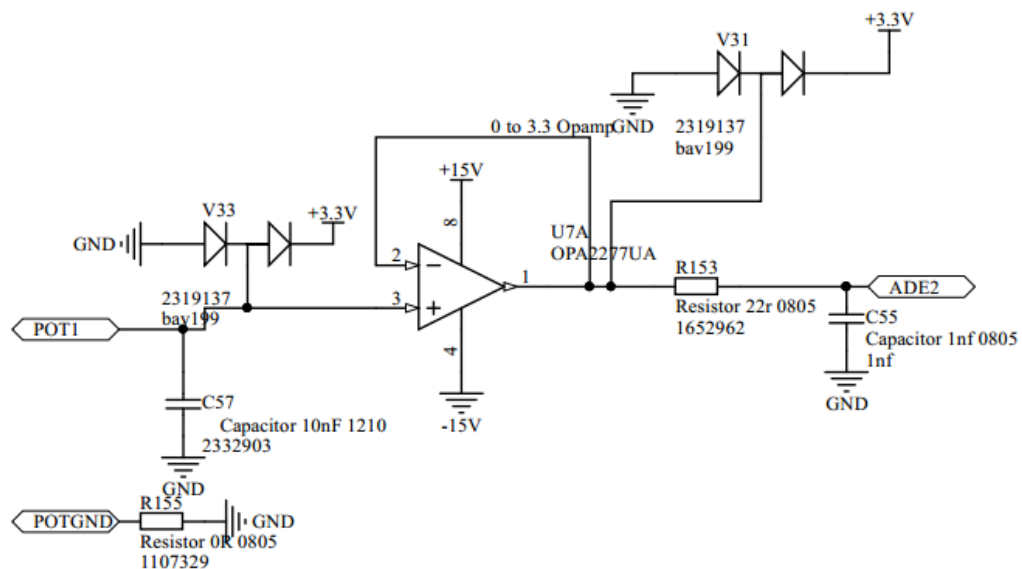
Joonis 2.24. Mootori magnetvälja positsioneerimise ahela põhimõtteskeem

Neid kiipe koos kasutades on võimalik teha resolveri jaoks vajalik ühendusskeem. Skemaatiline lahendus on võetud Analog Devicesi rakendusjuhiseist. Lisaks tehakse ahelasse võimalus ühendada enkooder. Selle jaoks kasutatakse Schmidt-i trigereid, mis tuvastavad ka mürarikkas keskkonnas signaalipulsid. Resolveri ahel on võimeline suhtlema mikrokontrolleriga nii üle *serial* ühenduse kui ka autentse enkooderi väljundi abil. Enkooderi väljundi puuduseks on sama puudus, mis on enkooderil endal— kaduma läheb absoluutne positsiooniinfo, mis on resolveri ahelal alati olemas.

Tüüpilised enkooder ahelad on 5V toitega. Kuna praegune süsteem on 3.3V loogikanivool, on toitepinge probleemi lahendamiseks lisatud igasse signaaliahelasse enne trigereid pingejagurid, et vähendada pinget 5V-lt 3.3V-le. Joonis asub Lisa 2 alampeatükis.

2.10 Potentsiomeetri sisend

Potentsiomeetri sisend on referents sisendi jaoks. Selle sisendi järgi juhitakse mootori väljundparameetrit, olgu selleks kiirus või väändemoment. See ahel on vajalik testimise ja katsetusjärgus masina jaoks. Primaarne eesmärk on asendada gaasipedaali. Ahel on sarnane temperatuuri mõõtmise ahelaga ning on skemaatiliselt kujutatud joonisel 2.25. Ahelat kasutatakse mitteinverteerivas režiimis võimendusteguriga 1. Eesmärk on tekitada puhver mõõteobjekti ja mõõdetava süsteemi vahele.



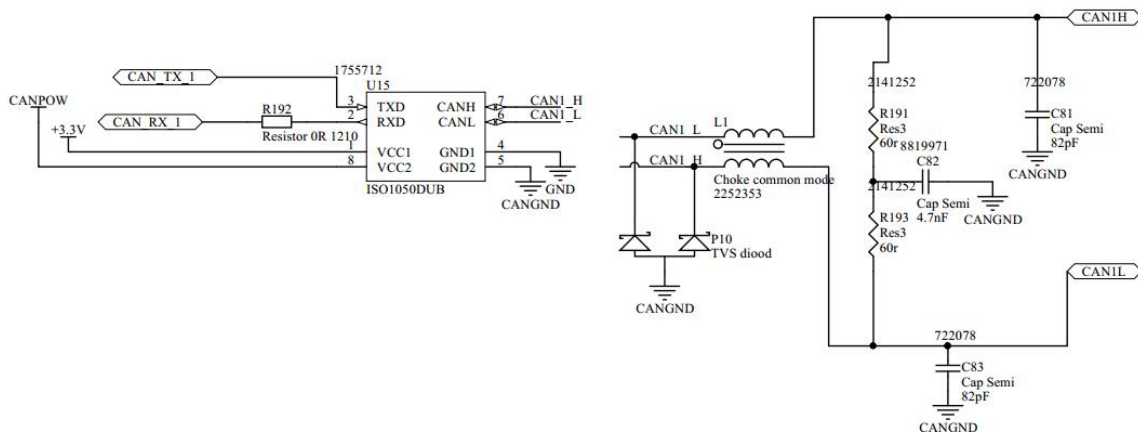
Joonis 2.25. Potentsiomeetri ahelad

2.11 CANbus

Kontrollerile on ette nähtud kaks CAN-busi ahelat. CAN on lühend sõnas *Controller Area Network*, mis on autotööstuse initsiatiivil välja arendatud suhtlusprotokoll. Parimateks omadusteks on diferentsiaal signaali kanalid, mis tagavad kõrge müra immuunsuse. Järgnev loetelu annab edasi CANbus-i omadused: [4]

- adresseeritud objektid;
- paralleel ühendus;
- odav hind;
- 4 juhet;
- kiirus kuni 1Mbit/s.

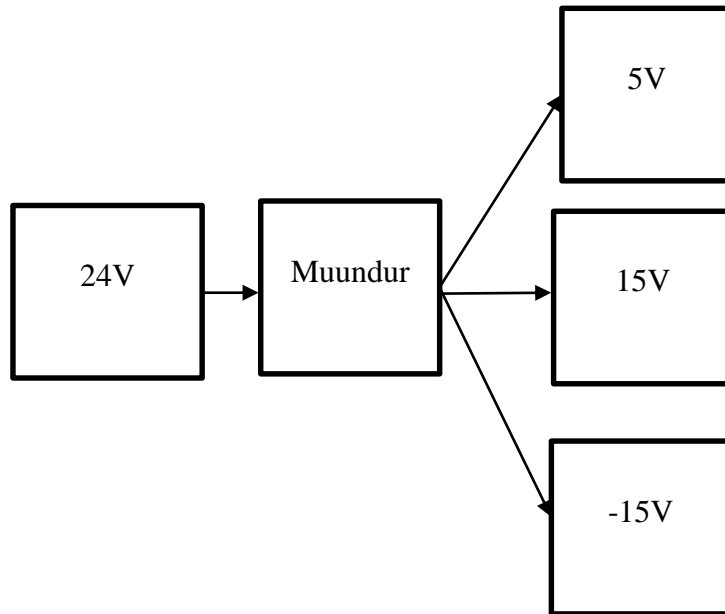
Kõik need on ühed peamised omadused, miks autotööstus kasutab CAN protokollit auto siseseks suhtluseks. Kasutusel on standardahel, mis on saadud Texas Instrumenti rakendusjuhitest[5]. Lahenduse eesmärk on häirete väljafiltreerimine andmeside siinilt. Joonis 2.26 näitab CAN transiiveri skeemilahendust.



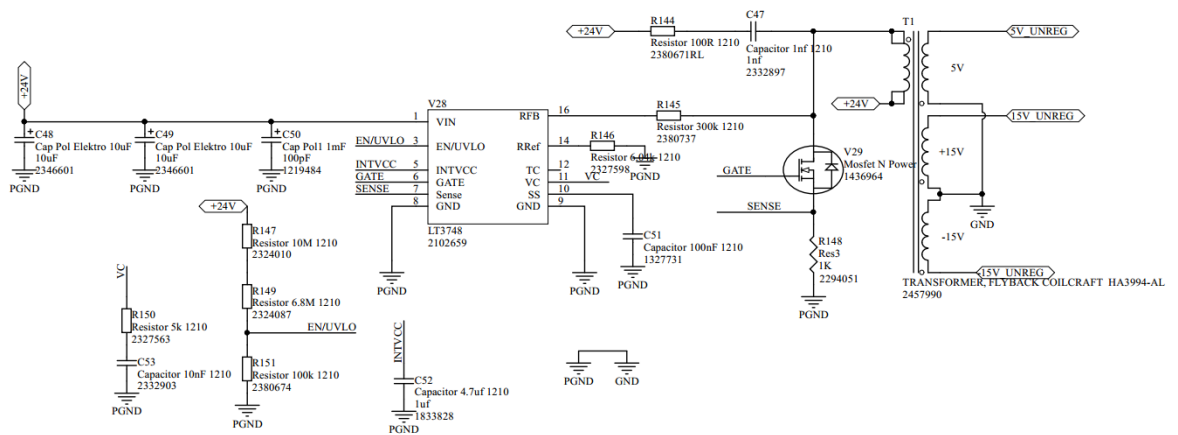
Joonis 2.26. CAN transiiveri ahel [5]

2.12 Toiteahelad

Toitesüsteemiks on kasutusel standardne Linear Technologies ahel, mida Linear Technologies soovib kasutada. Seda ahelat kasutatakse muutmata kujul. Mitme pingelise süsteemi keskmeks on kiip LT3748, mis suudab töödada ilma sekundaarmähise tagasisidestuseta. [6]

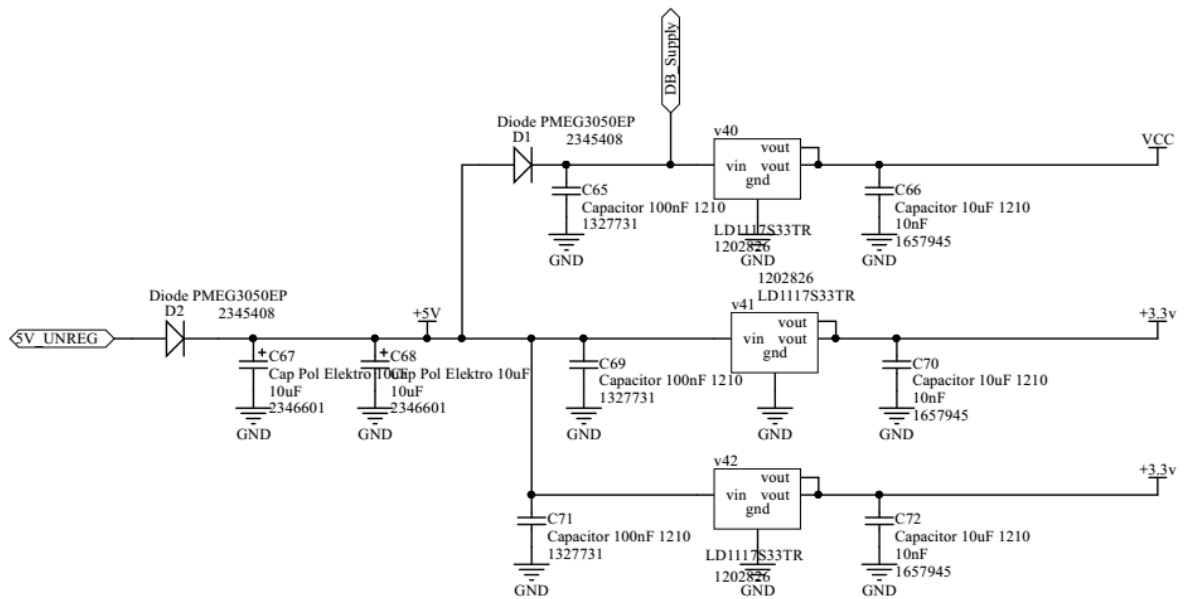


Joonis 2.27. Toiteskeem



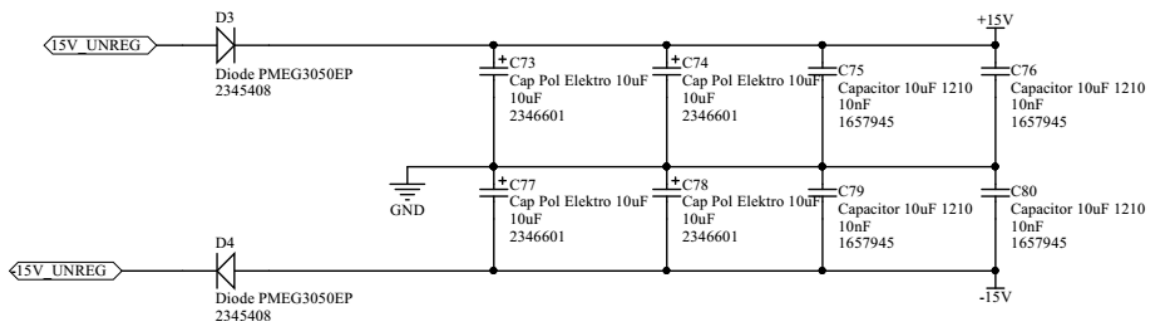
Joonis 2.28. Toitemuunduri kiibi poolsed ahelad

Joonis 2.27 seletab üldiselt lahti kuidas toitesüsteemi topoloogiline lahenduse. Joonis 2.28 näitab skemaatilist toiteahela lahendust tootja poolt trafo primaarahela kohta.

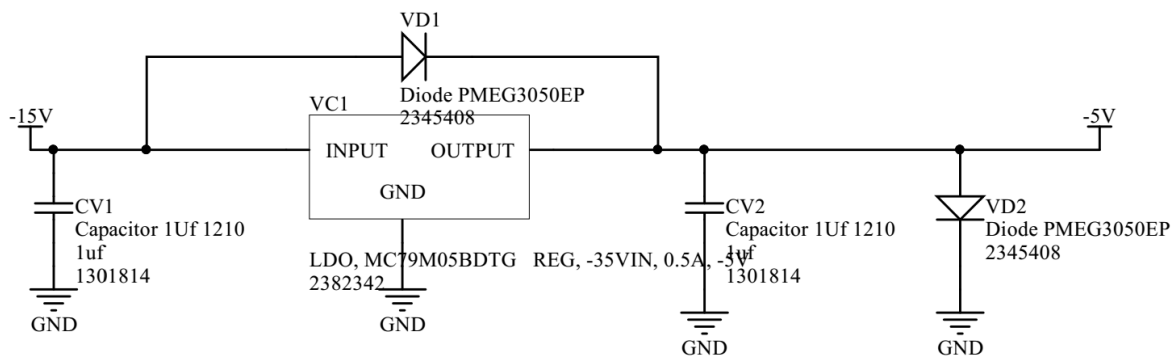


Joonis 2.29. 5V aldamine ja 3.3V toite tekitamine

Joonis 2.29 annab ülevaate kuidas luuakse toitepinged mikrokontrollerile ja 3,3V tarbijatele. 5V ahelast toidetakse resolveri ahelat ja mikrokontrolleri ahelaid ja ka muid elektroonika komponente. Joonis 2.30 näitab 15V ja -15V ahelate tööpõhimõtet. Ahelad on tarvilikud vooluandurite ja pinge mõõtmise jaoks. Alalduslüli on koostatud andmelehe soovitude järgi.[6]



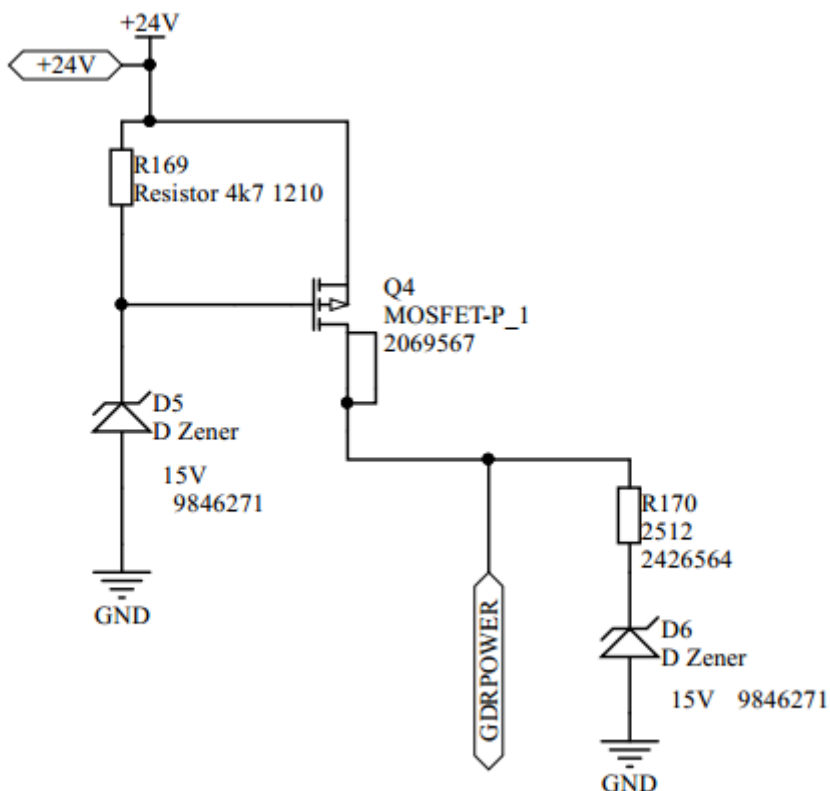
Joonis 2.30. +15V ja -15V aldamine.



Joonis 2.31. -5V toitepinge genereerimine

Joonis 2.31 näitab -5V abipingeloomise ahelat. Ahel teeb -15V pingest ühe LDO-ga -5V pinge. LDO kondensaatori parameetrid on andmelehe soovituslikud parameetrid.

