

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Elektrotehnika instituut

ATV70LT

Norman Vaga

**Kahe 3-faasilise mootori vektorjuhtimise
võimekusega elektriajami arendus
väikeelektrisõidukitele**

Magistritöö

Instituudi direktor prof. Tõnu Lehtla

Juhendaja PhD Anton Rassõlkin

Lõpetaja Norman Vaga

Tallinn 2016

AUTORIDEKLARATSIOON

Kinnitan, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Varem ei ole selle alusel kutse- ega teaduskraadi ega inseneridiplomit taotletud. Töö on koostatud litsenseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 03.06.2016

..... Norman Vaga

SISUKORD

Autorideklaratsioon	2
Sisukord	3
Magistritöö ülesanne	5
Sümbolite ja tähiste loetelu	9
Sissejuhatus ja motivatsioon	12
1. Tehnika taseme analüüs	14
2. Seadme rakendus	16
2.1 Vajaliku momendi arvutus	16
2.2 Mootor	17
3. Kasutatav topoloogia	20
4. Püsimagnetajamite juhtimisviisid	21
4.1. Trapetsoid kommutatsioon	21
4.2. Siinuseline kommutatsioon	23
4.3. Väljavektorjuhtimine - FOC	24
4.3.1. Anduritevaba vektorjuhtimine	26
4.3.2. FOC mootorijuhtimise lahendused	26
4.3.3. InstaSPIN FOC	27
5. Komponentide valik	31
5.1. Jõutransistorid	31
5.1.1. MOSFET-de kaovõimsuse arvutamise meetod	32
5.1.2. Kaovõimsuste arvutuste tulemused	34
5.2. Jahutus	36
5.3. Tüürahelad	38
5.3.1. Tüürahela toide	41
5.4. Alalisvoolu vahelüli	42
5.5. Toiteahelad	46
5.6. Mikrokontroller	47
5.7. Mõõtmisahelad	48
5.7.1. Pinge mõõtmine	48
5.7.2. Vooluandurid	50
5.8. Andmeside	52
6. Trükkplaadi disain	53

7. Juhtimisalgoritmi koostamine	55
8. Katsetamine	56
10. Puudused ja edasiarendamise võimalused	60
Kokkuvõte	61
Kasutatud kirjandus	63
Lisad	66
Lisa 1. Juhtmooduli skeemid	67
Lisa 2. Jõumooduli skeemid	71
Lisa 3. Alalisvoolu vahelüli skeem	74
Lisa 4. Juhtmooduli komponentide loetelu	75
Lisa 5. Vaheldi komponentide loetelu	77
Lisa 6. Alalisvoolu vahelüli komponentide loetelu	78
Lisa 7. Trükkplaadi joonised	79

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Elektrotehnika instituut

KOOSKÕLASTATUD

Prof. T. Lehtla.....

..... 2016

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

Norman Vaga, üliõpilaskood 144163AAAM

Magistritöö teema: Kahe 3-faasilise mootori vektorjuhtimise võimekusega elektriajami arendus väikeelektrisõidukitele

Ülesanne: Projekteerida mootorikontrolleri riistvara/trükkplaadid. Leida sobivad elektroonika-komponendid lähtudes näidisrakenduse vajadustest.

Lähteandmed:

1. Texas Instruments LAUNCHXL-F28069M arenduskomplekt
2. Texas Instruments BOOSTXL-DRV8301 vaheldi moodul arenduskomplektile
3. Texas Instruments InstaSPIN tehnoloogia mootorite anduriteta vektorjuhtimiseks

Lahendamisele kuuluvate probleemide loetelu:

1. Anna ülevaade väikesõidukite elektriajamitest
2. Valida ahelate topoloogiad ja põhjendada valikut
3. Komponentide valik
4. Kadude arvutused jõuahelates
5. Trükkplaadi projekteerimine
6. Prototüübi kokkupanemine
7. Katsetamine

Juhendaja:

Ülesande vastu võtnud:

A. Rassõlkin

Üliõpilane N. Vaga

ATV70LT

Kahe 3-faasilise mootori vektorjuhtimise võimekusega elektriajami arendus väikeelektrisõidukitele

Norman Vaga, üliõpilaskood 144163AAAM, mai 2016. – 80 lk.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Energeetikateaduskond, elektrotehnika instituut

Töö juhendaja: PhD Anton Rassõlkin

Võtmesõnad: vektorjuhtimine, projekteerimine, mootorikontroller, väikeelektrisõidukid, püsimangetmootorid

Referaat:

Lõputöö on 80 lehel, sisaldab 39 illustratsiooni ja 8 joonist.

Lõputöö eesmärk on tutvuda püsिमagnetmootorite juhtimisega väikeelektrisõidukites ning mootorikontrolleri elektroonika projekteerimine sellise rakenduse tarbeks.

Lõputöö eripäraks on projekteeritava kontrolleri modulaarsus, universaalsus ning võime juhtida kuni kahte kolmefaasilist püsिमagnetmootorit vektorjuhtimise teel. Erinevalt teistest lahendustest on antud kontroller loodud kasutamiseks erinevat liiki väikeelektrisõidukites.

Projekteeritav mootorikontroller koosneb juhtmoodulist ning kuni kahest jõumoodulist. Juhtmoodul on universaalne ning seda on võimalik kasutada erineva tööpinge ja võimsusega süsteemides, kasutades sobivaid jõumoduleid. Antud töös on rakenduseks valitud elektrijalgratas ning jõumoodul on projekteeritud just selleks otstarbeks.

Töö esimese poole peateema on püsिमagnetmootorite juhtimismeetodite uurimine. Uuritud on nende tööpõhimõtteid, riistvaralisi nõudeid, eeliseid ja puuduseid. Antud rakenduse tarbeks on kasutusele võetud vektorjuhtimine. Töös on vektorjuhtimise teostamiseks kasutatud Texas Instrumentsi InstaSPIN tehnoloogiat.

Töö teine pool keskendub ahelate ja elektroonikakomponentide valikule. Põhirõhk on pandud vaheldi jõutransistoridele, nende tüürahelatele ning jahutusele, alalisvoolu vahelüli kondensatoritele, toite- ja mõõteahelatele ning mikrokontrollerile. Seadme projekteerimiseks on kasutatud tarkvara Altium CircuitMaker.

ATV70LT

Разработка электропривода с векторным управлением для малогабаритного электрокара с двумя 3х фазными двигателями

Норман Вага, код студента 144163АААМ, май 2016. – 80 стр.

ТАЛЛИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет энергетики, институт электротехники

Руководитель работы: PhD Антон Рассылкин

Ключевые слова: векторное управление, проектирование, контроллер электродвигателя, малогабаритный электрокар, электродвигатель с постоянными магнитами

Реферат:

Диссертация на 80 страницах, содержит 39 иллюстраций и 8 чертижей.

Главная задача диссертации ознакомится с управлением электродвигателем с постоянными магнитами для малогабаритного электрокара, а так же проектированием электронной части для микроконтроллера.

Главный аспект диссертации модулярность, универсализм и возможность векторного управление двумя электродвигателями с постоянными магнитами при помощи спроектированного контроллера. В отличие от других решений, данный контроллер предназначен для использования в различных малогабаритный электрокарах.

Спроектированный контроллер состоит из модуля управления и двух силовых модулей. Модуль управления является универсальным и может использоваться с различными системами напряжения и мощности, с использованием подходящего силового модуля. В данной диссертации в качестве объекта испытания выбран электровелосипед, силовой модуль предназначен только для этой цели.

Главной задачей первой части диссертации является исследование методов управления электродвигателем с постоянными магнитами. Исследовались их принципы работы и требования к оборудованию, а так же преимущества и недостатки. Для конкретной задачи было выбрано векторное управление. Для реализации векторного управления была использована технология InstaSPIN Texas Instruments.

Вторая часть работы сосредоточена на схеме управления и выборе электронных компонентов. Акцент ставится на силовых транзисторах инвертора, их цепях управления и охлаждения, а так же на конденсаторах, цепях питания и измерительных цепях и микроконтроллера. Для разработки устройства используется программное обеспечение Altium CircuitMaker.