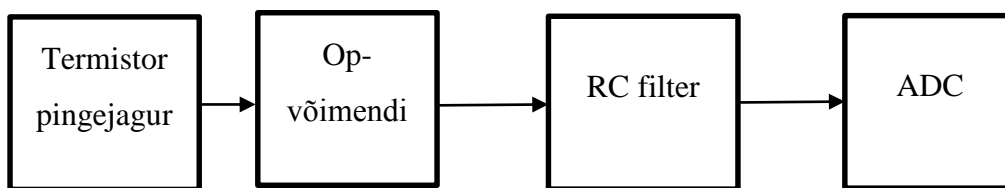
Joonis 2.32 näitab jõutransistoride toiteahela viitlülitus ahelat. Ahel tuvastab sisendpinge ja rakendub, kui toide on jõudnud kuni 15V nivooni. Toitekiivid jõuahelates on alapinge detektoriga, mis aitavad välistada järsku lülitusimpulsi tekkevõimalust.



Joonis 2.32. Jõutransistoride toiteahela viitlülitus ahel.

2.13 Temperatuuri sisendid

Saamaks teada mootori koormatuse astet või ülekoormamise võimalust mootori juhtimise ajal, on vaja teada mootori temperatuuri. Primaarseks võimsust piiravaks faktoriks on jõutransistoride temperatuur. Selle jaoks on kasutusel operatsioonivõimendiga ahelad. Peamiselt käitub operatsioonivõimendi selles ahelas puhvrina. Seda on vaja täpse temperatuuri mõõtmise jaoks. Mõõtmiseks kasutatakse positiivse temperatuuri koefitsiendiga takisteid, need on takistid, mille väärtus sõltub ümbritseva keskkonna temperatuurist. Positiivne koefitsient tähendab, et takistus suureneb koos temperatuuriga.



Joonis 2.33. Temperatuuri mõõtmise ahela plokk skeem

Enstroj Emrax mootor varustatakse KTY81/210 seeria temperatuurianduriga, mis on positiivse koefitsiendiga takisti. Temperatuuride mõõtmiseks kasutatakse sama põhimõttel ja sarnase nominaalväärtusega töötavaid temperatuuri andureid. KTY81/210 nominaaltakistus on 25°C juures 1960Ω kuni 2000Ω. Seda arvestades võetakse anduriks LT7330002K0JTG, mis on TE Connectivity poolt müüdav temperatuuriandur. Joonis 2.34 näitab temperatuuri mõõtmise ahelat. Ainus temperatuuri ahel, mis on muudetud, on IGBT temperatuuri mõõtev ahel. Sellel on negatiivse koefitsiendiga temperatuuriandur ning selle tarbeks on sinna lisatud pingejagur, mis toob pinge 5V tasemelt 3.3V tasemele. Seetõttu on eelnimetatud ahelas teistsugused ülekandetegurid, kuna reaalselt on pingejaguri alumine takistus madalam kui nominaalis olev 10kΩ takisti. NTC takisti Infineon jõutransistorites on tabelis 2.6. kirjeldatud parameetritega.

Tabel 2.3. NTC takisti parameetrid [7]

Atribuut	Suurus
Takistus 25°C juures	5000Ω
Takistus 100°C juures	493 Ω
B25/50 väärtus	3375K

Sarnase joone hoidmiseks lisatakse IGBT temperatuuri mõõtmise ahelasse üks pingejagur lisaks. Jaguri vajalikkus tuleneb mõõteanduri funktsionaalsest erinevusest. Temperatuuriandurid on PTC takistil baseeruvad ja IGBT andur on NTC takistil baseeruv lahendus.

Ohmi seaduse alusel leiame summaarse pingejaguri impedantsi,

$$\frac{1}{R2} = \frac{1}{20000} + \frac{1}{10000}, \quad 2.12.$$

$$R2 = 6666\Omega. \quad 2.13.$$

R2 takistus näitab, kui suur on pingejaguri alumine takistus. Leiame valemiga 2.14. pinget, mis tuleb pingejaguri väljundist operatsioonivõimendisse,

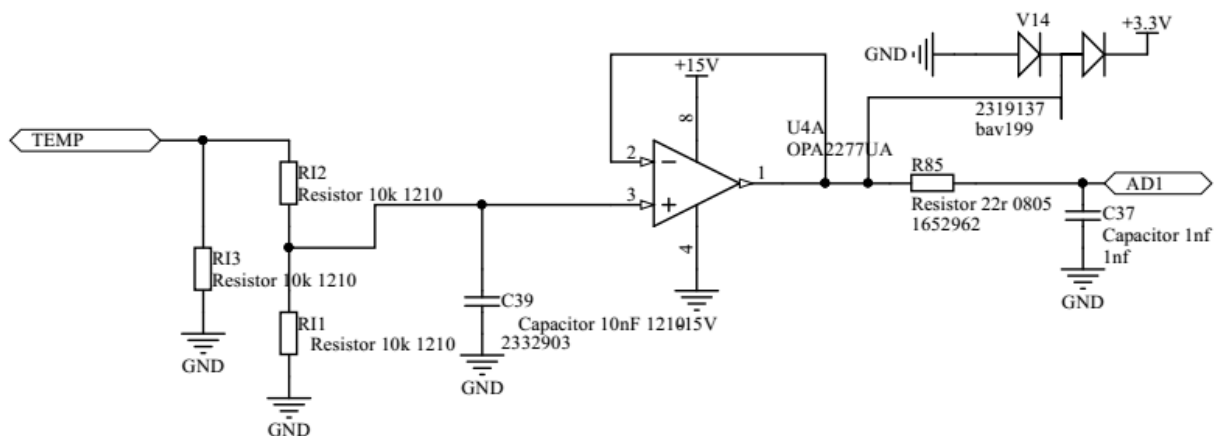
$$V_{out} = \frac{10000\Omega * 5V}{R1 + 10000\Omega}. \quad 2.14.$$

Vastavalt IGBT NTC takisti väärtustele leiame jagurist väljuva maksimaalse ja minimaalse pinget,

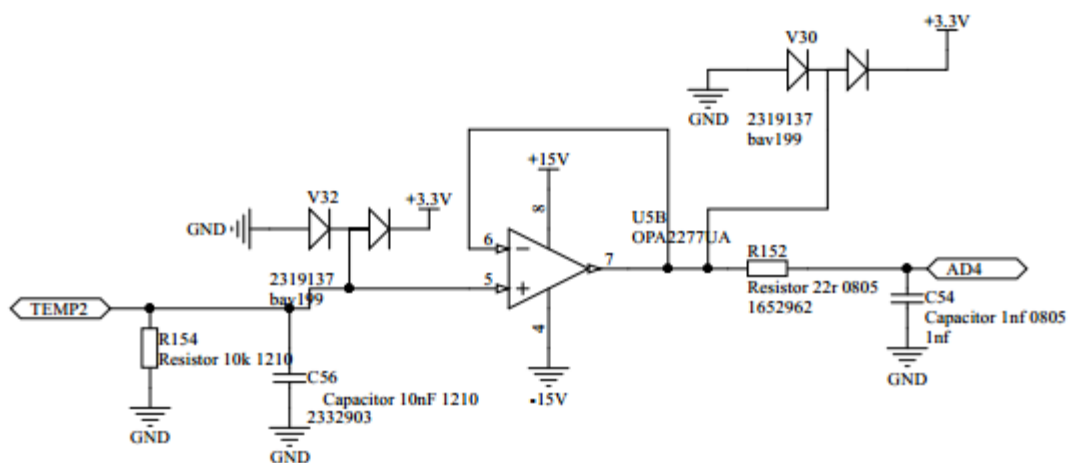
$$V_{out1} = 1.3V, \quad 2.15.$$

$$V_{out2} = 2.5V. \quad 2.16.$$

Operatsioonivõimendi on pinget jälgimise asetus, see tähendab, et väljund on alati 1,3V ja 2,5V vahel. Joonis 2.34 näitab IGBT temperatuuri mõõtmise lõpliku lahendust ja joonis 2.35 näitab tavalise temperatuuri mõõtmise ahela lahendust.



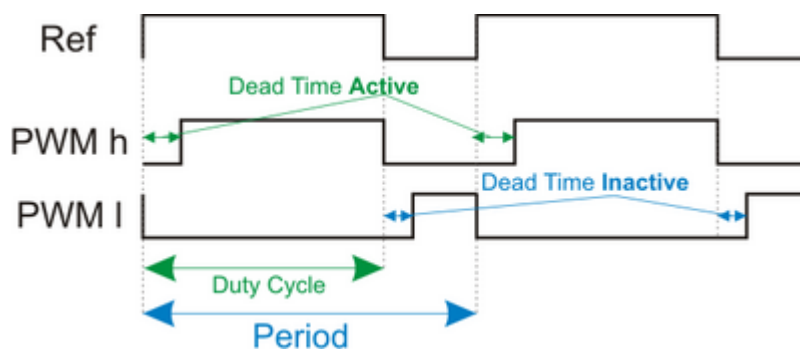
Joonis 2.34. IGBT Temperatuuri mõõtmise ahel



Joonis 2.35. Tavaline temperatuuri mõõteahel

2.14 IGBT tagasiside ja tüürsignaalid

IGBT jõutransistore juhitakse pulsilaiusmodulatsiooni kasutades. Mikrokontrolleri väljundid on ühendatud puhvrise, mida saab sisse ja välja lülitada. Puhvri eesmärk on tüürahela veasignaali korral koheselt välja lülitada jõuahelate signaal. Signaalid genereeritakse iga faasi jaoks 120kraadise faasinihkega. Lisaks on poolsilla jaoks signaalid sellised, mis välistavad lühise tekke. Jõuahelate juhtimisele omaselt on riistvaraliselt lahendatud ka nn „surnud tsoon“ genereerimine. „Surnud tsoon“ märgib süsteemis hetke, kus kõik transistorid on välja lülitatud või oodatakse seda olukorda, kuniks kõik on transistorid on mittejuhtivas olekus. Kirjeldatud olukorda illustreerib joonis 2.36. Üldahela põhimõtet annab edasi joonis 2.37.

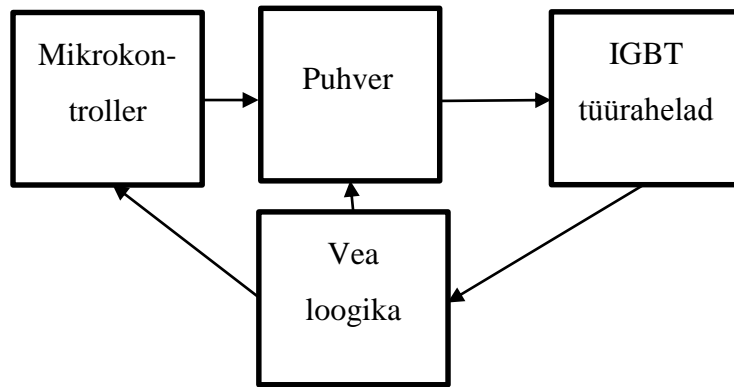


Joonis 2.36. Näidis PWM signaal[8]

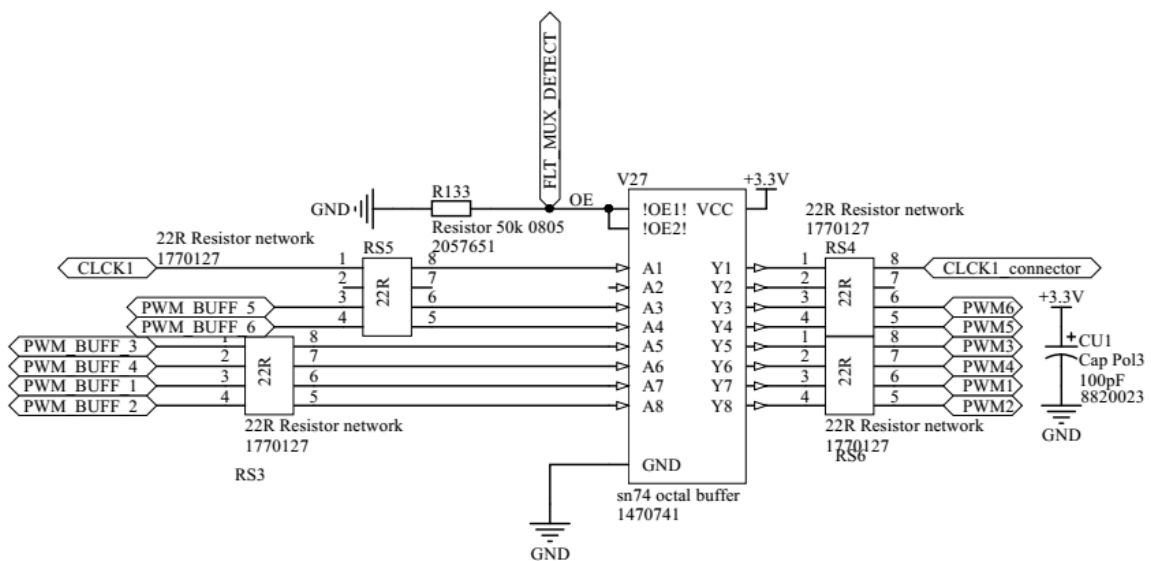
Praeguse ahela põhiidee on lisada väline signaali välja lülitamise loogika, mis peataks lülitussignaale vea olukorral. Vea olukord tekib kui IGBT transistor läheb ülekuullastusse, lülitusahelas tekib viga või lülitust ei tuvastata. Vea tuvastamine ja identifitseerimine vastavale jõutransistoridele on saavutatud loogikalülituste abil. Joonis 2.38 ja joonis 2.39 Joonis 2.39. Veakontrolli loogika näitavad kuidas on disainitud skeemis lahendus. Tabel 2.7 näitab signaali loogika muutumise nivoosid.

Tabel 2.4. Loogika tabel

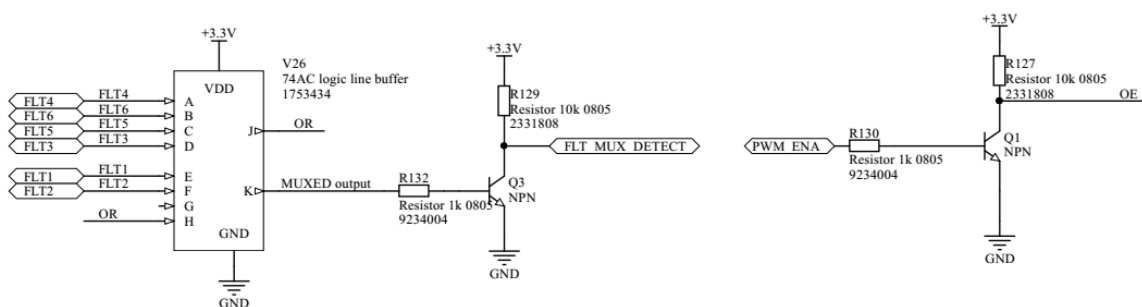
Signaal	Q3	\overline{OE}
1	0	1
0	1	0



Joonis 2.37. IGBT signaalide genereerimise põhimõtteskeem



Joonis 2.38. Puhver



Joonis 2.39. Veakontrolli loogika

Tagasiside signaalid on sidestatud mikrokontrolleriga. Iga IGBT kohta on üks signaal, mis teavitab süsteemile vea olemasolu.

2.15 Programmeerimise ahelad

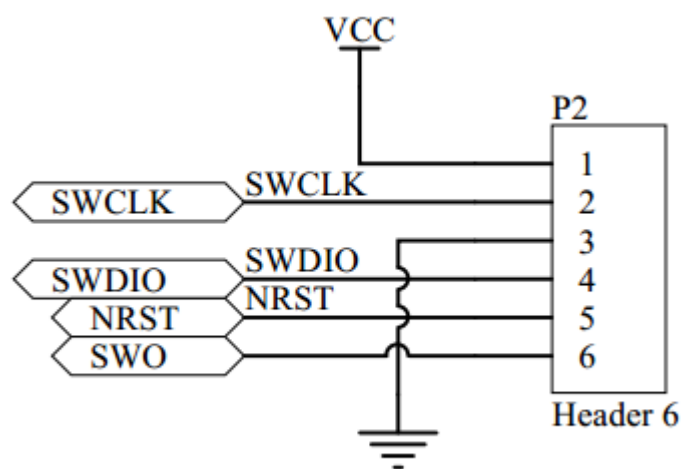
Mikrokontrollerit on võimalik programmeerida üle mitme eri ahela. Praegusel disaini puhul on alles jäetud mitmeid alternatiive, kuidas seda teha. Antud disainlahenduse puhul on võimalik kasutada järgmisi programmeerimise andmesidekanaleid:

- JTAG;
- SWD;
- USART.

Kõik kolm loetletud ahelat on standardsed ja vajavad konfiguratsiooni sättemiseks ainult mõningaid takisteid, mis on märgitud kas mikrokontrolleri või programmeerija andmelehel. Järgnevalt on analüüsitud iga andmesidekanali peamisi plusse ja miinuseid ning on välja toodud tüüpskeemi lahendus.

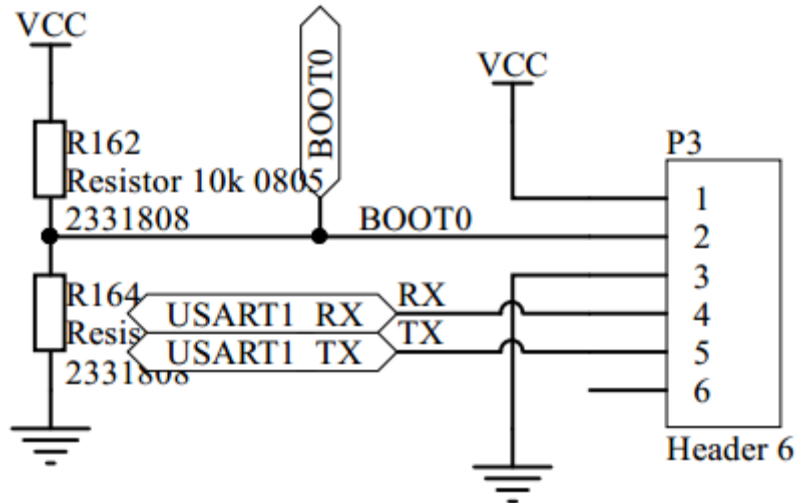
SWD on uute ARM mikrokontrollerite programmeerimisprotokoll. SWD baseerub JTAG standardil. Joonis 2.40 näitab SWD pistiku ühendus skeemi. SWD eelisteks on:

- 2 viigu vajadus funktsionaalsuse tagamiseks;
- lisaviigud suurendavad jälgimiskiirust.