ATV70LT

Motor controller with capability of driving two three-phase permanent magnet motors using vector control

Norman Vaga, student code 144163AAAM, May 2016. – 80 pages

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY * Faculty of Power Engineering

Department of Electrical Engineering

Tutor of the work: PhD Anton Rassõlkin

Key words: vector control, electronic design, motor controller, small electric vehicles, permanent magnet motors

Summary:

Master's thesis is 80 pages, contains 39 illustrations and 8 drawings.

The aim of the thesis is to examine control of permanent magnet motors used in small electric vehicles and to design a motor controller for such application.

The originality of the thesis resides in modularity, universality and capability of driving two three-phase permanent magnet motors using vector control. Unlike other solutions, this controller is meant to be used in different kind of small electric vehicles.

Designed motor controller consists of a control module and up to two powermodules. Control module is universal and can be used in systems with different voltages and power by using suitable powermodule. In this thesis, electric bicycle is selected as application and powermodules are designed for such system.

The main topic of first half of the thesis is examination of control methods of permanent magnet motors. Their working principles, hardware requirements, advantages and disadvantages are studied. Vector control is chosen for selected application. Texas Instruments InstaSPIN technology is used for implementing vector control.

Second half of the thesis concentrates on selection of circuits and electronic components. Emphasis is put on power transistors, their drivers and cooling, DC-link capacitor, supply and measurement circuits and microcontroller. Altium CircuitMaker is used for designing this device.

SÜMBOLITE JA TÄHISTE LOETELU

A	Kontaktpinna pindala [m^2]
a	Sõiduki kiirendus [m/s^2]
BEMF	Vastuelektromotoorjõud [V]
BJT	Bipolaartransistor
BLDC	Harjadeta alalisvoolumootor
CAN	sõiduki juhtimissiini standard (ing. k. Controller Area Network)
$\cos(\varphi)$	Võimsustegur
$\cos(\varphi 1)$	Faasinihkest põhjustatud võimsustegur (ingl. k. displacement power factor)
CSI	Vooluvaheldi
d	Isoleermaterjali paksus [m]
E_{offM}	MOSFETi väljalülitamiseks kuluv energia [J]
E_{onD}	Diodi sisselülitamiseks kuluv energia [J]
E_{onM}	MOSFETi sisselülitamiseks kuluv energia [J]
FOC	Väljavektorjuhtimine
f_{sw}	Jõutransistoride lülitussagedus [Hz]
g	Raskuskiirendus $9,81 m/s^2$
I_{cap}	Alalisvoolu vahelüli kondensaatorit läbiv ruutkeskmise vool [A]
I_{DCekv}	Ekvivalentne alalisvool inverteeri väljundis [A]
I_{Doff}	MOSFETi neeluvool enne väljalülitamist [A]
I_{Don}	MOSFETi neeluvool peale sisselülitamist [A]
I_G	MOSFETi paisuvool [A]
IGBT	Isoleeritud paisuga bipolaartransistor
I_{Goff}	MOSFETi paisuvool Miller-i efekti mahtuvuse tühjenemisel [A]
I_{Gon}	MOSFETi paisuvool Miller-i efekti mahtuvuse laadimisel [A]
I_o	Vaheldi väljund faasivoolu amplituud [A]

k	Materjali termiline juhtivus [W/m*K]
KJ	Kiirendusjõud [N]
KNJ	Kaldenurgast tingitud jõud [N]
Kv	Vastuelektomotoorjõu konstant [V/rpm]
KvT	Veeretakistuse koefitsent
m_a	Moduleerimisindeks
$m_{Icap(max)}$	Modulatsiooniindeks, mis vastab maksimaalsele alalisvoolu vahelüli pulseerivale voolule mingi faasinurga korral
MOSFET	Isoleeritud paisuga väljatransistor
n	Pöörlemissagedus [rpm]
θ	Termiline takistus [K/W]
$\theta_{JSkokku}$	Kõikide jõutransistoride ja neil asetsevate isolaatorite ekvivalentne termiline takistus [K/W]
θ_{kalle}	Tõusu kaldenurk [°]
P_{CD}	Tagasivooludiodi juhtivuse kaovõimsus [W]
P_D	Diodi kogu kaovõimsus [W]
P_{CM}	MOSFETi juhtivuse kaovõimsus [W]
P_{kokku}	Summaarne jõutransistoride kaovõimsus [W]
P_M	MOSFETi kogu kaovõimsus [W]
PMSM	Püsimagnetitega sünkroonmootor
P_{swD}	Diodi lülitamise kaovõimsus [W]
P_{swM}	MOSFETi lülitamise kaovõimsus [W]
Q_G	MOSFETi paisu kogulaeng [C]
Q_{GD}	MOSFETi paisu ja neelu vaheline laeng [C]
Q_{GS}	MOSFETi paisu ja lätte vaheline laeng [C]
Q_{rr}	Diodi taastumiseks kuluv laeng [J]
Q_{sw}	MOSFETi lülitamiseks kuluv laeng [J]
r	Ratta raadius [m]

R_D	Diodi juhtiva oleku takistus [Ω]
R_{DSon}	MOSFETi juhtiva oleku neelu ja lättevaheline takistus [Ω]
R_G	Tüürahela takistus [Ω]
R_h	Laagrite hõõrdetegur
SJ	Summaarne jõud, mis on sõiduki liikumiseks vaja rakendada [N]
SKK	Sõiduki kogukaal [N]
SPWM	Siinuseline pulsilaiusmoduleerimine
SVM	Ruumivektori moduleerimine
T	Moment [Nm]
T_A	Ümbritseva keskkonna temperatuur [K]
t_{fi}	MOSFETi neeluvoolu langemise aeg väljalülitamisel [s]
t_{fu}	MOSFETi neelu ja lättevahelise pinge langemise aeg sisselülitamisel [s]
T_{Jmax}	MOSFETi siirde maksimaalne lubatud temperatuur [K]
tri	MOSFETi neeluvoolu tõusmise aeg sisselülitamisel [s]
tru	MOSFETi neelu ja lättevahelise pinge tõusmise aeg väljalülitamisel [s]
u_{D0}	Diodi sisselülitatud oleku nullvoolu pinge [V]
U_{DC}	Alalisvoolu vahelüli pinge [V]
U_{DD}	Vaheldi sisendpinge [V]
U_{Dr}	MOSFETi tüürahela lülituspinge [V]
U_{Drr}	Pinge diodil taastumise hetkel [V]
U_{GS}	MOSFETi paisu ja läte vaheline pinge [V]
$U_{GS(plateau)}$	MOSFETi Miller-i efekti paisu ja läte vaheline pinge platoo väärtus [V]
$U_{GS(th)}$	MOSFETi juhtima hakkamise paisu ja läte vaheline pinge lävi [V]
U_{puls}	Ruutkeskmise pulsatsiooni pinge alalisvoolu vahelüli [V]
VSI	Pingevaheldi
VTJ	Veeretakistusjõud [N]

SISSEJUHATUS JA MOTIVATSIOON

Elektrijamitega sõiduvahendite arv on pidevas kasvamises. Trammide ja trollide kõrval suureneb pidevalt ka elektriautode arv. Peale nende on olemas ka väiksemad elektrilised sõiduriistad nagu elektrijalgrattad, kardid, elektrilised ratastoolid, golfikärud, elektriroллерid, tasakaaluliikurid ja muud väiksemad sõidukid. Alalisvoolumootorite kasutamine on nende hinna ja väiksema töökindluse tõttu vähenenud ning nüüd on peamiselt kasutuses 3-faasilised vahelduvvoolu mootorid. Kui suurtes elektrisõidukites on peamiselt kasutusel asünkroonmootorid siis väikesõidukites on kasutusel madalapingelised püsिमagnetitega sünkroonmootorid (ka harjadeta alalisvoolumootorid kuuluvad siia). Nende eelis on suur võimsustihedus, tänu millele saab ehitada võimalikult väikeseid ja kergeid sõidukeid. Nende mootorite juhtimine on aga palju keerulisem ning vajab keerukamat elektroonikat kui alalisvoolu mootorid. Et vahelduvvoolu mootorit käiata, on peale elektroonika vaja ka algoritmi, mille abil mootori mähiseid pingestatakse õigetel hetketel.

Elektriautode ajamisüsteeme on aastaid arendatud. Nende elektroonilistes lahendustes kasutatakse uusimaid tehnoloogiaid ning nende juhtimis-algoritmid tagavad mootori soositud käitumise. Enamus praegustest väikeelektrisõidukitest kasutab aga küllaltki lihtsaid ja odavaid kontrollereid. Neil kasutatav algoritm kasutab mootori pöörlema ajamiseks skalaarjuhtimist. Enamus juhtudel skalaarjuhtimine on piisav, kuid vektorjuhtimisel on mõned selged eelised. Kasutaja jaoks võivad need olla vaiksem sõiduk, stabiilsem liikumine madalatel ja suuritel kiirustel ning pikem akukestvus.

Enamik olemasolevatest mootorikontrolleri lahendustest võimaldavad vaid ühte mootorit korraga juhtida. Siiski on paljudes rakendustes kaks või enam mootorit. Need võivad olla kahe rattaveoline elektrijalgratas, elektriline ratastool, tasakaaluliikur. Sellistel juhtudel on praegu kasutuses kaks eraldiseisvat mootorikontrollerit. Selline lahendus vajab ka ruumi, mida väikestel sõidukitel tihti peale pole raisata. Selle kaotsi läinud ruumi asemel saaks suurendada aku mahtuvust ning pikeneks läbisõit ühe laadimisega. Kui need kaks kontrollerit asendada sellisega, mis võimaldaks juhtida mõlemat mootorit korraga, oleks võimalik säästa ruumi, massi ning võib-olla ka raha.

Antud töö eesmärgiks on projekteerida mootorikontroller, mis on võimeline juhtima kahte mootorit kasutades vektorjuhtimist. Peaesmärk on disainida elektroonika. Eesmärgiks on luua modulaarne mootorikontroller, kus oleks üks juhtimismoodul ning kuni kaks vaheldi moodulit.

Vaheldi mooduleid on võimalik valida erinevate mootorite võimsuste ja toitepingete järgi. Sedasi on võimalik vähendada süsteemi kaovõimsusi ning maksumust. Sellist kontrolleri on võimalik kasutada ka rakendustes, kus esialgselt on süsteemis ainult üks mootor, kuid on jäetud võimalus hiljem süsteemi lisada ka teine mootor, lisades teise vaheldimooduli. Modulaarse disaini eeliseks on ka remonditavus, mille korral saab vigase mooduli kergesti välja vahetada.

Tarkvaraline lahendus ei ole selle töö peaeesmärk. Tarkvara osa eesmärk on vaid näidata mootorikontrolleri põhifunktsionaalsust, s.o. mootori pöörlema ajamine, kiiruse muutmine, mootori parameetrite leidmine.

Motivatsioon töö tegemiseks pärineb isiklikust huvist elektrirataste vastu. Kuigi projekteeritav kontrolleri on võimeline töötama erinevates rakendustes, on ehitatava mudeli võimekus valitud sobivaks just tänavasõidu elektriratastel kasutamiseks.

1. TEHNIKA TASEME ANALÜÜS

Kirjanduse uurimise ja turu-uuringu käigus selgus, et universaalset mootorikontrollerit väikeelektrisõidukitele ei ole olemas või on raskesti leitav. Igaletüüpi sõidukile on spetsiifilised kontrollid:

- Elektrirataste kontrollid
- Tasakaalusõidukite/segway kontrollid
- Ratastooli kontrollid
- Golfikäru kontrollid
- Elektrirula kontrollid
- Laotõstuki kontrollid

Kõigil neil on piiratud sisendite arv ja funktsioon, mis takistavad nende kasutamist teistes rakendustes.

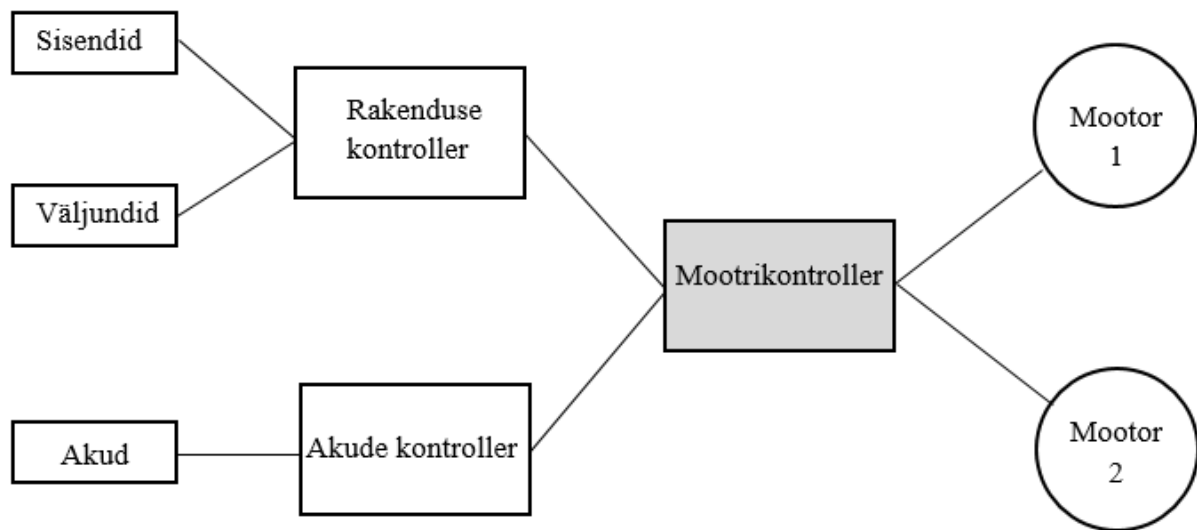
Selles töös ehitatav kontrollid sarnaneb kõige enam elektrirataste kontrollid. Enamus teiste sõidukite kontrollid on spetsiaalselt ehitatud juhtima kindlaid mootoreid ja koormuseid ning ei ole saadaval riiulikaubana.



Joonis 1.1. Tavapärase elektrijalgratta mootorikontroller [1]

Üks omadus, mis eristab ehitatavat kontrollid elektrirataste kontrollidest, on otseste sisendite puudumine. Sisendid ühenduvad eraldiseisvasse rakenduse kontrollidesse/juhtarvutisse. Rakenduse kontrollid on üle andmeside ühendatud mootorikontrolleriga. Sellisel juhul on mootorikontroller kasutatav ka teistes rakendustes. Erinevates rakendustes kasutamiseks on

vajalik vaid rakenduse kontrolleri vahetus või ümberprogrammeerimine. Joonisel 1.2. on kujutatud süsteemi osade põhimõtteskeemi.



Joonis 1.2. Põhimõtteskeem rakenduse ülesehitusest

Kuna enamus väikeelektrisõidukeid kasutab püsिमagnetmootoreid, siis on saadavalolevad mootorikontrollerid mõeldud juhtima just seda tüüpi mootoreid. Püsिमagnetmootorid vajavad töötamiseks elektroonilist kommutatsiooni. Laiatarbe kontrollerid kasutavad mootorite kommuteerimiseks skalaarjuhtimist. Enamlevinumad skalaarjuhtimise liikidest (olenevalt mootori tüübist – BLDC või PMSM) on trapetsoid- ja siinusjuhtimine. Enamus elektrirattaid kasutab kommuteerimiseks trapetsoidjuhtimist ning siinusjuhtimisele on alles hiljuti hakanud tähelepanu koguma [2].

Püsिमagnetmootoreid on võimalik juhtida ka vektorjuhtimise teel. Sellist juhtimismeetodit on tööstuses kasutatud juba kaua aega, kuid väikeelektrisõidukites on see haruldus. Vektorjuhtimise eeliseks sellises rakenduses võib pidada pikemat läbisõitu, paremat mootori ressursi kasutust ja stabiilsemat ning vaiksemat mootori tööd. Sellise võimekusega kontrollerid on vähelevinud ning nende seadistamine on keerukam. Praegu on vektorjuhtimise võimekus eelkõige kallimatel ja suure sooritusvõimega kontrolleritel. Paljud suuremad tootjad alles arendavad sedalaadi kontrollereid [3].

2. SEADME RAKENDUS

Selle töö eesmärgiks on ehitada mootorikontrolleri prototüüp, millel on piisav võimekus juhtida kahe rattaveolist elektrijalgratast.