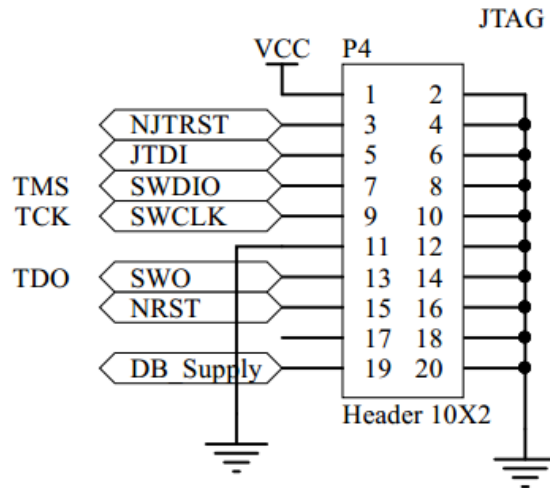
Joonis 2.40. SWD liides

USART protokoll kasutades on vaja konfigurida BOOT0 viik õigesse asendisse. Selle kirjeldus on antud STM32F439 andmelehes[13]. USART on mõeldud tagavara lahenduseks ning arenduse tööriistaks, et väljastada programmeerimistsükli ajal parameetreid tagasi arvutisse. Joonis 2.41 näitab USART-i ühendusskeemi.



Joonis 2.41. USART liides

JTAG pistik on võetud Segger J-link JTAG programmeatori manuaalist.[9] JTAG ühildub SWD liidesega. Sama programmeatorit ja selle pesa saab kasutada SWD ühendusega programmeerimiseks. Lisaks on selle programmeatori eeliseks suur toetavate platvormide valik. [9]. Joonis 2.41 kajastab JTAG liidese ühendusskeemi.



Joonis 2.42. JTAG liides

3. Trükkplaadi disain

Disaini aluseks on võetud IPC 2221[11] ja A-610[14] standardid ja tootjapoolsed näited andmelehtedest. Tähtsamad disaini punktid on ahelate kaupa lahti seletatud. Ahelad, mida käesolevas peatükis ei ole mainitud, ei oma eraldi märkimisväärset lisainformatsiooni ega eri nõudeid disainimisel.

Järgnevad loetelud toovad ahelatest välja olulisemad punktid, mida disaini juures arvestati.

Mikrokontrolleri disainimisel on jälgitud:

- lahtisidestus kondensaatorid võimalikult lähedale;
- eraldada digitaal- ja analoogahelad;
- hea maandus;
- hea toide.

Pinge mõõtmise ahelate disainimisel on oluline:

- suur isolatsiooni ala, kus pole vaske;
- asetada jaguris olevad takistid usjasse kontuuri, et hoida kokku ruumi;
- operatsioonivõimendid hästi maandada;
- kasutada ekraniseeringut.

Voolu mõõtmise ahelate koostamisel on jälgitud:

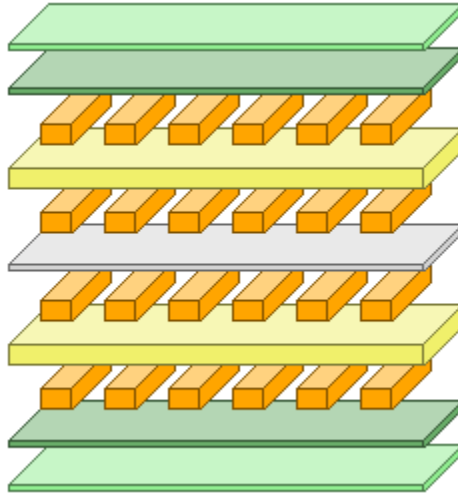
- signaali pingeks muundamise takistid asetada hästi maandatud alale;
- operatsioonivõimendid hästi maandada;
- kasutada ekraniseeringut.

3.1 Trükkplaadi ülesehitus

Lahendus disainitakse Brander OÜ PCB tootmisvõimaluste järgi. Tootjale on trükkplaadi valmistamise lihtsustamiseks kasutatud järgmisi võtteid:

- Kasutada vähe erinevaid augusuuruseid— odavam disain on järgida puuraukudel valemit $0,5\text{mm} + 0,1 \times x \text{ mm}$, kuna väiksemad puurid on kallimad ja 0,1mm sammuga puurid on odavamad ja rohkem levinud.
- Kasutada võimalikult palju suuri vasealaseid—lihtsustab tootjal kõrvalekallete võimaluse vähendamist tootmisprotsessis.

Trükkplaadi disaini tuleb alustada füüsilise ülesehituse parameetritest. Eesmärgiks on leida optimaalne lahendus eelseisvaks tööks. Altium Designeris on tööriist, mis aitab trükkplaati lihtsalt üles ehitada. *Layer stack manager* annab piltliku lahenduse trükkplaadi ülesehitusest, mida illustreerib joonis 3.1.



Joonis 3.1. Trükkplaadi ülesehitus visualiseerituna

Joonisel 3.1 esitatud trükkplaadi kihid on täpsustatud tabelis 3.1, mis annab edasi Brander PCB standardse 4-kihilise trükkplaadi ülesehituse. Disainitava trükkplaadi lahendus kasutab standardset ülesehitust, kuna disainis ei ole keerukaid ja spetsiifilisi nõudmisi.

Tabel 3.1. Trükkplaadi kvalitatiivsed suurused[11]

Kiht	Kihi nimetus	Tüüp	Kihi paksus (mm)
1	Välisfoolium	18 μ m + GalvCu 35 μ m	0.053
	Vahekiht	7628-45 (0,18mm)	0.180
2	Sisekihi foolium	35 μ m	0.035
	Sisekiht	High Tg 1,08mm 35 μ m/35 μ m	1.080
3	Sisekihi foolium	35 μ m	0.035
	Vahekiht	7628-45 (0,18mm)	0.180
4	Välisfoolium	18 μ m + GalvCu 35 μ m	0.053
		Lõpp paksus (mm)	1.616 \pm 10%

Läbiviikude standard suuruseks on võetud 0.5mm. IPC-2221 standardi kohaselt on sellise läbiviigu maksimaalne voolu suurus 2A, mis on hetke disaini jaoks piisav. See parameeter tagab optimaalse suuruse voolu läbilaske, hinna ja efektiivse pindala kasutuse suhtes.

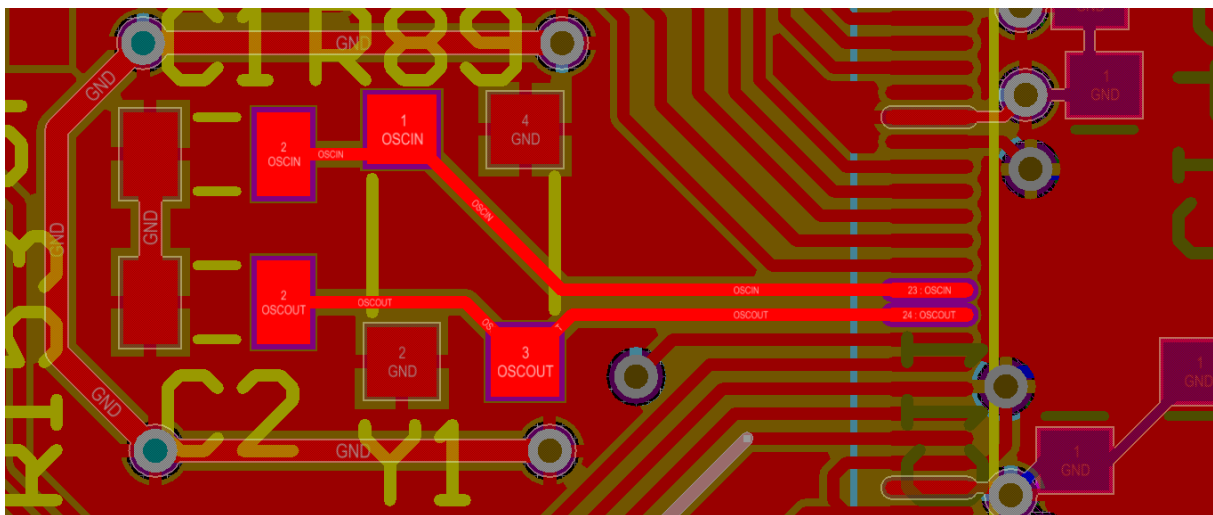
Peamised parameetrid, mida disainilahenduses kasutatakse, on esitatud tabelis 3.2.

Tabel 3.2. Tähtsamad disainiparameetrid

Parameeter	Suurus
Ava minimaalne suurus	0.5mm
Ava suuruse samm	0.1mm
Raja laius	0.254mm
Vahemaa radade vahel	0.15mm

3.2 Mikrokontrolleri ahelate disain

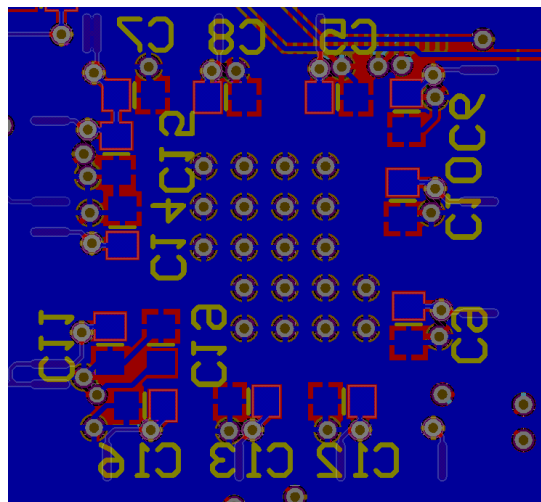
Mikrokontrolleri ahelate disaini puhul on lähtutud STMicroelectronicsi valmistoodetest Nucleo ja Discovery. Samuti on lähtutud ka Texas Instrumenti näitest [12], kus on ära seletatud kristalli ja lisakomponentide paigutus ning antud näpunäited radade vedamiseks. Joonis 3.2. illustreerib nendest reeglitest lähtunud kristalli ahela disaini.



Joonis 3.2. Kristalli ahela disain

Lahtisidestuskondensaatorid on vastavalt soovitudele paigutatud võimalikult lühikeste radadega mikrokontrolleri viikude lähedale. Pikemad rajad tekitavad häiringuid ja ei suuda

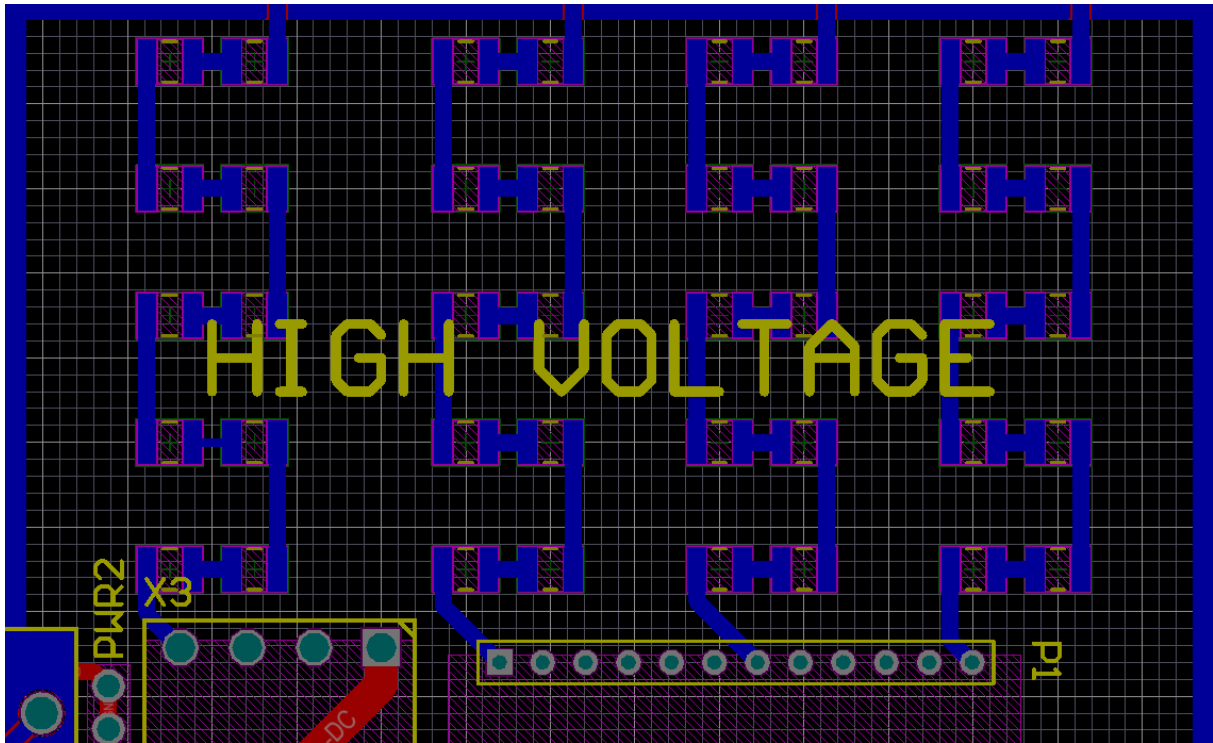
efektiivselt summutada kõrgsageduslikke komponente, mis tekivad mikrokontrolleri operatsiooni käigus. Hea tava kohaselt asetatakse kondensaatorid mikrokontrolleritega ühele samale trükkplaadi poolele. Antud trükkplaadi puhul polnud see võimalik, mistõttu tehti disainis järeleandmisi ning kasutati läbiviike. Mikrokontrolleri suurel taktsagedusel on võimalus, et kondensaatorid olenevalt materjalidest hakkavad võimendama hoopis kõrgsageduslikke komponente. Hetke disaini juures sagedused ei küündi omavõnke sageduse resoneerimise lähedale ning ei pea arvestama sellega. Joonisel 3.3. on esitatud lahtisidestuskondensaatorite asetused disainitud trükkplaadil.



Joonis 3.3. Lahtisidestuskondensaatorite asetused ja disain

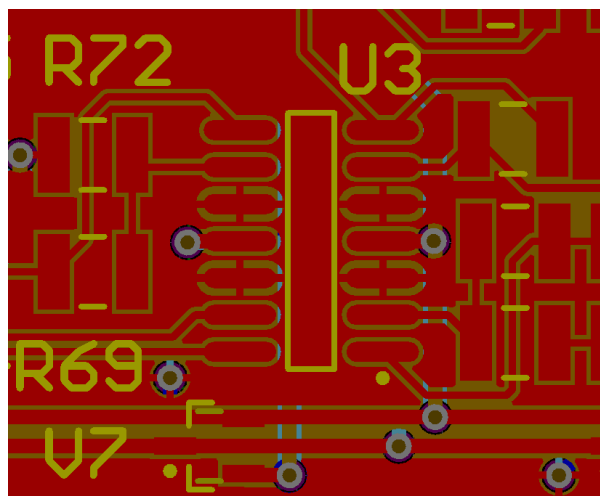
3.3 Pinge ja voolu mõõtmise ahelate disain

Pinge mõõtmise ahelate juures on kõige tähtsamateks disaini komponendiks pingejagurite olemasolevate takistite vahe. Takistite vahe on arvatud IPC-2221 [Tabel 6-1] standardi järgi. Disainimisel on lähtutud klassifikatsioonist B4, mis defineerib jootemaskiga varustatud trükkplaadil olevate elektrijuhtide omavahelise distantsi. Tabeli järgi on minimaalne lubatud vahemaa 1500V pingel 4,5mm. Ülesande püstituses on määratud maksimaalne pingemõõtmise võimekus kuni 1000V-ni. Sellisel juhul on isolatsiooni vahemaa 3,025mm. Lõplik lahendus kasutab 6mm suurune vahemaa, mis tagab standardi kohaselt peaaegu 2 korda suurema vahemaa komponentide vahel ja piisava isolatsiooni eri faasi pingete mõõtmisel. Vahemaa on piisavalt suur, et kaitsta ülelöökidest ka suuremate kui 1000V pingesähvatuste eest. Levinud praktika on pingejagurite alt vase eemaldamine, vältimaks pikaajalist dielektrilist erosiooni. See hävitaks keerulistes tingimustes oleva trükkplaadi. Joonisel 3.4 illustreerib pingejaguri paigutust trükkplaadil. Joonisel olev ruudustik on 1 mm sammuga.



Joonis 3.4. Pingejaguri paigutus disainis

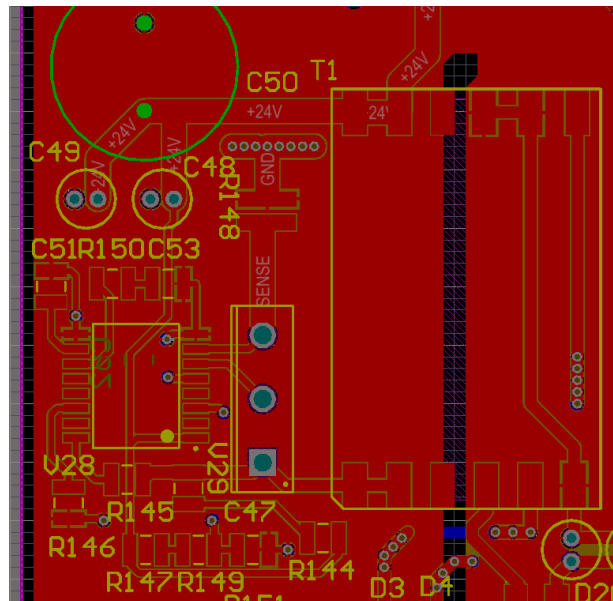
Operatsioonivõimendite disain sõltub paljustki operatsioonivõimendist ja selle pakendist ning sellest, mitu operatsioonivõimendit on ühes pakendis. Kasulik disainilahendus müra vähendamiseks signaalides on maa-alaga ekraniseerimine ülejäänud ahelatest. Antud disaini puhul täidab ekraniseerimise ülesannet vase pealne kiht, mis kaitseb signaali rada teiste radade müra eest. Lisaks tuleb müra vähendamisele kasuks see, kui ka kiibi all on vaske. Joonis 3.5 näitab lõpliku lahendust.



Joonis 3.5. Operatsioonivõimendi tüüplahendus trükkplaadi disainis

- mõõtetakisti ja summutuskondensaator peavad moodustama võimalikult väikese elektrilise ringi, et vältida antenniks muutumist;
- MOSFET-i ja trafo primaarmähise vooluringi suurus peab olema minimaalne.

Reeglid kehtivad primaarpoolele. Sekundaarmähistele ei ole andmelehes erinõudeid esitatud. Joonisel 3.7 on esitatud disainitud trükkplaadi primaarmähisepoolne osa, mis arvestab varem loetletud reegleid.

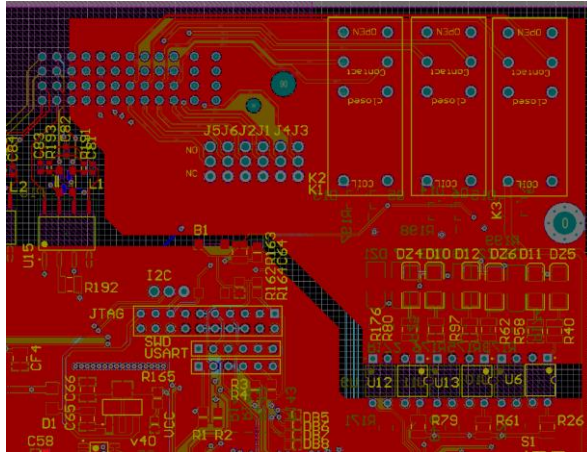


Joonis 3.7. Primaarmähisepoolne disain

Sekundaarmähised on tavalised poolperiood alaldid. Andmelehes soovitatakse kasutada Shottky diode. Nende eeliseks on väike päripingelang, seega suureneb süsteemi efektiivsus ja kaod vähenevad.

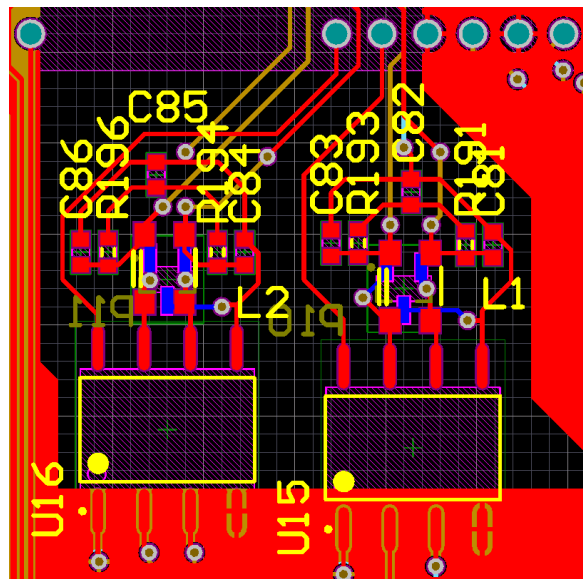
3.5 Muude ahelate disain

Digitaalsisendid ja digitaalväljundid on omavahel seotud suurema maa-alaga, mille peamine ülesanne on häirete vältimine mikrokontrolleri ahelates. Maa-alad on omavahel ühendatud, kuid signaalid mitte. Kuna kõik sisendid on sama potentsiaali tasandil, ei esine sellega probleeme. Joonis 3.8 illustreerib töös disainitava trükkplaadi digitaalsisendite ja –väljundite asetust. [15]



Joonis 3.8. Digitaalsisendite ja -väljundite skeem

CAN-busi lahendus on võetud üks ühele Texas instrumenti andmelehest[5], kus on kirjeldatud milleks on vastavad komponendid vajalikud. Lisaks on toodud soovitusid, et disainimisel peab jälgima radade pikkuseid ning et rajad tuleks üksteisega alati lähestikku hoida. Reeglid ei ole nii ranged, et peaks kasutama impedantsi sobitamist. Joonis 3.9 näitab CANbus ahela disaini.

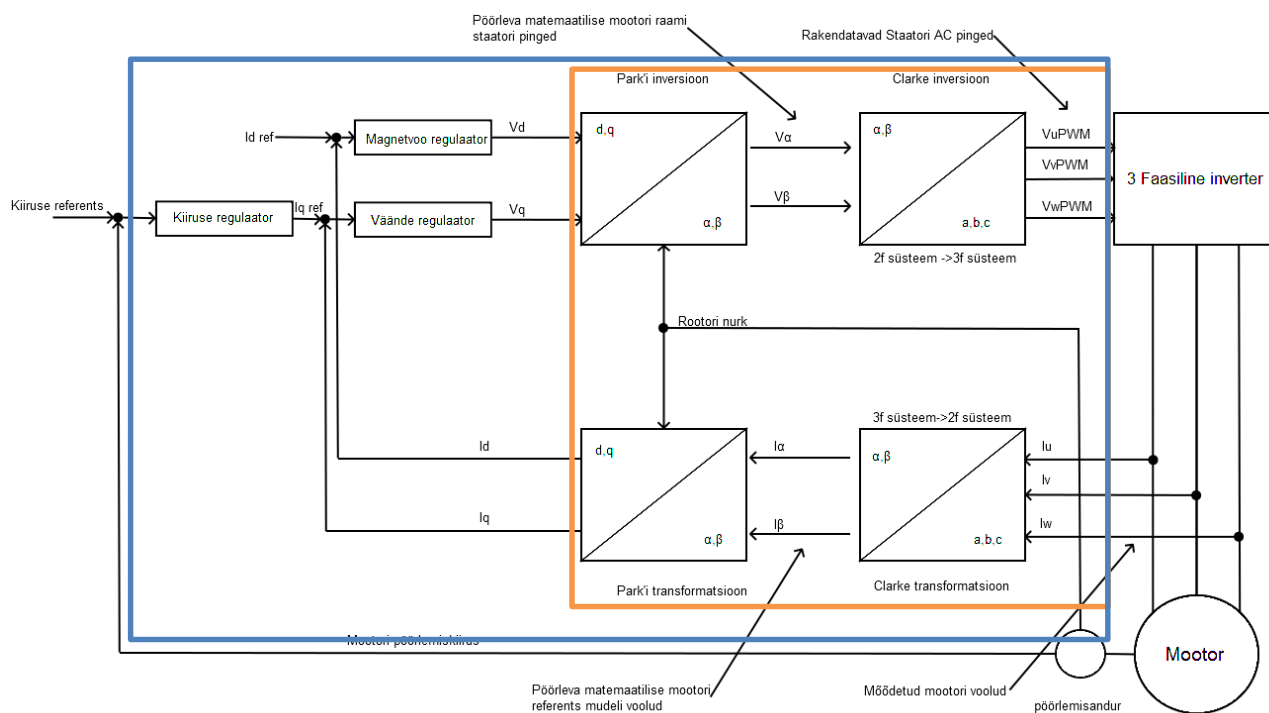


Joonis 3.9. CAN-bus ahela disaini

4. Tarkvara rakendamine

Mootori juhtimine on mitme järguline süsteem, mis koosneb peamiselt kahest alamsüsteemist. Kogu süsteem koosneb kahest suuremast matemaatilise mudelist ning kolmest regulaatorist. Kasutaja annab süsteemile soovitud kiiruse väärtuse regulaatorisse ja süsteem korrigeerib mootori kiirust vastavalt vajadusele.

Sisemine ring joonisel 4.1 on oranž ja koosneb mootori peamisest matemaatilise mudelist. Oma arvutusmahukuse tõttu on Park-i ja Clarke-i arvutused suurema kaaluga, selletõttu nimetatakse seada sisemiseks ringiks. Välimine ring on joonisel 4.1. sinise kontuuriga, millega lõppeb ka mootori juhtimise algoritmika. Ülejäänud süsteem koosneb mikrokontrollerisse integreeritud riistvarast ja tarkvarast, millega juhitakse mootorit. Regulaatorid on PI regulaatorid, millega tagatakse süsteemi sujuvus.



Joonis 4.1. Mootori juhtimise matemaatilise algoritmika seosed

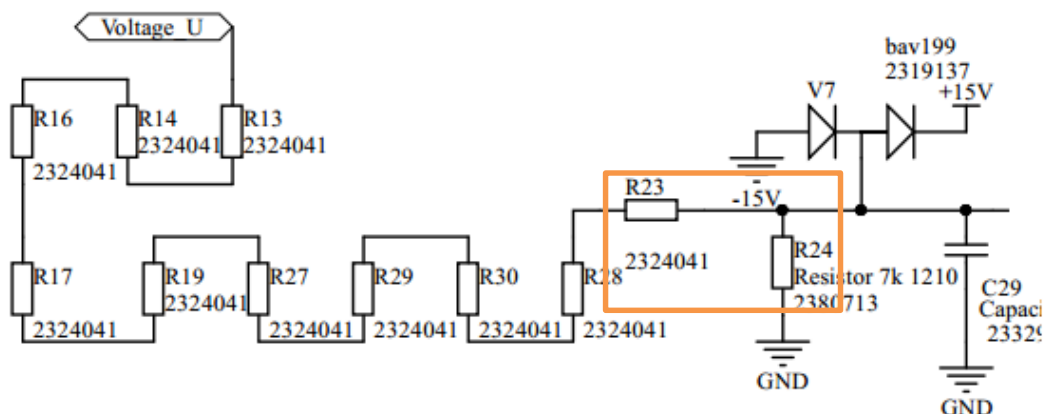
5. Mõõtmised

5.1 Voolu ja pinget mõõtmine

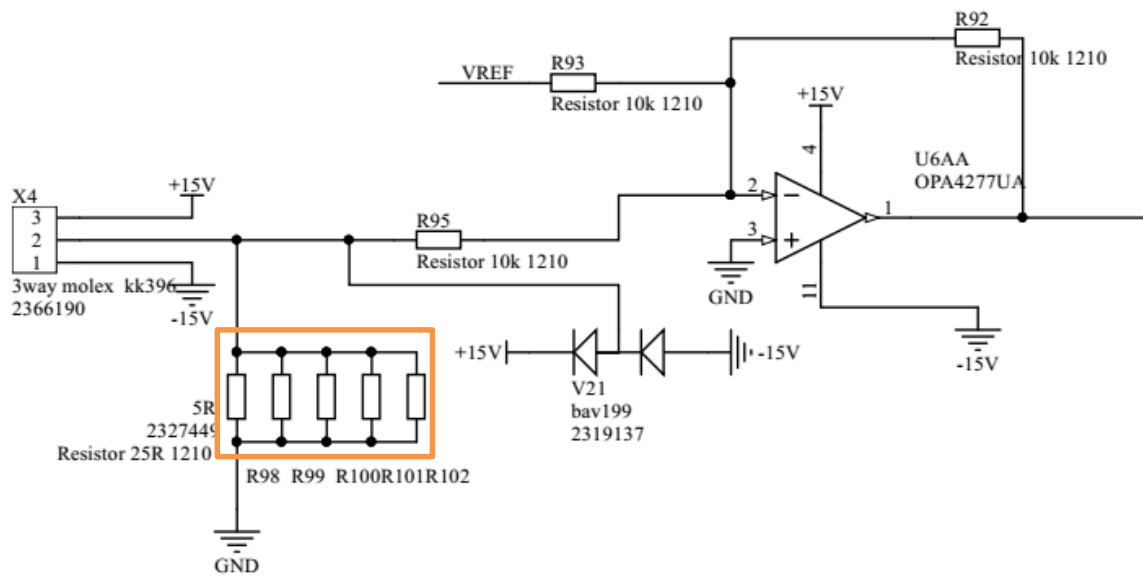
Mõõtekatse sooritati TTI funktsioonigeneraatoriga TG330-ga. Mõõdeti Yokogawa DLM500 ostsilloskoobiga. Mootori modulatsiooni sagedus saab olema 2KHz kuni 3KHz vahel. Kuna sagedus sõltub mootori koormusest, ei ole kasutatavas rakenduses modulatsioonisagedus kindla püsiva väärtusena. Süsteem valib koormusele vastava vajaliku sageduse ise. Mõõtekatsed viiakse läbi 3KHz signaaliga.

Signaaliahelaid modifitseeriti, võimaldamaks läbi viia funktsionaalseid teste.

- Pingeahelalt eemaldati pingejaguri osad takistused, nähtavad joonisel 5.1;
- Voolu mõõte ahelalt eemaldati takistused, mis muudavad vooluanduri väljundi takistuseks. Nähtaval joonisel 5.2.

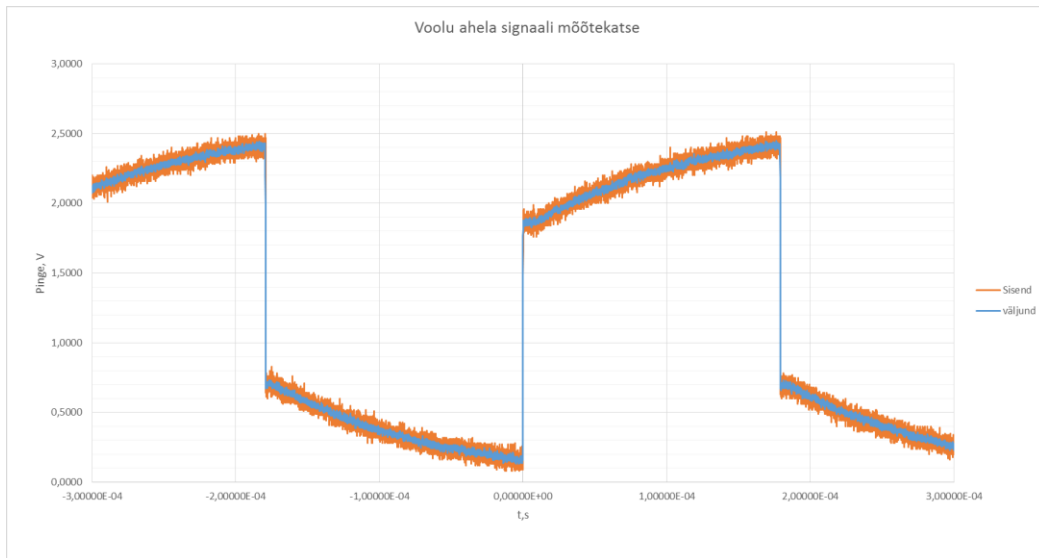


Joonis 5.1. Pingeahelast välja võetud takistid

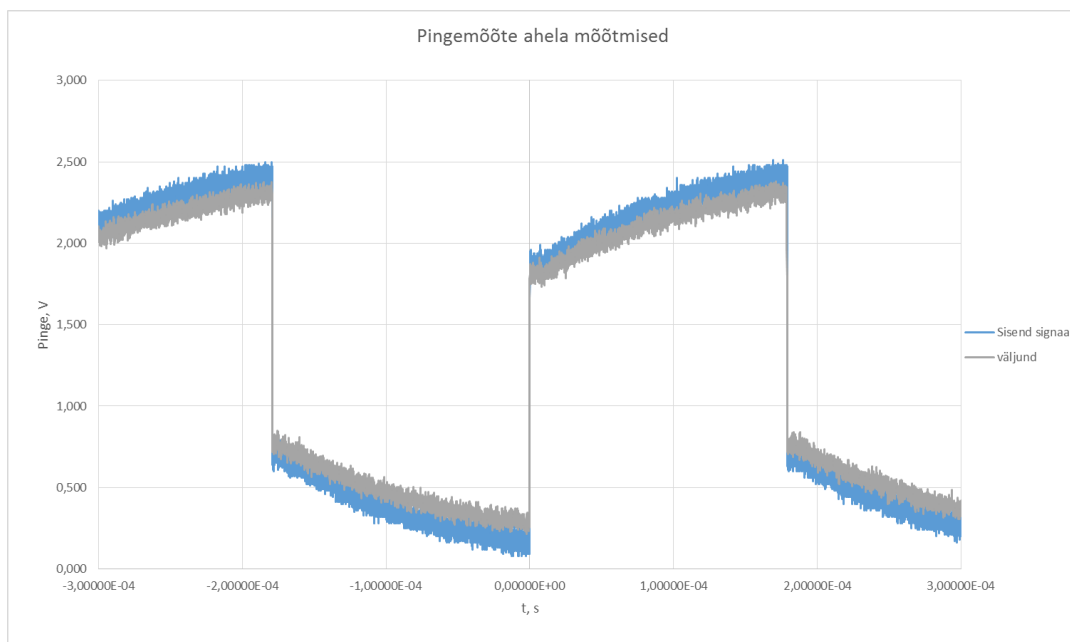


Joonis 5.2. Vooluahelast välja võetud takistid

Mõõtetulemused kinnitavad elektroonika töötamist etteantud olukorras. Sisendsignaal valiti nelinurksignaal, sest see näitab ära ahela peamised omadused. Tähtsamad parameetrid, mida sellega näeb on signaali tõusu aeg ja ka müra osakaal signaalis. Mõõde tulemused joonistel 5.3 ja 5.4 kinnitavad simulatsioonide ja ka arvutuste tulemusi. Mõlema ahela jaoks kasutati sama signaali.



Joonis 5.3. Vooluahela mõõtmistulemused



Joonis 5.4. Pingeahela mõõtetulemused

Graafikute järgi hinnates on olukord rahuldav. Signaalid ei ole moondunud 3KHz juures ega ole märgatavalt suurema müra tasemega kui sisendsignaal.

Kokkuvõte

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli projekteerida püsिमagnetilise sünkroonmootori juhtaju, arvestades etteantud kriteeriumeid. Lõputöös esitatud ülesanne on lahendatud täies mahus ja prototüübi projekteerimine on edukalt lõpetatud. Esimene prototüüp on valmistatud ja edasi arendamisele kuuluv. Mõõteahelate süntees ja arendamine on edukalt lahendatud. Komponentide valik on lahendatud arvutades komponentide jaoks õiged nominaalsuurused. Skeemikomponentide valik on lahendatud kaaludes komponendi tugevusi ja parameetrilisi väärtusi antud rakenduses.

Projekteerimise käigus tekkis probleeme- peamiselt komponentide dimensioneerimisega, füüsiliste parameetrite valikuga ja skeemilahenduse väljamõtlemisega. Skeemilahendused said disainitud robustsed ja lihtsad, vältimaks komplitseeritud ahelatest tekkivaid vigu. Disainis oli põhirõhk lihtsusel, robustsusel ning baasfunktsionaalsuse tagamiseks. Pinge ja voolu mõõteahelad sai koostatud sama loogikat kasutades kaht operatsioonivõimendit kaskaadi paigutades. Eesmärk on kaskaadfaasi infot kasutada järgmises versioonis sensorita mootori juhtimise puhul. Pinge mõõtmine on disainitud kuni 1000V-ni ja vool kuni 800A-ni. Lõikesagedus on 72KHz juures, maksimaalne põhisignaali sagedus küündib kuni 500Hz-ni. Temperatuuri mõõtmise ahelad baseeruvad sarnase operatsioonivõimendi lahenduse põhjal, kuid peamiselt kasutatakse süsteemis positiivse koefitsiendiga takisteid. Skeemitehnika poolt on toetunud rakendusjuhiste, kus selgitatud standardsed skeemitehnilised lahendused on võetud kasutusele. SD-kaardi skeemilahendus on võetud SD-kaardi standardil põhinevast tootja NXP rakendusjuhise. Resolveri ahel töötab vigadeta, probleeme aitas vältida tugev rakendusjuhise Analogue Devices-i poolt. Toiteahelas on kasutatud uut Linear Technologies-i tehnoloogial põhinevat tagasisidestuseta DC/DC muundurit, millele on vaja vähe komponente lisada tagamaks baasfunktsionaalsust. Lahenduse integreerimisel on jälgitud Linear Technologies-i rakendusjuhise. Disainis on olemas ka kahte tüüpi eraldiseisvat mälu. Üheks neist on SD-kaart ja teiseks on SPI siinile ühilduv Flash mälu. Flash mälu eesmärgiks on madala prioriteediga tabelite hoiustamine ja konstantide salvestamine. SD-kaardi eesmärkiks on logida andmeid, mis tekivad mootori operatsiooni käigus. CANbus on mõeldud süsteemisiseseks andmeedastuseks, kiirusel kuni 1Mbit/s.