Andmed rakenduse kohta:

- Jalgrattal on kaks mootorit, üks esirattal ja teine tagarattal.
- Täismass m on 130 kg
- Rataste raadius r on 30 cm
- Maksimaalne kiirus v_{max} on 30 km/h
- Maksimaalne kiirendus a on 1 m/s^2

2.1 Vajaliku momendi arvutus

Mootorikontrolleri võimekuse määramiseks on vaja teada, kui võimsat mootorit vajab antud rakendus. Järgnevate valemite [4] alusel on välja arvatud vajalik moment sõiduki liigutamiseks.

$$VTJ = SKK * K_{VT}, \quad (2.1)$$

kus VTJ on veeretakistusjõud [N], SKK on sõiduki kogukaal [N], K_{VT} on veeretakistuse koefitsient (leitav tabelist 2.1).

$$KNJ = SKK * \sin\theta_{kalle}, \quad (2.2)$$

kus KNJ on kaldenurgast tingitud jõud [N], θ_{kalle} on kaldenurk [°].

$$KJ = SKK/g * a, \quad (2.3)$$

kus KJ on kiirendusjõud [N], g on raskuskiirendus $9,81 \text{ m/s}^2$, a on sõiduki kiirendus [m/s^2].

$$SJ = VTJ + KNJ + KJ, \quad (2.4)$$

kus SJ on summaarne jõud [N], mis on sõiduki soovitud viisil liikumiseks vajalik.

$$T = Rh * SJ * r, \quad (2.5)$$

kus T on moment ratta völlil [Nm], R_h laagrite hõõrdetegur, r on ratta raadius [m].

Võttes veeretakistuse koefitsiendiks 0,017, kaldenurgaks null kraadi on eelnevate andmete ja valemite põhjal arvatud vajalikuks momendiks 52,3 Nm.

Tabel 2.1. Veerehõõrde koefitsiendid [4]

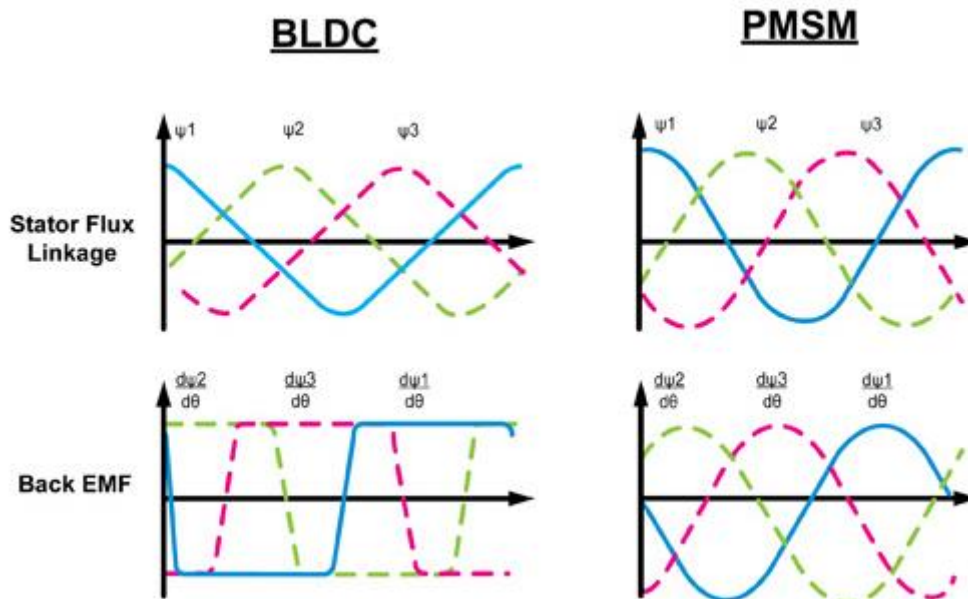
Kontaktpinna tüüp	Veerehõõrde koefitsient C_{rr}
Betoon (hea/keskmine/halb)	0.010 / 0.015 / 0.020
Asfalt (hea/keskmine/halb)	0.012 / 0.017 / 0.022
Puit (kuiv/tolmune/märg)	0.010 / 0.005 / 0.001
Lumi (2 tolli/4 tolli)	0.025 / 0.037
Pinnas (tasane/liivane)	0.025 / 0.037
Muda (kõva/keskmine/pehme)	0.037 / 0.090 / 0.150
Rohi (kõva/pehme)	0.055 / 0.075
Liiv (kõva/pehme/sõmer)	0.060 / 0.150 / 0.300

Kuna antud rakenduses kasutatakse kahte mootorit ja eeldatakse, et koormus on jagatud esi- ja tagaratta vahel võrdselt, on ühe mootori vajalik moment 26,15 Nm.

2.2 Mootor

Elektrisõidukite rakendusse sobivad püsिमagnetmootorid paremini kui teist tüüpi mootorid. Selliste mootorite kasutamise eeliseks on väiksem ruumi- ja energiakulu ning suurem erivõimsus. Seega sobivad need eriti hästi väikeelektisõidukitesse [5].

Kirjanduses kasutatavad lühendid püsिमagnetmootorite kohta on kohati erinevad ning võivad põhjustada segadust. Antud töös kasutatakse trapetsoid kujulise vastuelektromotoorjõu kujuga mootorite ehk harjadeta alalisvoolu mootorite kohta lühendit BLDC (Brushless DC) ning siinuselise vastuelektromotoorjõu kujuga mootorite kohta PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor). Nende kahe mootoritüübi signaalikujude erinevus on kujutatud joonisel 2.1.



Joonis 2.1. BLDC ja PMSM mootorite erinevused [6]

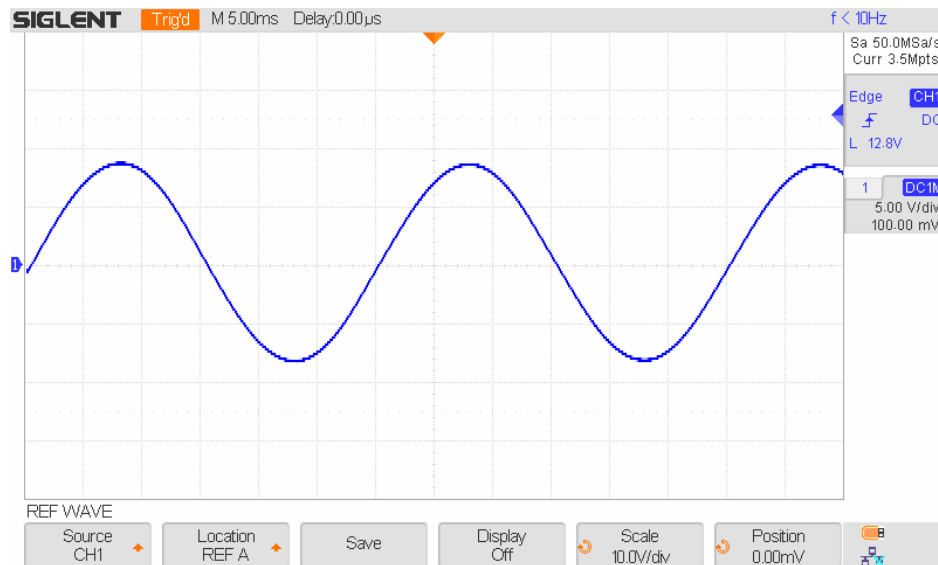
Eelnevalt arvutatud sõitmiseks vajalik moment mootori kohta on 26,15 Nm. Antud töös on katsetamiseks valitud Hiina päritolu RisunMotor 2016 1000W 48V (joonis 2.2). Tegemist on ülekandeta rummumootoriga.

Rummumootorite kohta on saadaval piiratud koguses informatsiooni. Mootori andmetest on teada vaid: kontrolleri toitepinge 48 V (24-60 V), võimsus 1000 W, maksimaalne kiirus 480 rpm, maksimaalne moment 32 Nm. Pooluspaaride arv 23 on leitud mootori lahti võtmise teel. Töös olevates arvutustes on teadmata parameetrite (nt võimsustegur) kohta tehtud oletused.



Joonis 2.2. Elektrijalgratta rummumootor

Kasutatava mootori vastuelektromotoorjõu signaalikuju on leitud katseliselt, kasutades ostsilloskoopi Siglent SDS1102X. Katse tulemusena selgus, et kasutatava mootori vastuelektromotoorjõu kuju on siinus (joonis 2.3). Selle põhjal võib seda pidada PMSM mootoriks.