Edasine arendus näeb ette resolveri ahela asendamist mikrokontrolleriga, mis tooks ahela hinnakulu alla. Modifitseerida toiteahelat, vältimaks toitemüra teket. Optimeerida komponentide füüsilisi suurusi, füüsilist disaini ADC konverterile eelnevatel RC filtritel ja

muuta trükkplaati väiksemaks. Varustada programmeerimiseks ahelad indikaatortuledega. Peamise eesmärgina tuleb optimeerida disaini ladumise jaoks.

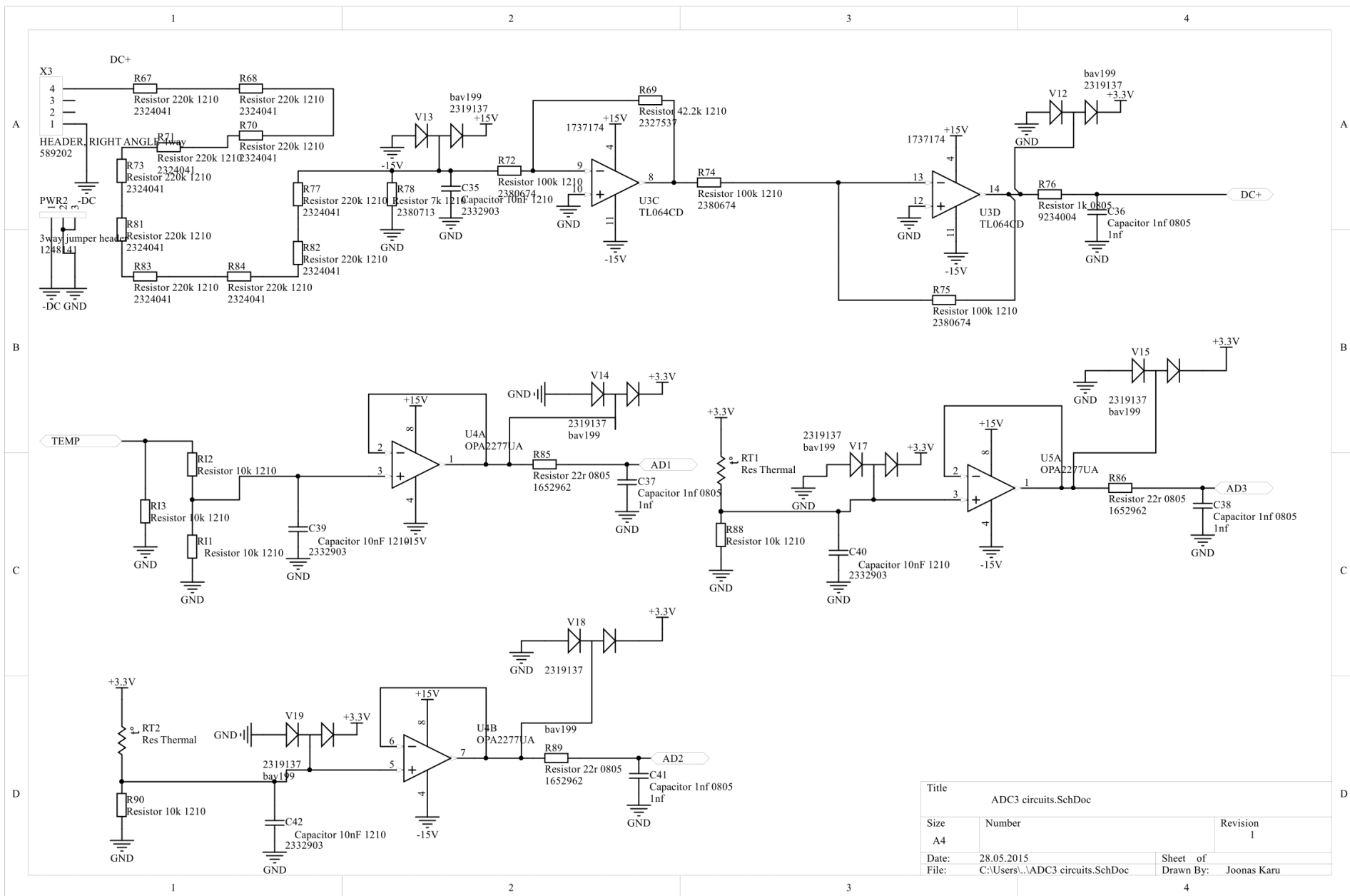
Töös esinevaid arvutusi ja skeeme on võimalik kasutada teistel osapooltel oma lahendustes, kus soovitakse saada sama ahela funktsionaalsust või otsitakse sama baasfunktsionaalsust.

Kasutatud kirjandus

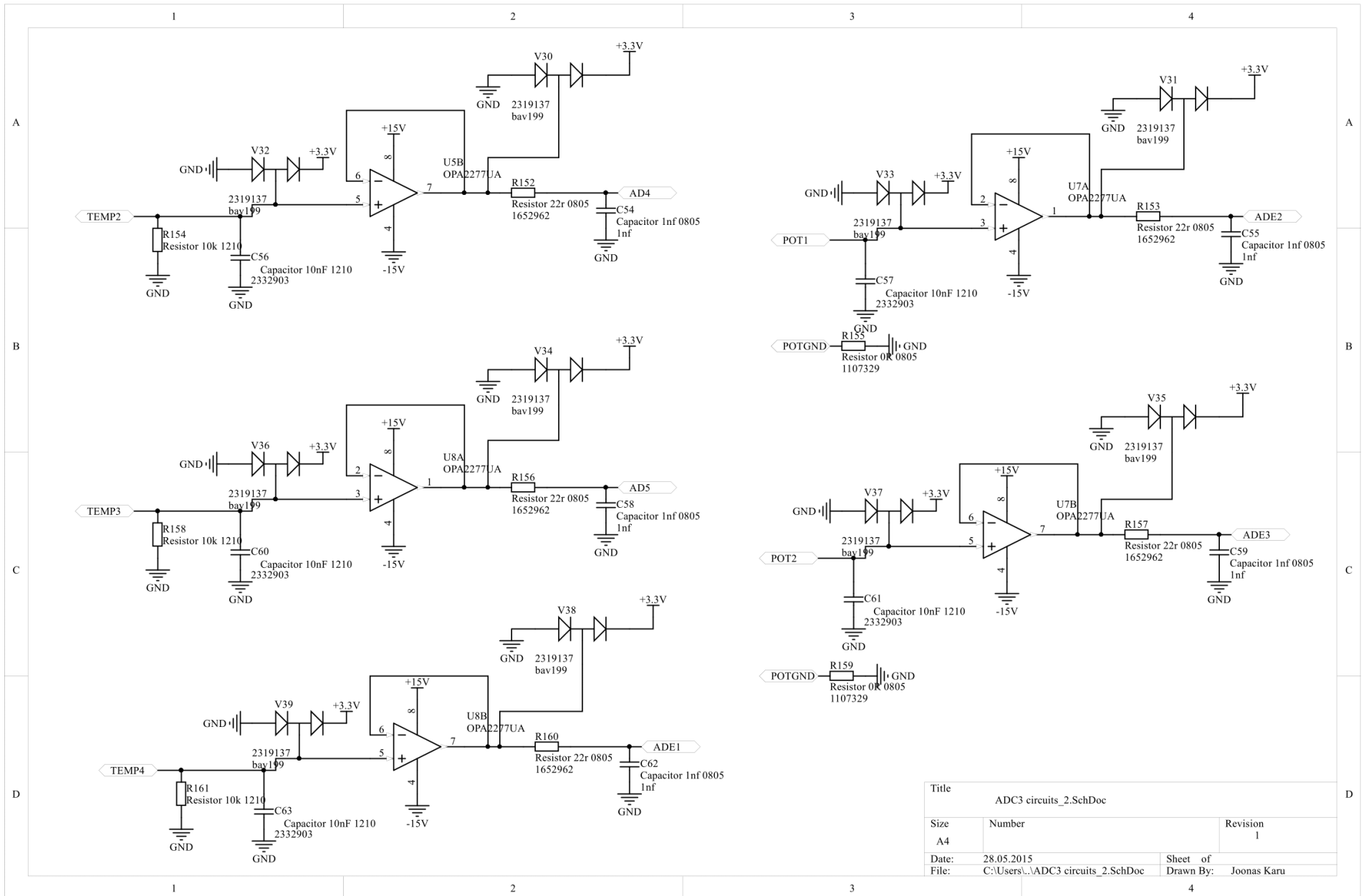
1. The Art of Electronics : P. Horowitz ja W. Hill : Cambridge university press 2008
2. SD(HC)-memory card and MMC interface conditioning [WWW]
http://www.nxp.com/documents/application_note/AN10911.pdf (24.05.2015)
3. Optocoupler and resolver basics [WWW]
http://www.optoresolver.com/help/tutorials/resolver_v_encoder.htm (5.04.2015)
4. CANbus [WWW] http://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus (24.05.2015)
5. Common Mode Chokes in CAN Networks:Source of Unexpected Transients [WWW]
<http://www.ti.com/lit/an/slla271/slla271.pdf> (24.05.2015)
6. LT3748 100V isolated flyback controller [WWW]
<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3748fb.pdf> (24.05.2015)
7. Infineon FS450R17KE3 andmeleht [WWW]
http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FS450R17KE3-DS-v02_03-en_de.pdf?fileId=db3a304412b407950112b42fec154e54 (24.05.2015)
8. DsPIC Block/PWM Motor Output [WWW]
http://www.kerhuel.eu/wiki/DsPIC_Block/PWM_Motor_Output (24.05.2015)
9. Segger J-link User manual [WWW]
https://www.segger.com/cms/admin/uploads/productDocs/UM08001_JLink.pdf
(24.05.2015)
10. Generic standard On Printed Circuit Board IPC 2221A, IPC : Mai 2003
11. Brandner OÜ standardse 4 kihilise PCB ülesehitus [WWW] Brander.ee (24.05.2015)
12. Hardware Design Guidelines for TMS320F28xx and TMS320F28xxx DSCs [WWW]
<http://www.ti.com/lit/an/spraas1b/spraas1b.pdf> (24.05.2015)
13. STM32F439 Datasheet [WWW] <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00077036.pdf>
(23.05.2015)
14. Acceptability of Electronic Assemblies IPC-A-610D IPC : Veebruar 2005
15. Generic requirements for surface mount design and Land Pattern Standard IPC-7351
IPC : Veebruar 2005

LISAD

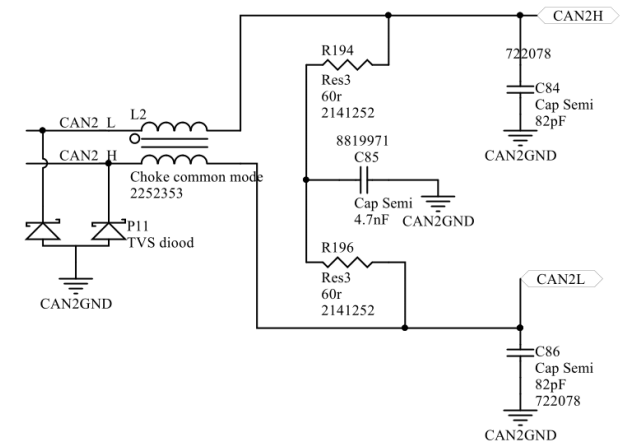
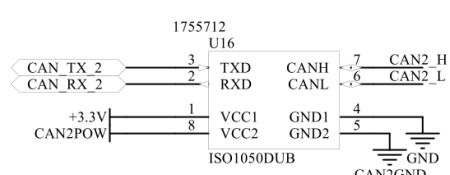
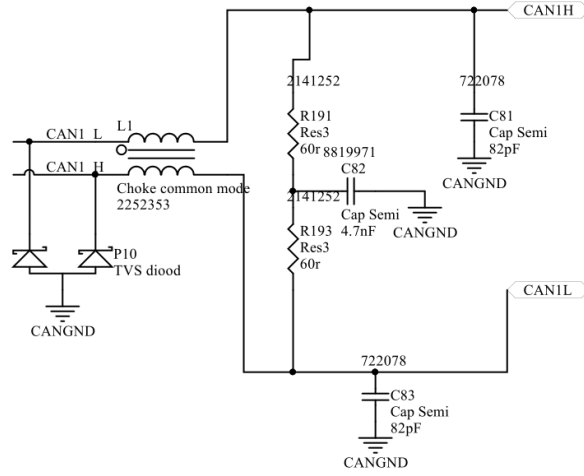
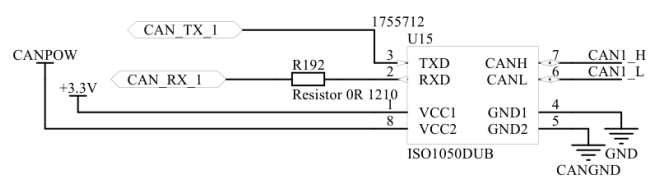
L.1.Skeemid



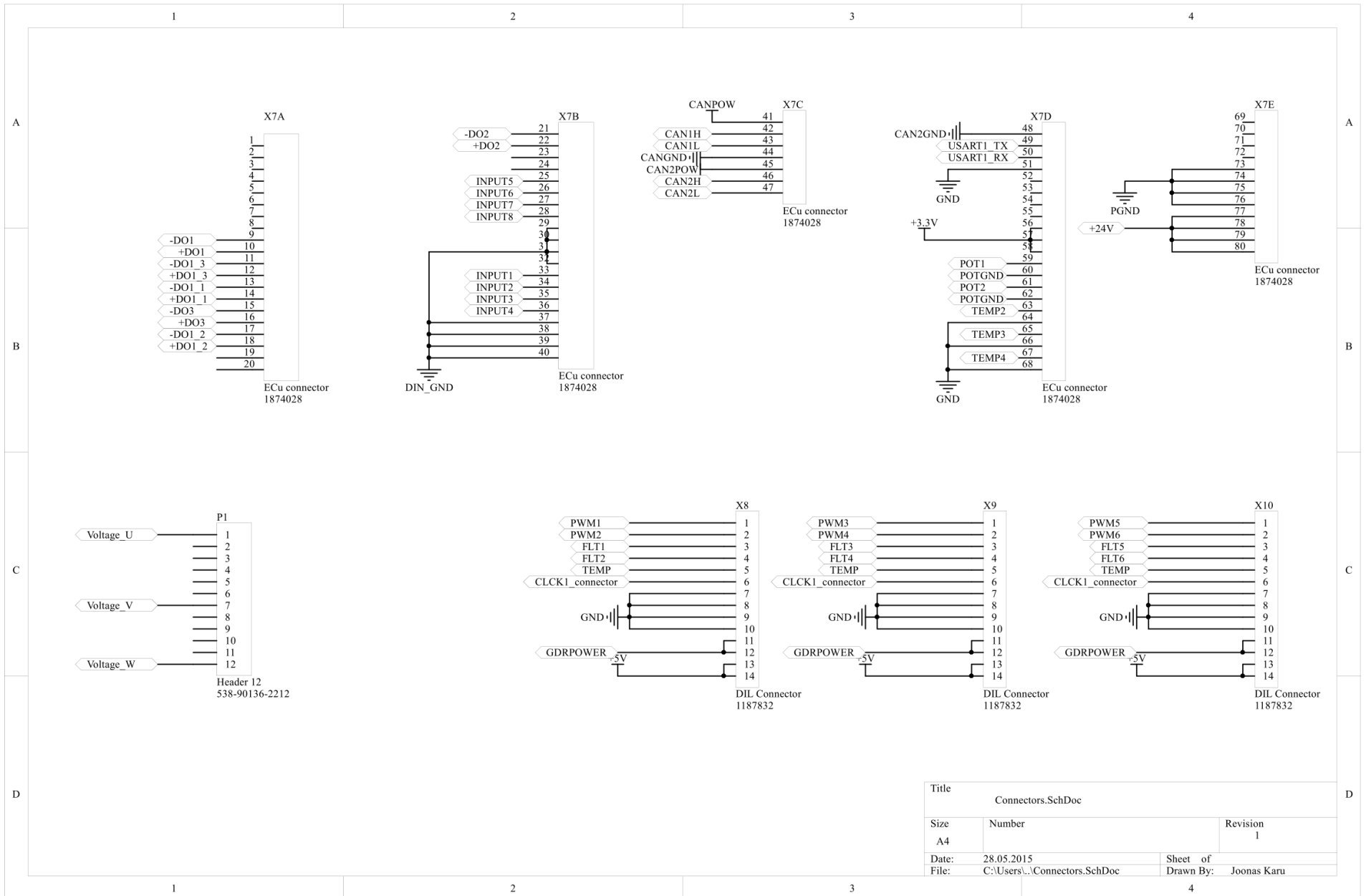
Title		
ADC3 circuits.SchDoc		
Size	Number	Revision
A4		1
Date:	28.05.2015	Sheet of
File:	C:\Users\...\ADC3 circuits.SchDoc	Drawn By: Joonas Karu