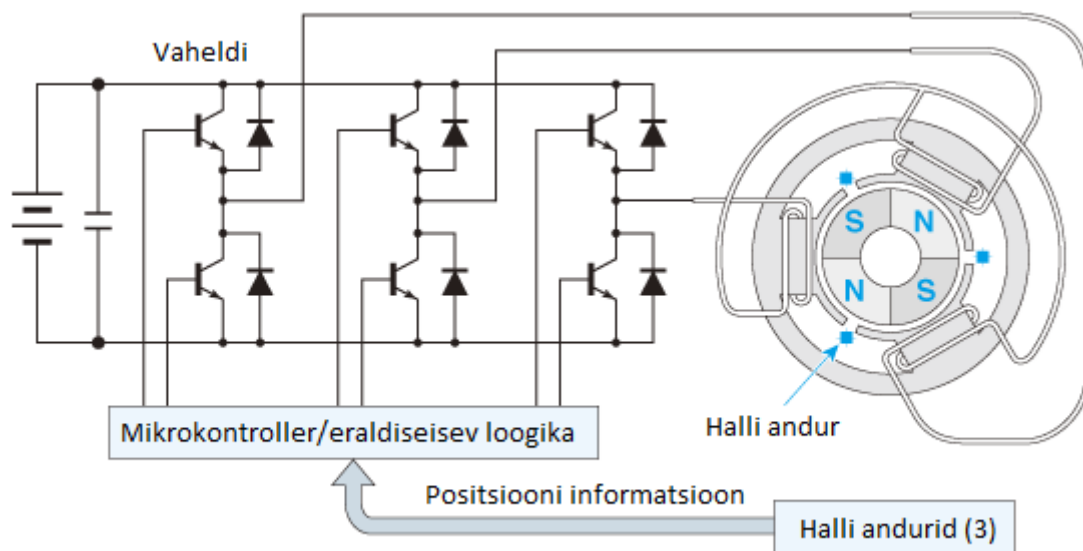
Joonis 2.3. Kasutatava mootori vastuelektromotoorjõu signaalikuju

3. KASUTATAV TOPOLOOGIA

Kolmefaasiliste mootorite juhtimiseks on vajalik vaheldi. Mootorite juhtimiseks saab kasutada nii vooluvaheldit (CSI) kui ka pingevaheldit (VSI). Siiski on leitud, et pingevaheldil on mõned eelised vooluvaheldi ees [7]:

- Väiksemad kaod
- Parem töökindlus
- Kiirem dünaamiline reageerimine
- Mootori võimekuse maksimaalselt ära kasutamine

Antud süsteemis on kasutusele võetud kolmefaasiline pingevaheldi. Tavapärase akutoitega harjadeta alalisvoolumootori ajamisüsteemi iseloomustab joonis 3.1.



Joonis 3.1. Harjadeta alalisvoolumootori akutoitega ajamisüsteem [8]

Kolmefaasiline pingevaheldi koosneb kuuest jõulülitist (Tavaliselt IGBT või MOSFET) ja antiparalleelsetest diodidest. Jõulülitite lülitamisel pulsilaiusmodulatsiooni teel saadakse alalispingest sobiva amplituudi ja sagedusega vahelduvpinge.

Süsteemi juurde kuulub ka alalisvoolu vahelüli (DC-link), mille eesmärk on energia salvestamine, pinge stabiliseerimine.

Jõulülitite, alalisvoolu vahelüli kondensaatorite ja teiste süsteemi tähtsamate osade valikut ja selle põhjendust käsitletakse töö edasises osas (peatükk 5).

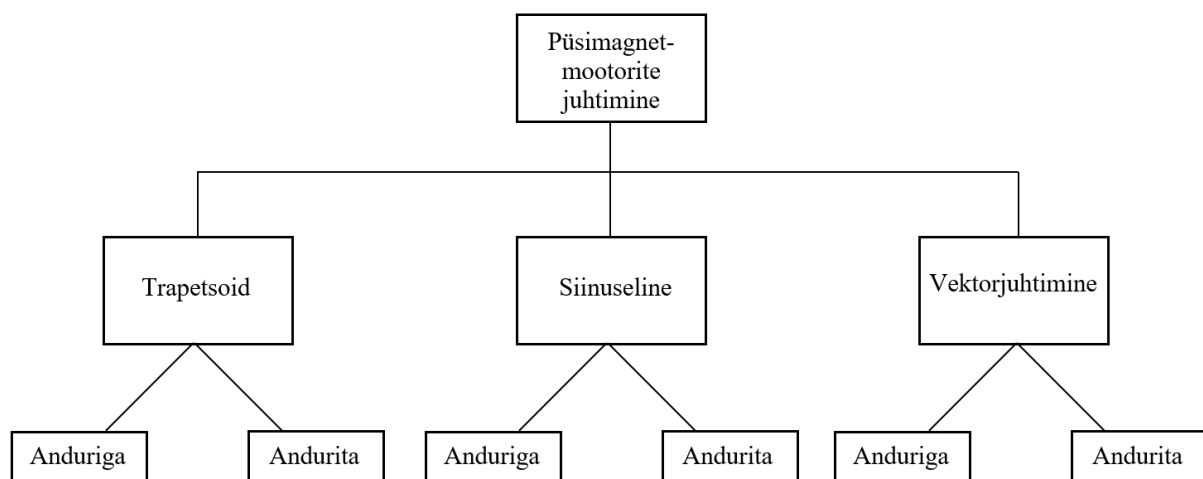
4. PÜSIMAGNETAJAMITE JUHTIMISVIISID

Eelmises peatükis kujutatud ajamisüsteemi juhtimiseks on mitu erinevat meetodit (joonis 4.1).

Püsimagnetmootorite kommuteerimise kolm põhiliiki on:

- Trapetsoid ehk 6-astmeline kommuteerimine
- Siinuseline kommuteerimine
- Vektorjuhtimine

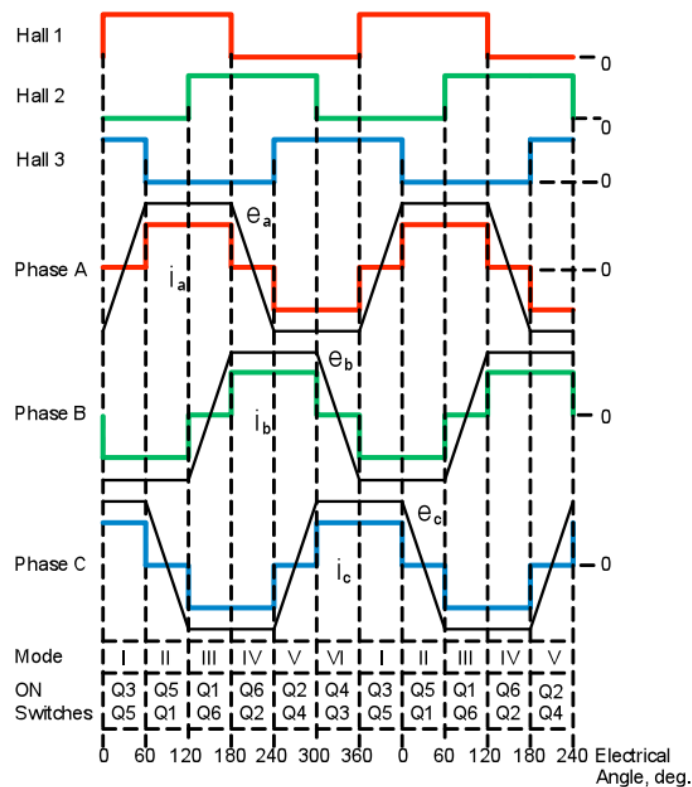
Kõiki neid juhtimisviise on võimalik teostada kas positsioonianduritega või ilma.



Joonis 4.1. Püsimagnetmootorite juhtimisvõimalused

4.1. Trapetsoid kommutatsioon

Trapetsoid kommuteerimine on väga populaarne oma algoritmi lihtsuse tõttu. Mootori kommuteerimise protsess on Halli anduritest pärineva positsiooni infomatsiooni alusel jagatud kuueks astmeks (joonis 4.2). Iga astme (60 elektrilist kraadi) ajal on korraga sisse lülitatud üks paar jõulüliteid. Erinevate faaside lülitamine tuleneb mootori pöörlemisest põhjustatud positsioonisignaali muutumisest. Selline meetod on väga efektiivne juhtima mootori kiirust, kuid omab momendi värelust, eriti madalatel kiirustel [9].