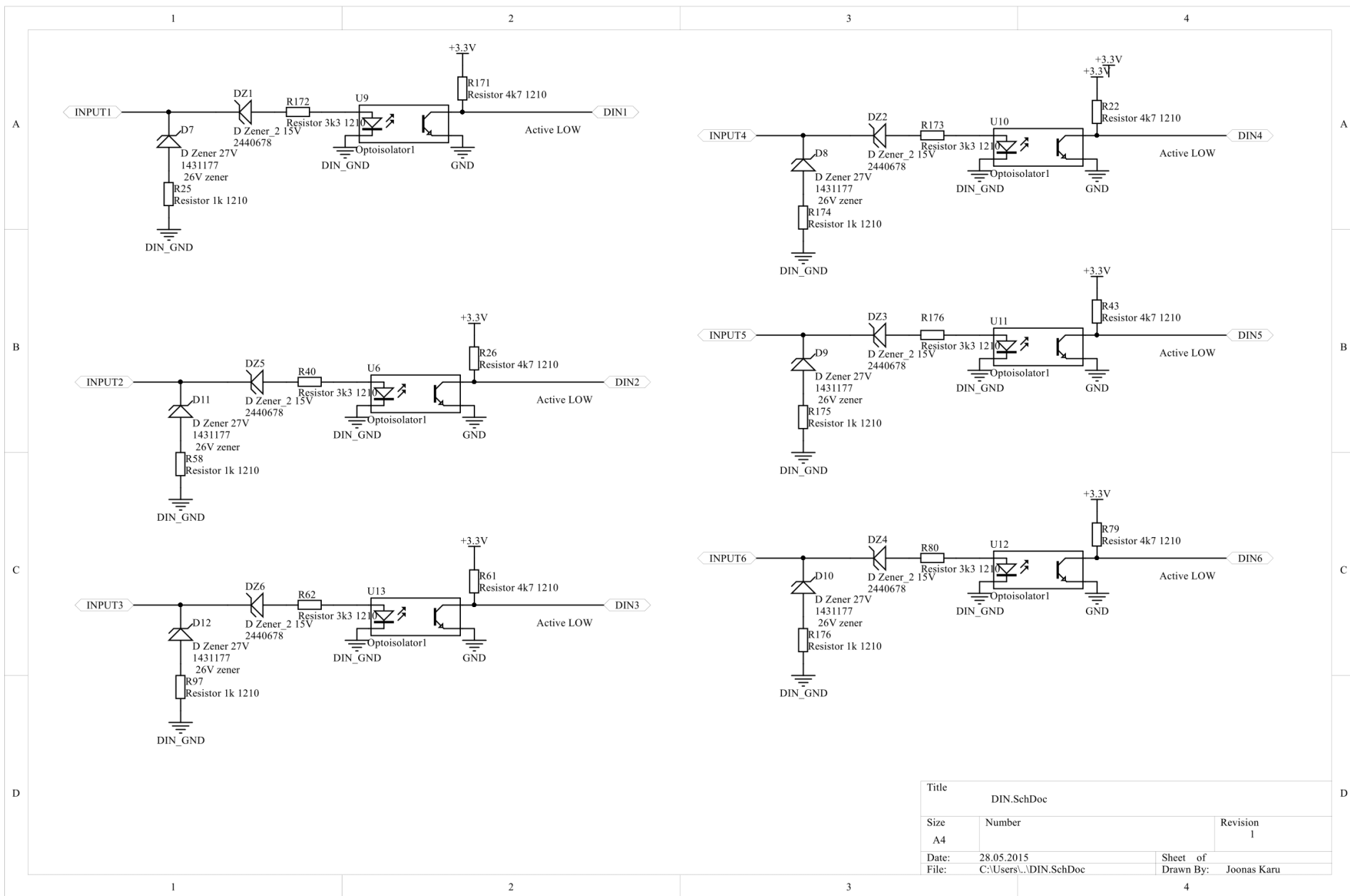
Title			ADC3 circuits_2.SchDoc		
Size	Number	Revision			
A4		1			
Date:	28.05.2015	Sheet	of		
File:	C:\Users\...\ADC3 circuits_2.SchDoc	Drawn By:	Joonas Karu		



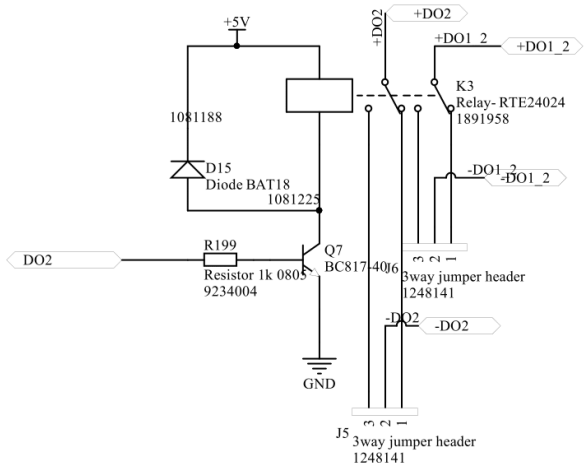
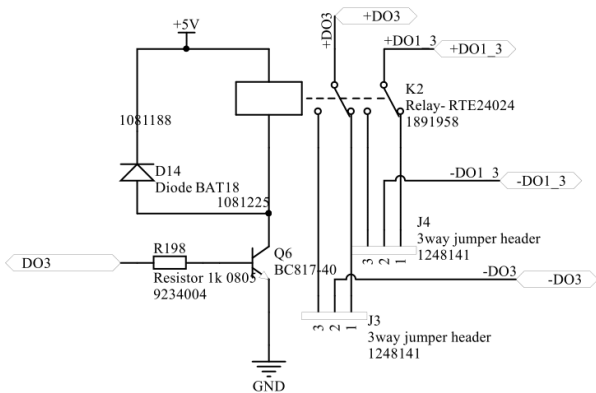
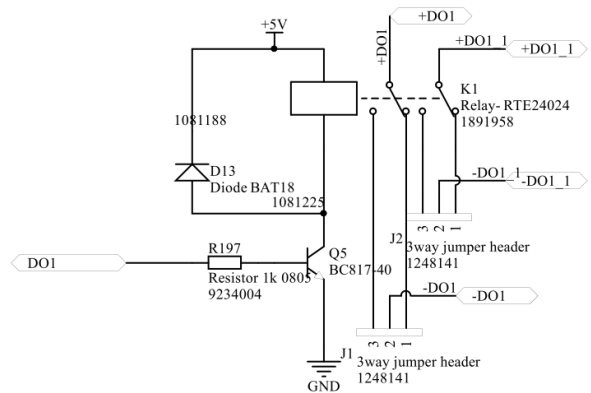
Title		
CANBUS.SchDoc		
Size	Number	Revision
A4		1
Date:	28.05.2015	Sheet of
File:	C:\Users\...\CANBUS.SchDoc	Drawn By:
		Joonas Karu



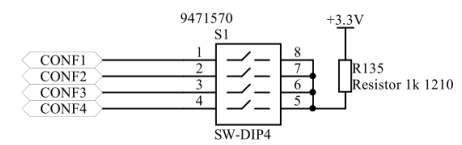
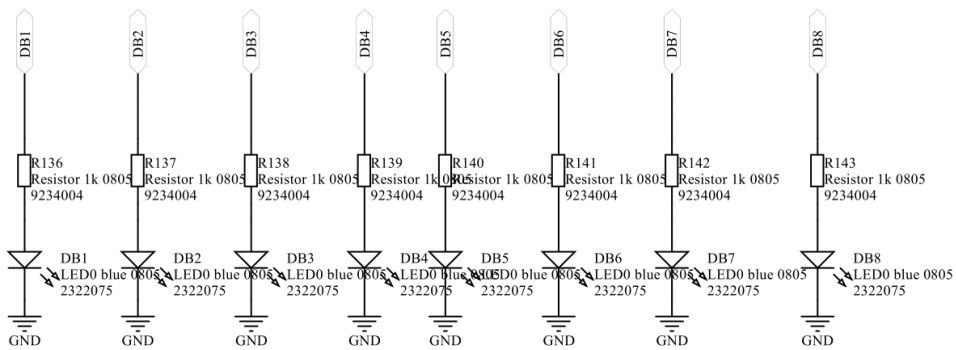
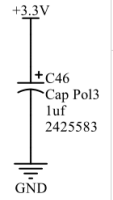
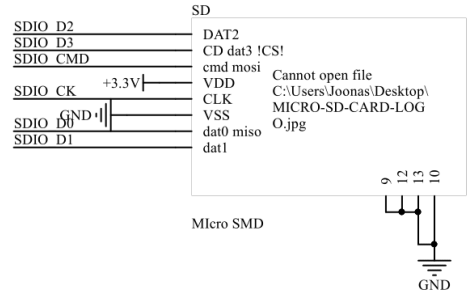
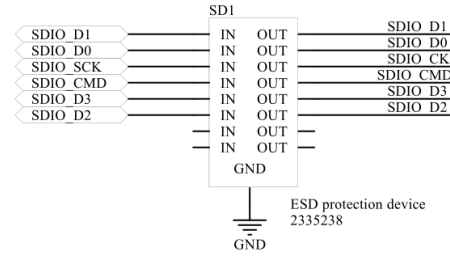
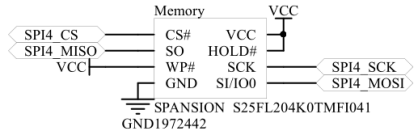
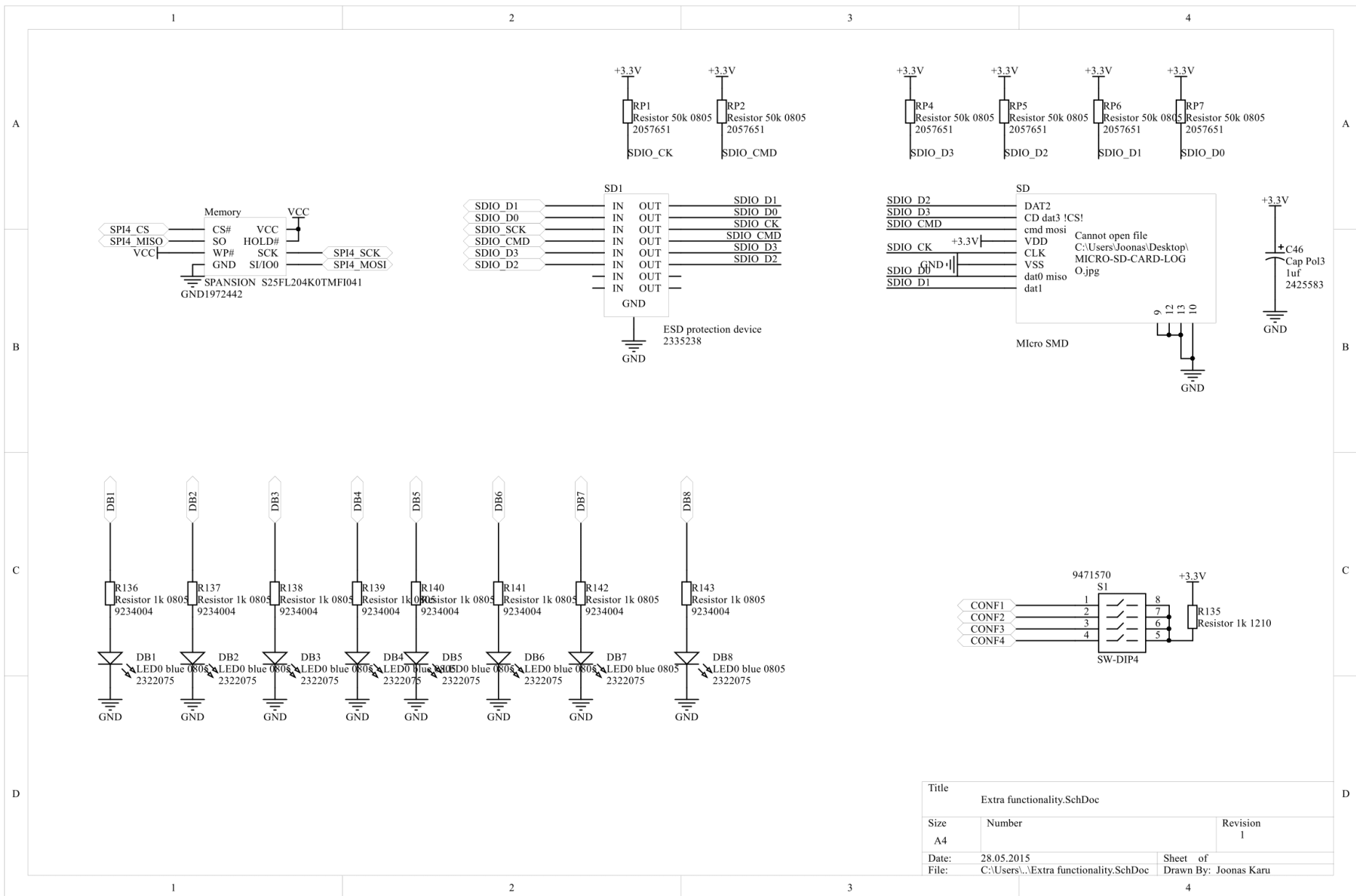
Title		
Connectors.SchDoc		
Size	Number	Revision
A4		1
Date:	28.05.2015	Sheet of
File:	C:\Users\...\Connectors.SchDoc	Drawn By:
		Joonas Karu



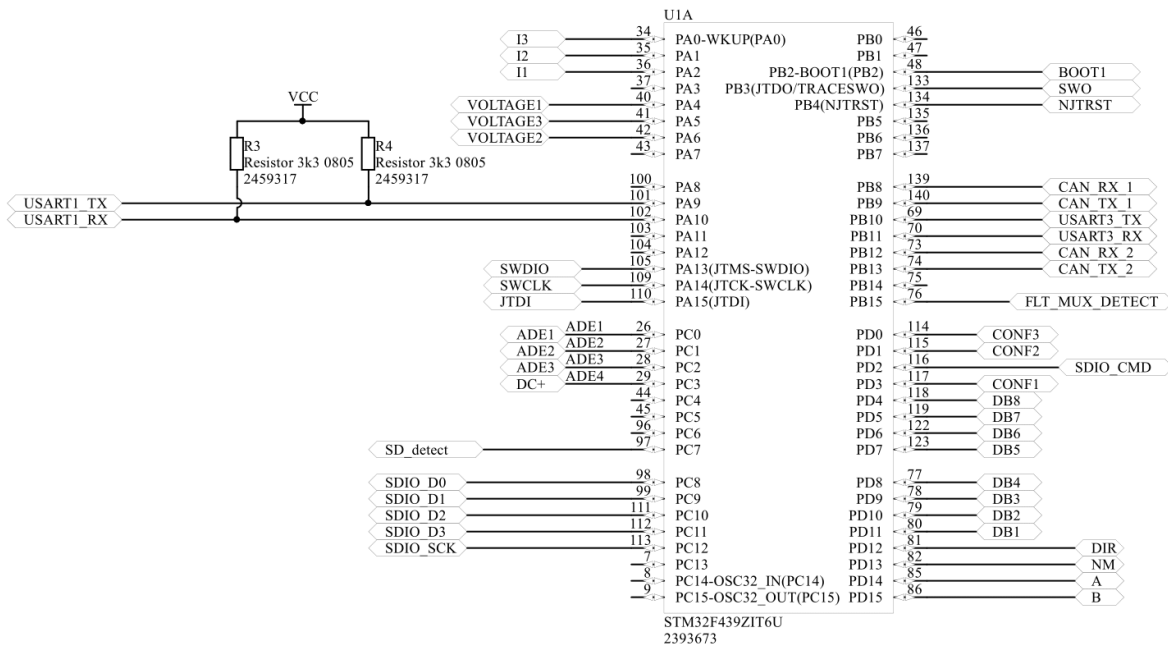
Title		
DIN.SchDoc		
Size	Number	Revision
A4		1
Date:	28.05.2015	Sheet of
File:	C:\Users\...\DIN.SchDoc	Drawn By: Joonas Karu



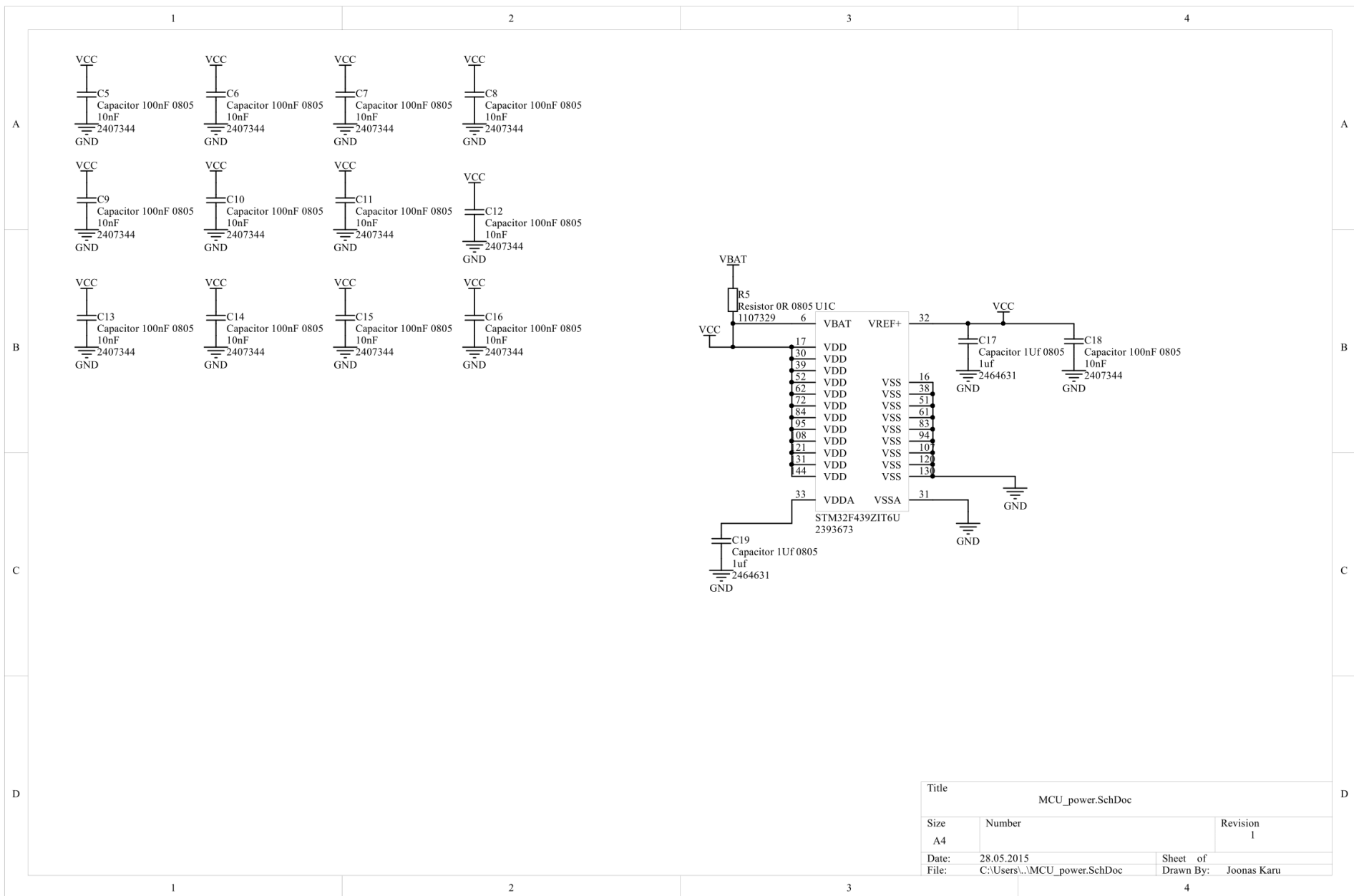
Title		
DO.SchDoc		
Size	Number	Revision
A4		1
Date:	28.05.2015	Sheet of
File:	C:\Users\...\DO.SchDoc	Drawn By: Joonas Karu



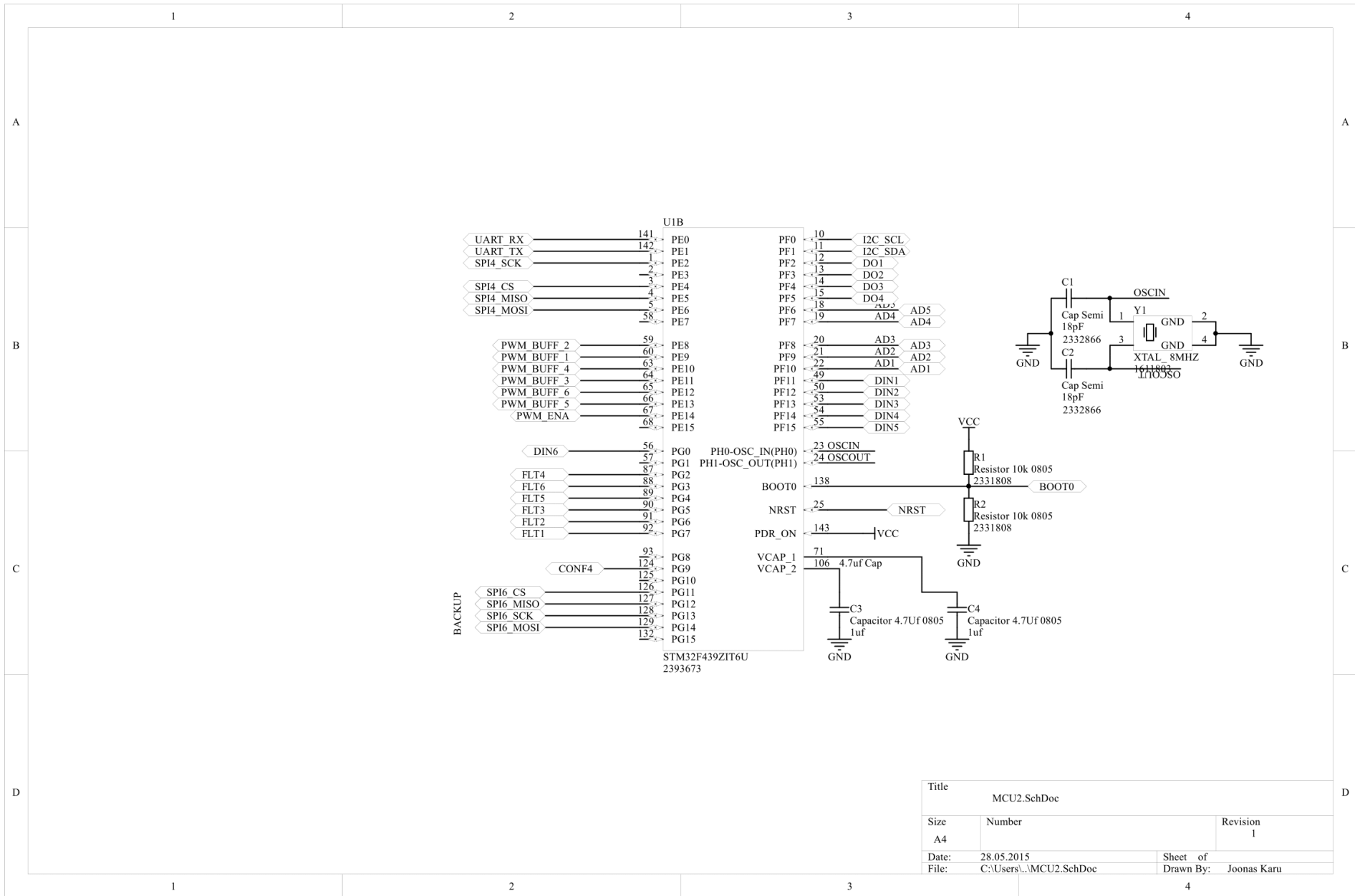
Title		
Extra functionality.SchDoc		
Size	Number	Revision
A4		1
Date:	28.05.2015	Sheet of
File:	C:\Users\...\Extra functionality.SchDoc	Drawn By: Joonas Karu



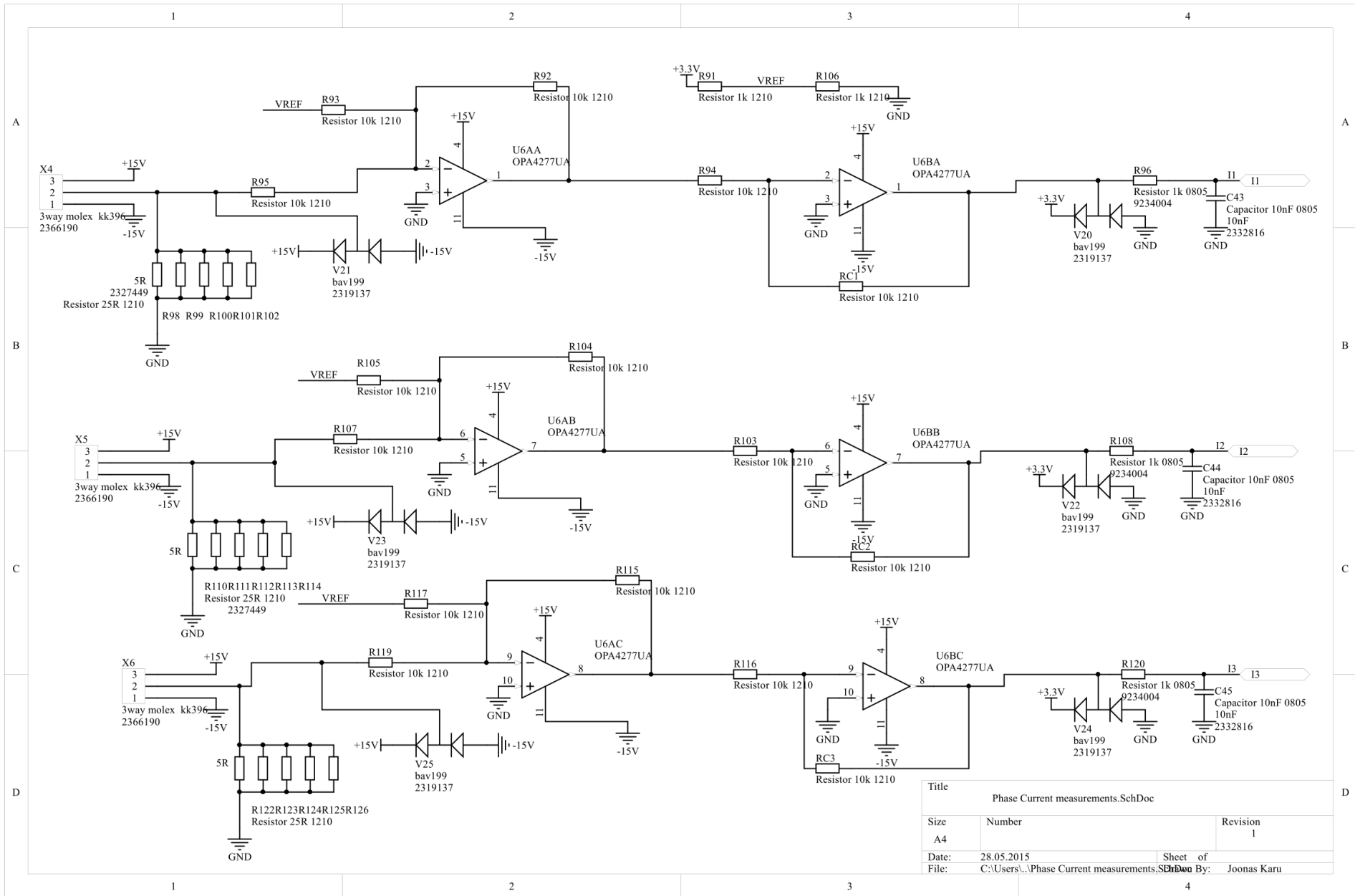
Title			
MCU.SchDoc			
Size	Number	Revision	
A4		1	
Date:	28.05.2015	Sheet of	
File:	C:\Users\... \MCU.SchDoc	Drawn By:	Joonas Karu



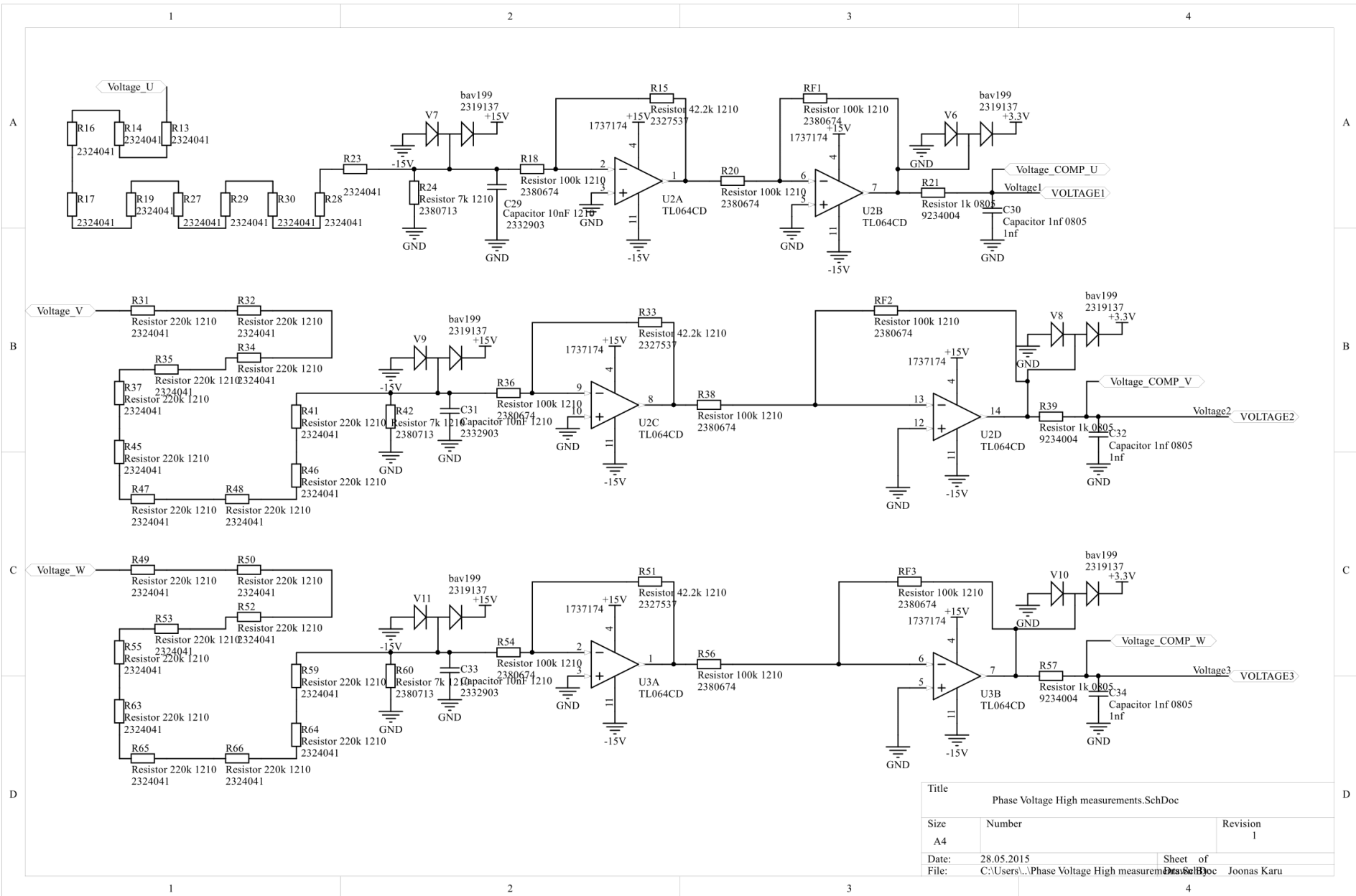
Title			
MCU_power.SchDoc			
Size	Number	Revision	
A4		1	
Date:	28.05.2015	Sheet of	
File:	C:\Users\...MCU_power.SchDoc	Drawn By:	Joonas Karu



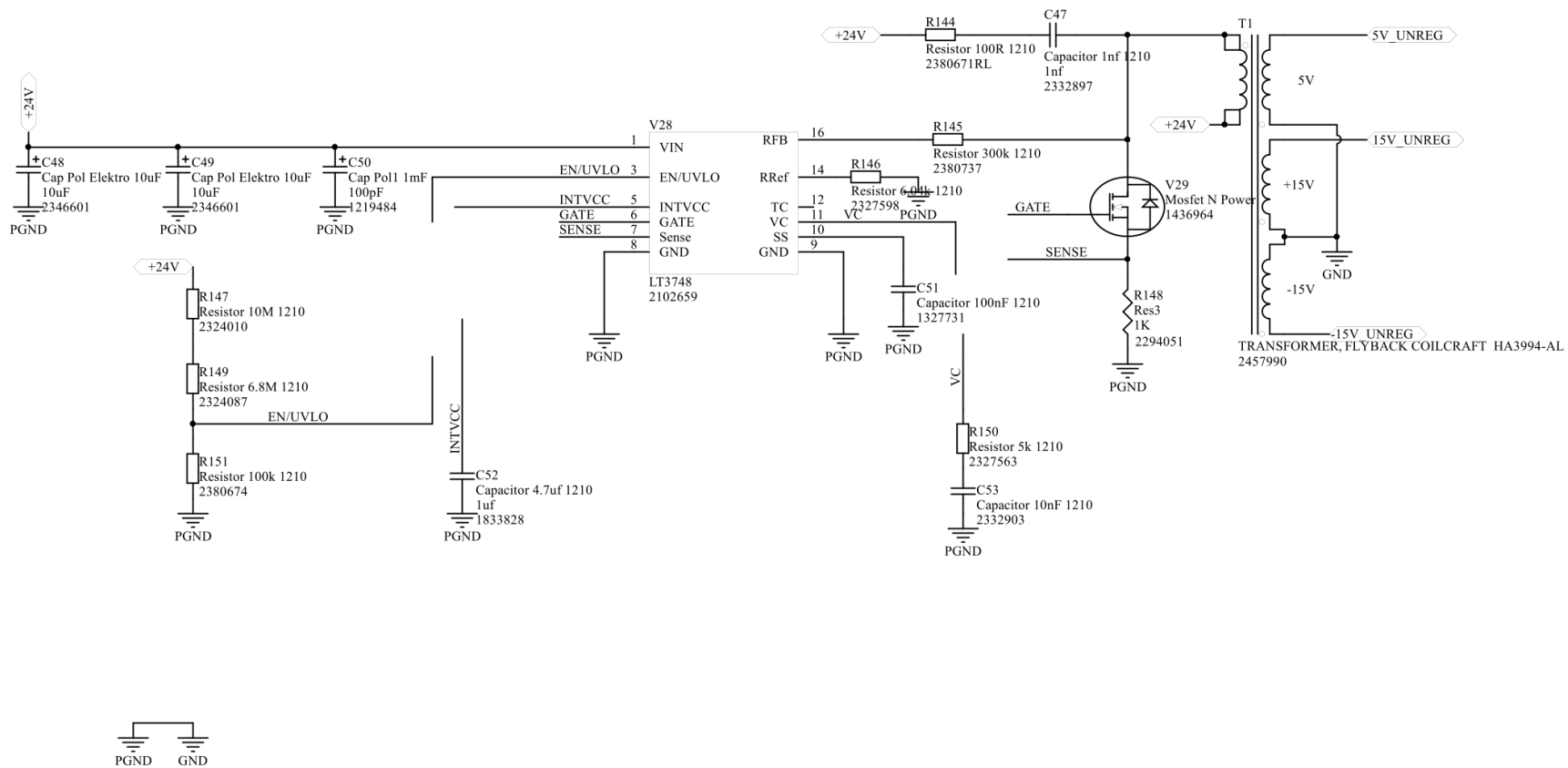
Title			
MCU2.SchDoc			
Size	Number	Revision	
A4		1	
Date:	28.05.2015	Sheet of	
File:	C:\Users\...\MCU2.SchDoc	Drawn By:	Joonas Karu



Title		
Phase Current measurements.SchDoc		
Size	Number	Revision
A4		1
Date:	28.05.2015	Sheet of
File:	C:\Users\...\Phase Current measurements.SchDoc	By: Joonas Karu