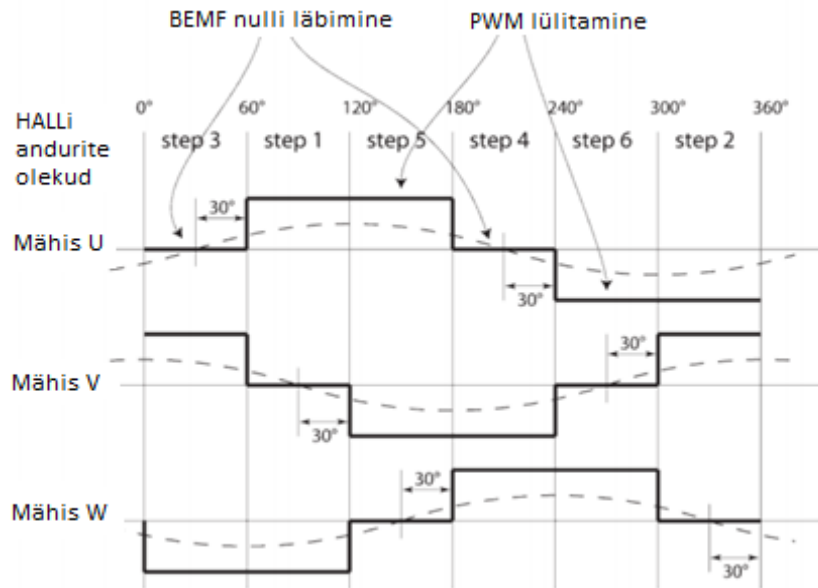
Joonis 4.2. Kuueastmeline ehk trapetsoid kommuteerimine Halli anduritega [9]

Osad kontrollid on võimelised töötama ka ilma Halli anduriteta. Selleks kasutatakse vastuelektromotoorjõudu. Mootori pöörlemisest tingituna indutseeritakse mootori mähistes vastuelektromotoorjõud. Kui kaks mootori mähist on samaaegselt sisse lülitatud, siis kolmas mähis on avatud. Lülitamata olekus mähist kasutatakse vastuelektromotoorjõu väärtuse määramiseks. Kommuteerimiseks vajalik signaal (virtuaalne Halli andur) saadakse kui vastuelektromotoorjõud lõikub poole toitepinge väärtusega (BEMF zero-crossing). Kui füüsiliste Halli andurite signaal on faasis astme muutusega, siis vastuelektromotoorjõu lõikumine on 30° võrra nihkes (joonis 4.3). Seega virtuaalse Halli anduri signaal tuleb kalkuleerida.

Kuna vastuelektromotoorjõud saab tekkida vaid mootori pöörlemisel, siis mootori liikuma ajamisel seisuasendist on endiselt vaja andureid. Vastuelektromotoorjõu väärtus on kirjeldatav järgneva valemiga [10].

$$BEMF = K_v * n, \tag{3.1}$$

kus $BEMF$ on vastuelektromotoorjõud [V], K_v on vastuelektromotoorjõu konstant [V/rpm], n on mootori pöörlemiskiirus [rpm].



Joonis 4.3. Vastuelektromotoorjõu nulli läbimise ja Halli andurite signaalide erinevus

4.2. Siinuseline kommutatsioon

PMSM mootorite puhul, mille vastuelektromotoorjõud on siinuseline, on otstarbekas kasutada siinuselist kommutatsiooni. Trapetsoidi kujuline modulatsioon on asendatud siinuselisega. Sedasi on võimalik vähendada momendi värelost ning suurendada juhtimise täpsust [11].

Kui trapetsoid kommuteerimisel oli korraga avatud 1 paar jõulüliteid ning pingestatud ainult üks faas, siis siinuselise signaali saamiseks on vaja, et faaside kommuteerimisel tekiks ülekattumine. Selleks peab selektiivselt sisse lülitama rohkem kui ühe paari jõulüliteid. Kommuteerimiseks vajalik informatsioon pärineb positsioonianduritest [9].

Siinuseline kommutatsioon on võimalik ainult piisavalt suure resolutsiooniga rootori positsiooni tagasiside korral. Kuna faasivoolud on siinused, mis on funktsioonid rootori positsioonist, on vaja piisavalt detailsust. Kuna rootori magnetite absoluutne asukoht on vajalik, on vaja kasutada absoluutset tagasisidet [12].

Absoluutse tagasiside kalliduse tõttu kasutusele võetud kaks meetodit rootori absoluutse positsiooni määramiseks [12]:

- Halli anduritega absoluutse positsiooni määramine käivitamisel ning seejärel inkrementaalse tagasiside kasutamine suurema resolutsiooni saamiseks.
- Rootori elektrilise nurga leidmine ainult inkrementaalset tagasiside abil, kasutades spetsiaalset „faasi leidmise“ rutiini.

Teine meetod on kasutatav vaid juhul kui mõningane kontrollimatu pöörlemine on käivituses lubatud.

4.3. Väljavektorjuhtimine - FOC

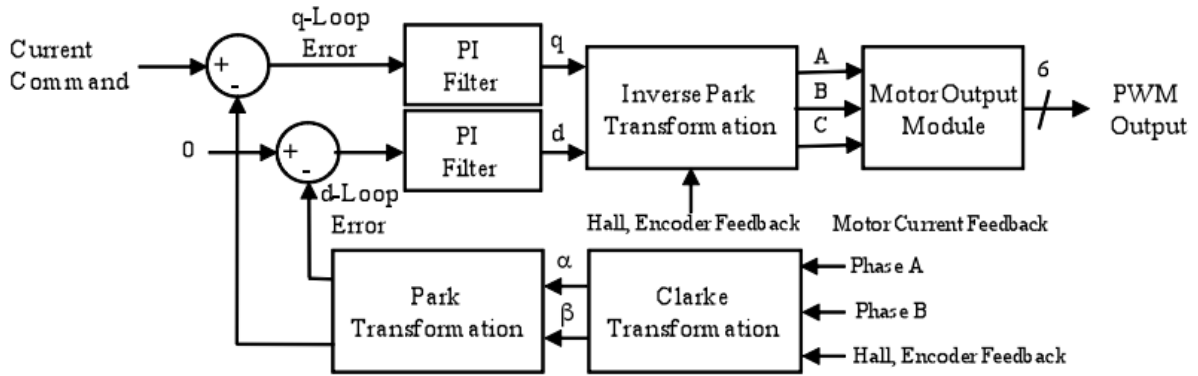
Viimase kümnendi jooksul on väljavektorjuhtimine (FOC – Field Oriented Control) kasutusele võetud nii PMSM kui ka BLDC mootorite juhtimisel. FOC on kasutatav positsioonianduritega kui ka ilma [11].

Väljavektor juhtimise korral kommuteeritakse mootorit, kalkuleerides pinge ja voolu vektorid, kasutades mootori faasivoolude tagasisidet. FOC juhtimise korral on kasutegur suur laias töövahemikus ning võimaldab täpset dünaamilist kiiruse ja momendi juhtimist [9].

Erinevate kommuteerimismeetodite võrdlus on kujutatud tabelis 4.1.

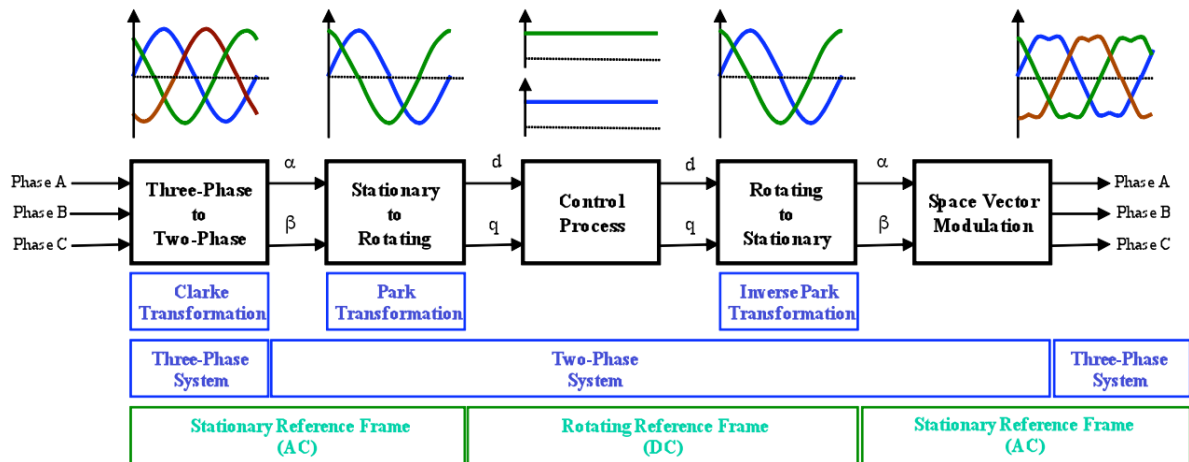
FOC-i korral juhitakse staatori voolusid, mis on kujutatud ruumivektoritena. Vektorjuhtimise korral jagatakse kolmefaasilised staatori voolud magnetvoogu genereerivaks osaks ja momenti genereerivaks osaks ning juhitakse neid mõlemaid eraldi [9].

Vektorjuhtimise põhimõtteskeem on kujutatud joonisel 4.4. Taustsüsteemi teisendused on kujutatud joonisel 4.5. Clarke'i teisendused muundavad kolmefaasilise siinuselise süsteemi (A , B , C) kahefaasiliseks (α , β) aeg-muutuvaks süsteemiks. Kahekoordinaadiline aeg-muutumatu süsteem (d , q) saadakse kasutades Park'i teisendusi. Selles süsteemis d on magnetvoogu genereeriv osa ning q on momenti genereeriv osa [9].



Joonis 4.4. Vektorjuhtimise plokkiagramm [9]

Et mootorit realselt käiata on vaja d ja q komponendid tagasi teisendada staatori taustsüsteemi ning kasutada neid koos ruumivektori pulsilaiusmodulatsiooniga (SVM) [11].



Joonis 4.5. Tasusüsteemide teisendused vektorjuhtimise süsteemis [9]

Tabel 4.1. Erinevate kommutatsiooni meetodite võrdlus [9]

Kommutatsiooni meetod	Kiiruse juhtimine	Momendi Juhtimine		Vajalikud tagasiside seadmed	Algoritmi keerukus
		Väike kiirus	Suur kiirus		
Trapetsoid	Suurepärase	Momendi väreelus	Efektive	Halli andurid	Lihtne
Siinuseline	Suurepärase	Suurepärase	Ebaefektive	Enkooder, resolver	Keskmine
FOC	Suurepärase	Suurepärase	Suurepärase	Vooluandurid, enkooder	Keeruline

4.3.1. Anduritevaba vektorjuhtimine

Et FOC juhtimissüsteemi saaks rakendada, on vaja teada ruuminurka rootori välja ja staatori teljestikus fikseeritud punkti vahel. Traditsiooniliselt saadakse see nurk mootori võllile kinnitatud enkooderi või resolveri abil. Need andurid võimaldavad head nurga tagasisidet, kuid neil on mitmed puudused [13]:

- Mehaanilised andurid on kallid
- Tihti vajavad andurid eraldi toidet
- Lisatöö anduri paigaldamisel
- Häiringukindlate kaablite ja pisikute vajadus
- Andurid on süsteemi kriitiline osa ning võivad vähendada süsteemi töökindlust

Nendel ja paljudel muudel põhjustel tahetakse mehaanilised andurid süsteemist eemaldada. Mootori välja nurga kohta on võimalik saada informatsiooni ka kontrolleris juba olemas olevate signaalide töötamise põhjal. Sünkroonmootorite korral, enamus anduriteta vektorjuhtimise meetodid kasutavad mootori mudelit, et hinnata vastuelektromotoorjõu väärtusi. Saadud tulemusi töödeldes saab eraldada eeldatava rootori nurga ning selle muutumise kiiruse. Asünkroonmootori korral on protsess keerulisem, kuna mootori tarkvaraline mudel peab arvesse võtma ka mootori libistuse [13].

4.3.2. FOC mootorijuhtimise lahendused

Mitmed mikrokontrollerite tootjad pakuvad valitud kontrolleritele lahendusi kolmefaasiliste mootorite anduritevabaks FOC juhtimiseks. Tabelis 4.2 on välja toodud erinevate lahenduste võrdlus mõnes valikut tegemist mõjutavas kategoorias.

Uuritud lahenduste seast pakub Texas Instrumentsi lahendus InstaSPIN võimalust juhtida kõige rohkem erinevaid mootorite tüüpe. Samuti võimaldab see mootori parameetrite tuvastust. Need omadused on tähtsad tagamaks mootorikontrolleri universaalsust.

Erinevate lahenduste uurimisel järel tekkis subjektiivne arvamus, et Texas Instrumentsi lahenduse kohta on kõige parem dokumentatsioon. Samuti pakub Texas Instruments labori materjalide näol võimalust praktilisteks harjutusteks riistvara peal.

Tabel 4.2. Erinevate tootjate vektorjuhtimise lahenduste võrdlus

Tootja	TI	ST	Infineon
Lahendus	InstaSPIN FOC	STM32F FOC SDK	DAVE™ Motor Control Apps
Mitu mootorit toetab	2	2	2
Mootorite tüübid	BLDC, PMSM, ACIM, IPM	BLDC, PMSM	BLDC, PMSM, ACIM
Mootori parameetrite tuvastus	Jah	Jah	Ei

4.3.3. InstaSPIN FOC

Nii sünkroonmootorite kui ka asünkroonmootorite anduriteta FOC juhtimise korral süsteemi jõudlus väheneb madala kiiruse korral. See on tingitud asjaolust, et vastuelektromotoorjõu suurus on proportsionaalses seoses mootori pöörlemiskiirusega. Seega madalatel kiirustel hajub vastuelektromotoorjõu signaal mürrasse ning rootori nurga leidmine osutub keerukaks [13].

Enamusel anduriteta FOC juhtimisel meetoditel on järgmised puudused [13]:

- Madal jõudlus väikestel kiirustel
- Madal jõudlus suurtel kiirustel
- Väike dünaamilisus
- Kalkulatsioonide rohkus
- Parameetri tundlikkus
- Mootori mudeli muutmise vajalikkus

InstaSPIN-FOC on Texas Instrumentsi poolt välja töötatud lahendus kolmefaasiliste mootorite juhtimiseks. Selle eesmärk on lihtsustada väljavektorjuhtimisega mootorikontrollerite areendusprotsessi. InstaSPIN-FOC hõlmab endas Texas Instrumenti patenteeritud ühtse mootorimudeli struktuuri FAST ning kõiki väljavektorjuhtimiseks vajalikke osi. Nendeks on Clarke'i ja Park'i teisendused ning vajalikud PI regulaatorid.

InstaSPIN-FOC võimaldab momendi ja kiiruse järgi juhtimist ning mootori parameetrite leidmist. Mootori parameetrite leidmiseks on vaja vaid üksikuid nimiaandmeid. Leitud parameetrid võimaldavad automaatselt seadistada momendi ja kiiruse PI regulaatorite tegurid. Sedasi on võimalik mootor hõlpsasti pöörlema panna, kuid parima tulemuse saavutamiseks on võimalik kasutajal sooritada täppisreguleerimist [11].