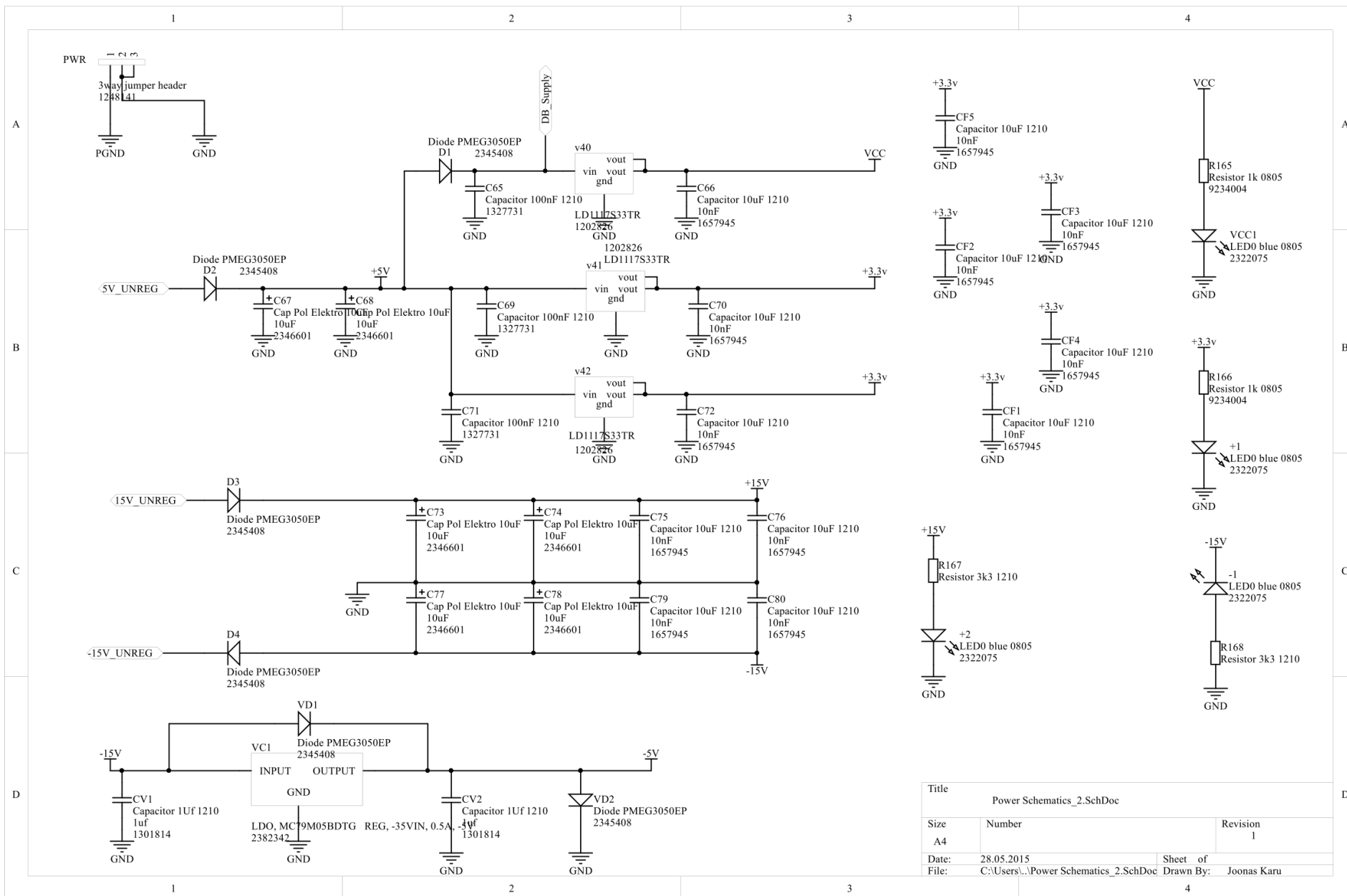


Title			Phase Voltage High measurements.SchDoc		
Size	Number				Revision
A4					1
Date:	28.05.2015		Sheet of		
File:	C:\Users\...Phase Voltage High measurements.SchDoc		Drawn by		Joonas Karu

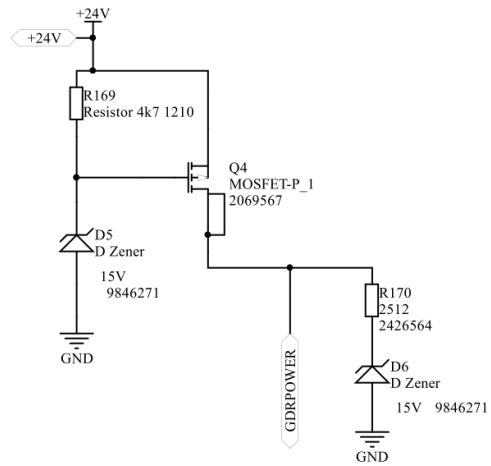


Power Schematics.SchDoc

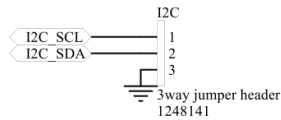
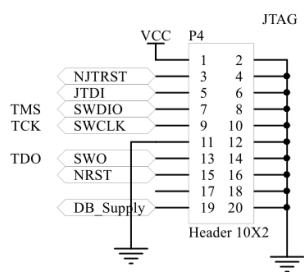
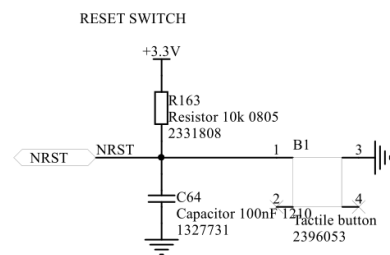
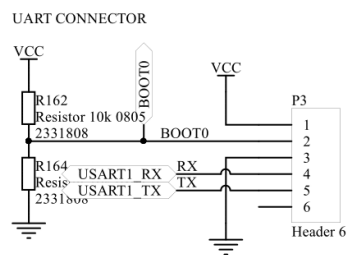
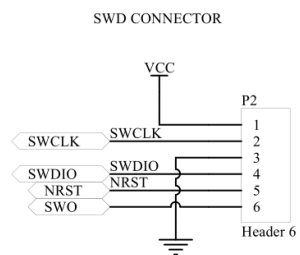
Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	28.05.2015	Sheet of
File:	C:\Users\...Power Schematics.SchDoc	Drawn By: Joonas Karu



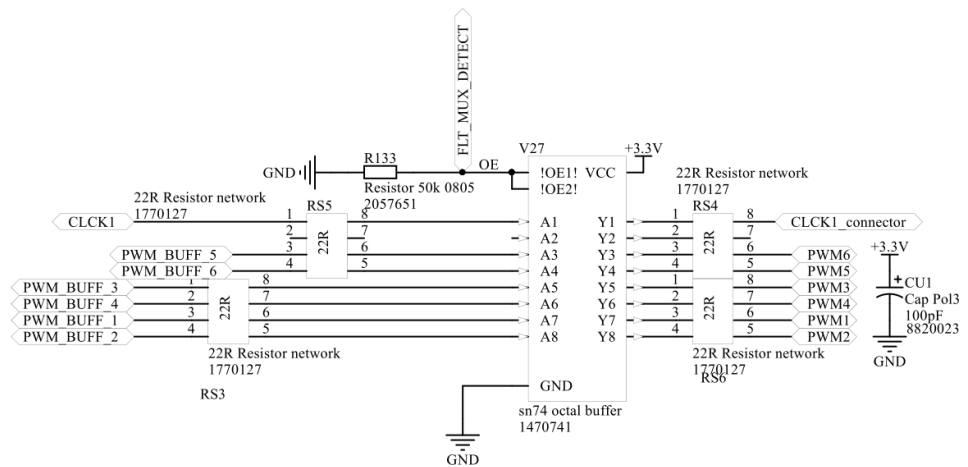
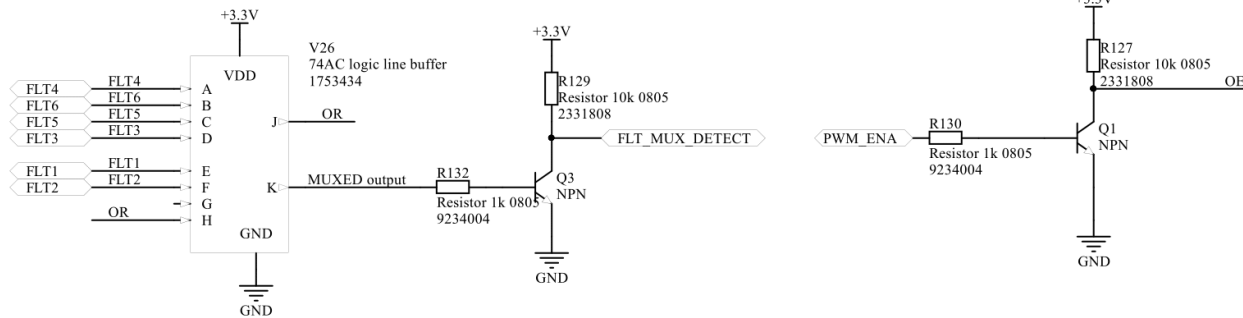
Title			Power Schematics_2.SchDoc		
Size	Number		Revision		
A4			1		
Date:	28.05.2015		Sheet of		
File:	C:\Users\...\Power Schematics_2.SchDoc		Drawn By:		Joonas Karu



Title		
Power Schematics_3.SchDoc		
Size	Number	Revision
A4		1
Date:	28.05.2015	Sheet of
File:	C:\Users\...Power Schematics_3.SchDoc	Drawn By: Joonas Karu

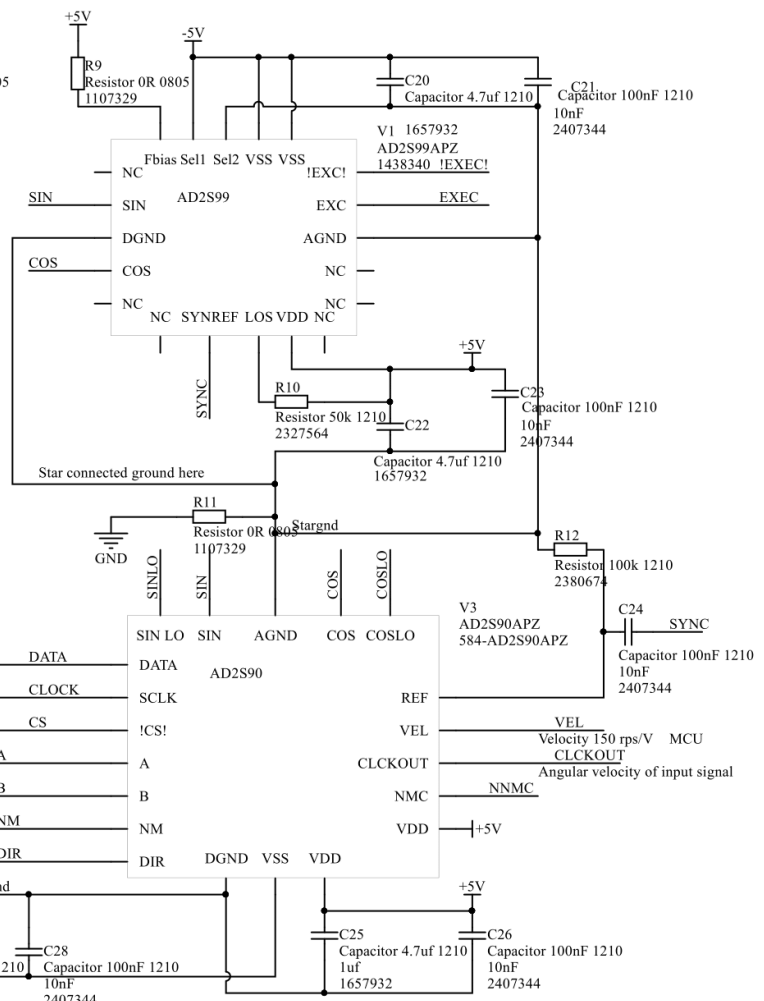
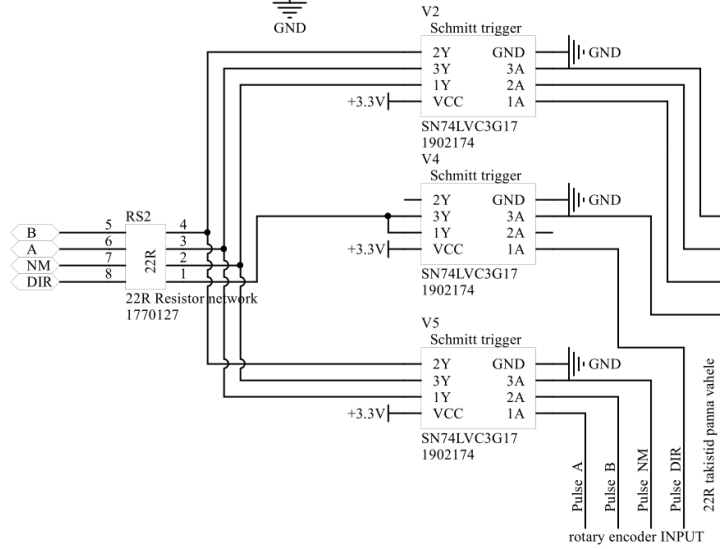
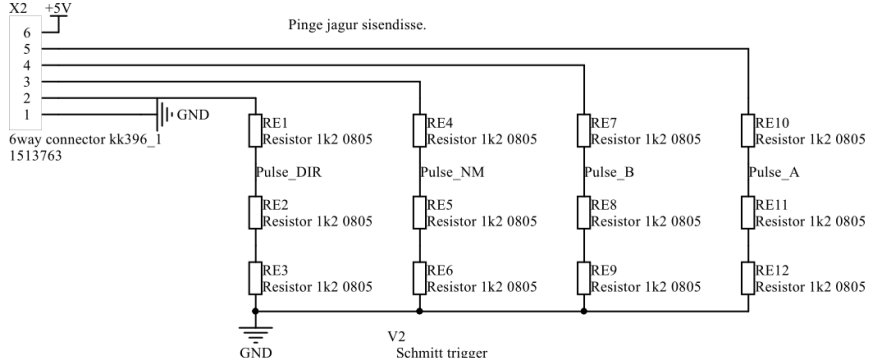
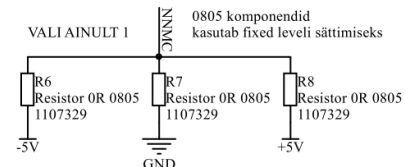
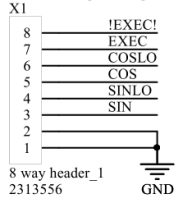


Title			
Programming.SchDoc			
Size	Number	Revision	
A4		1	
Date:	28.05.2015	Sheet of	
File:	C:\Users\...\Programming.SchDoc	Drawn By:	Joonas Karu

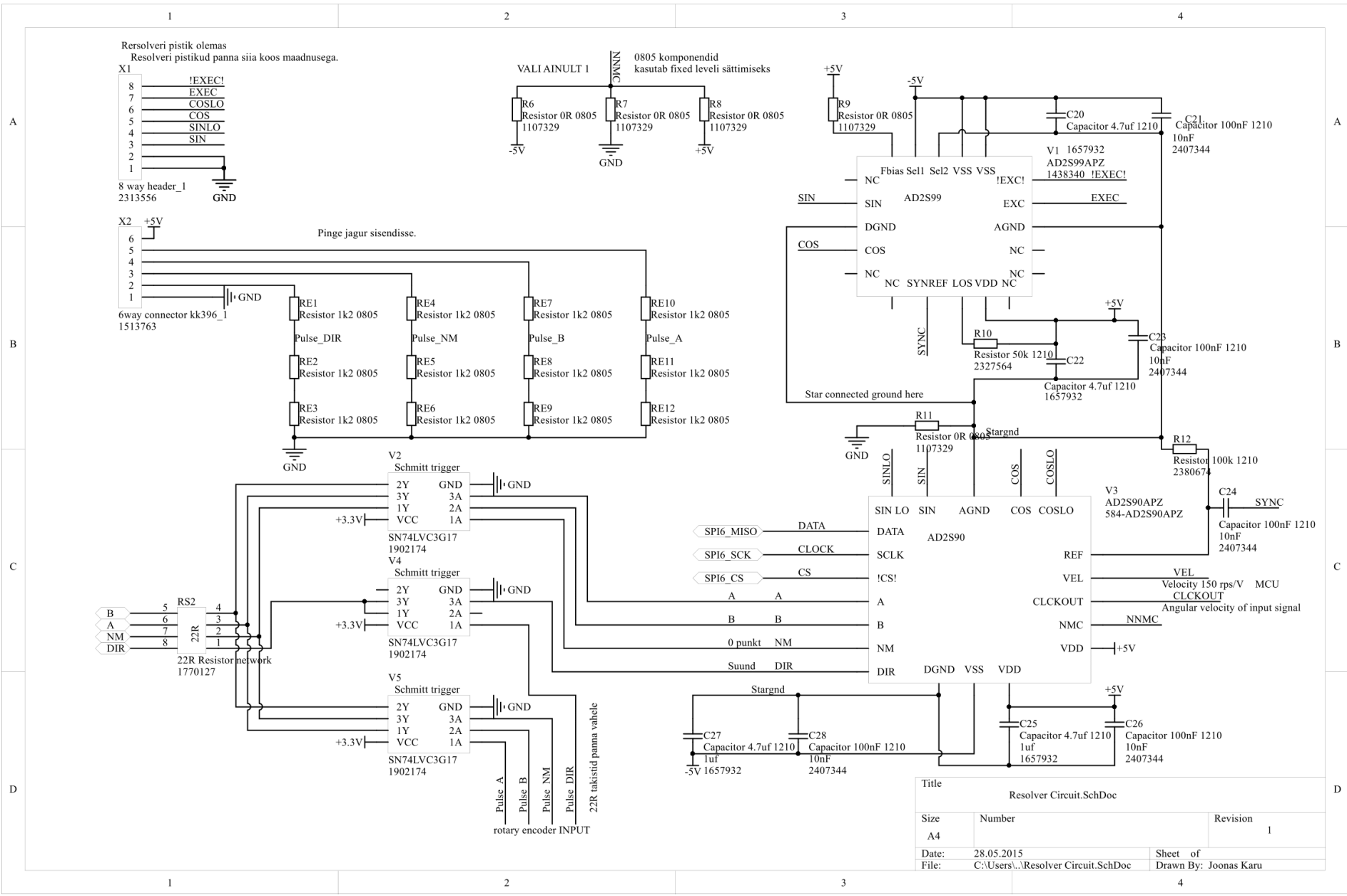


Title			
PWM output.SchDoc			
Size	Number	Revision	
A4		1	
Date:	28.05.2015	Sheet of	
File:	C:\Users\...\PWM output.SchDoc	Drawn By:	Joonas Karu

Resolveri pistik olemas
Resolveri pistikud panna siia koos maadnusega.



Title			Resolver Circuit.SchDoc		
Size	Number			Revision	1
Date:	28.05.2015	Sheet	of		
File:	C:\Users\...\Resolver Circuit.SchDoc	Drawn By:	Joonas Karu		



L.2. Trükkplaat