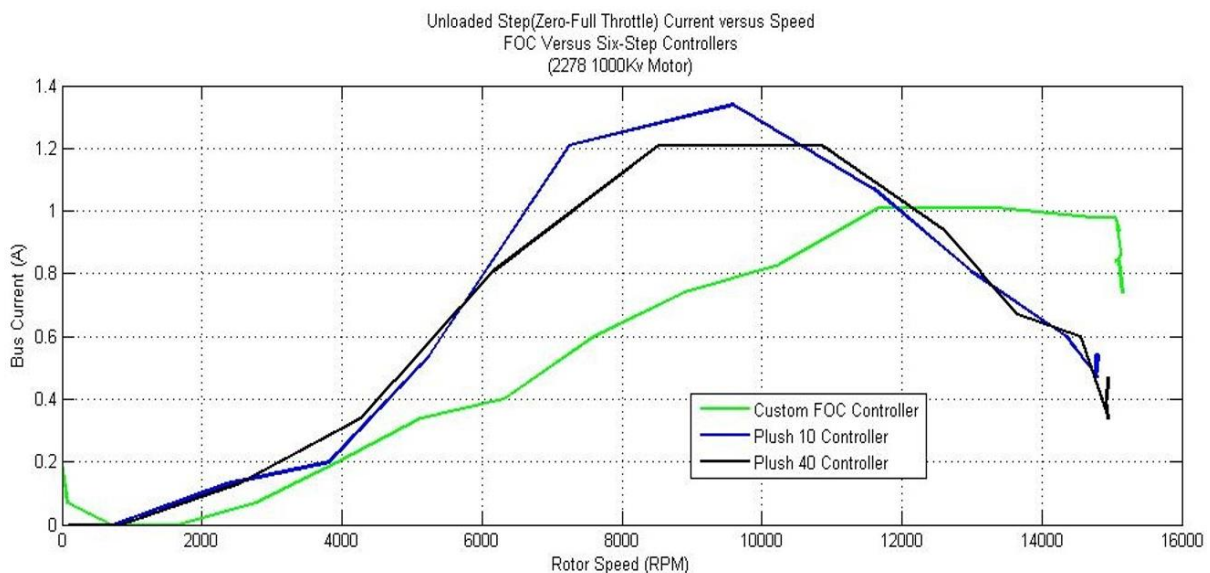
Tabelis 4.3 on välja toodud InstaSPINi eelised konkureerivate lahenduste ees.

Tabel 4.3. InstaSPIN-FOC lahenduse eelised teist vektorjuhtimise lahenduste ees [13]

Võrreldav omadus	Teised lahendused	InstaSPIN-FOC
Mootori elektriliste parameetrid vajadus	Mootori mudelipõhised enkoodrid sõltuvad tugevalt mootori parameetritest	Sõltub vähematest parameetritest. Parameetrite identifitseerimise võimalus. Töötamise ajal staatori mähise takistuse pidev hindamine.
Rootori positsiooni hindaja seadistamine	Keeruline mudeli seadistamine erinevate kiiruste/koormuste korral iga mootori jaoks eraldi	Peale mootori parameetrite leidmist töötab erinevate kiiruste/koormustega ilma uuesti seadistamiseta
Rootori positsiooni hindaja täpsus	Nurga järgimise täpsus on tavaliselt hea alates 5-10 Hz, võib esineda raskusi suurte kiirustel ning vajab kompenseerimist väljanõrgenemise korral. Dünaamiline jõudlus sõltub mudeli käsitsi seadistamisest.	FAST on võimeline jälgima nurka alla 1 Hz sageduse. Nurga jälgimine on täpne ka koormuse muutumise korral
Mootori käivitamine	Keeruline või võimatu käivitada null kiiruselt. Ebastabiilne mudel madalatel kiirustel ebatäpse rootori nurga ja kiiruse tagasiside tõttu	InstaSPIN-FOC võimaldab null kiiruselt käivitamist 100% momendiga
Voolu järgi (momendi) juhtimine	FOC-i voolu järgi juhtimine on keerukas, eriti algajatele	Peale mootori parameetrite leidmist seadistatakse voolukontrollerid automaatselt. Kasutaja saab seadistust vajadusel muuta.
Tagasiside signaalid	Süsteemi hälbed ja kõrvalekalded ei ole jälgitavad	FAST võimaldab automaatset riistvara/tarkvara kalibreerimist ja hälvete kompenseerimist.
Mootorite tüübid	Erinevat tüüpi mootorite juhtimiseks erinevad meetodid	FAST toimib kõigi kolmefaasiliste mootorite tüüpidega

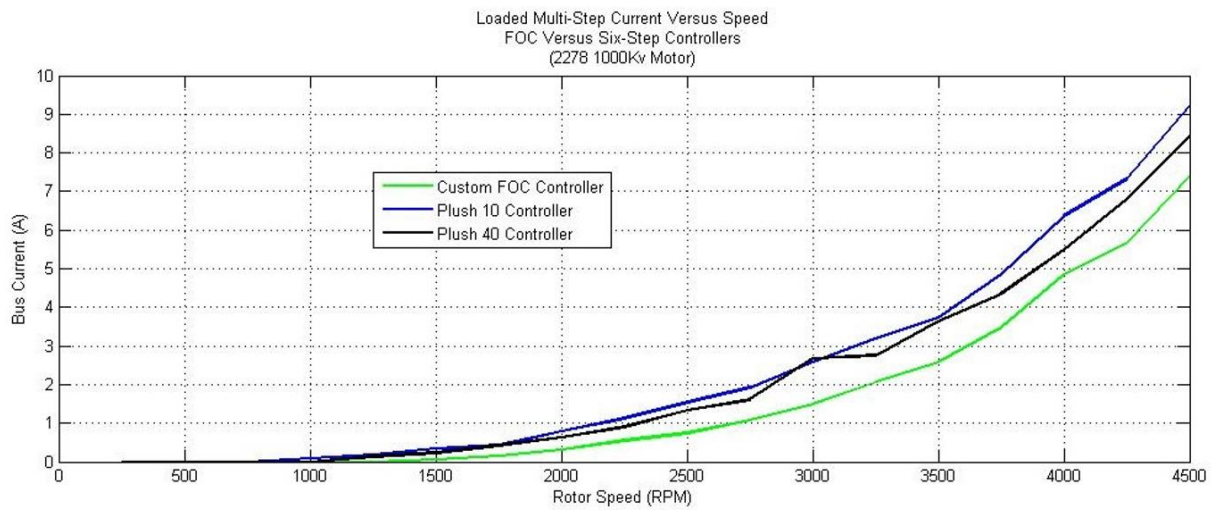
Võrreldav omadus	Teised lahendused	InstaSPIN-FOC
Väljanõrgenemine	Väljanõrgenemine on mudeli jaoks keeruline ülesanne, sest vastuelektromotoorjõu signaalid kasvavad liiga kõrgeks, jälgimine ja stabiilsus kannatavad	FAST võimaldab väljanõrgenemist ning välja võimendamise rakendusi tänu stabiilsele magnetvoo hinnangule laias vahemikus
Mootori temperatuurist sõltuvus	Rootori nurga jälgitavus muutub halvemaks staatori mähise soojenedes	Staatori mähise takistuse mõõdetud väärtust uuendatakse töötamise käigus
Kiiruse hindamine	Halb/vale kiiruse hindamine põhjustab ebaefektiivset FOC süsteemi tööd, vähem stabiilne dünaamilisus	Hea kvaliteediga madala müraga kiiruse hindamine. Libistuse kalkuleerimine asünkroonmootori tarbeks.
Momendi hindamine	Momendi ja vibratsiooniandurid on tavaliselt nõutud	Suure ribalaiusega mootori momendi hindaja

Joonisel 4.6 on nähtav, milline on koormamata mootori korral sisendvool erinevate mootori kiiruste korral. Võrreldud on kolme erinevat mootorikontrollerit, millest kaks kasutavad trapetsoidjuhtimist ning kolmas InstaSPIN FOC lahendust. Kasutatavaks mootoriks on väike multirootor-kopteri mootor [11].



Joonis 4.6. Koormamata mootori juhtimine. InstaSPIN-FOC kontrolleri võrdlus trapetsoidjuhtimisega kontrolleritega [11].

Joonisel 4.7 on kujutatud sisendvoolu sõltuvust mootori kiirusest koormatud mootori korral. Koormusena on kasutatud propellerit. On märgatav, et InstaSPIN lahenduse korral on vajalik tarbitava voolu väärtus väiksem kui trapetsoidjuhtimist kasutavate kontrolleri korral [11].



Joonis 4.7. Propelleriga koormatud mootori juhtimine. InstaSPIN-FOC kontrolleri võrdlus trapetsoidjuhtimisega kontrolleritega [11].

5. KOMPONENTIDE VALIK

5.1. Jõutransistorid

Jõutransistore on kolme tüüpi:

- Bipolaarne transistor (BJT),
- Väljatransistor (MOSFET),
- Isoleeritud paisuga bipolaarne transistor (IGBT).

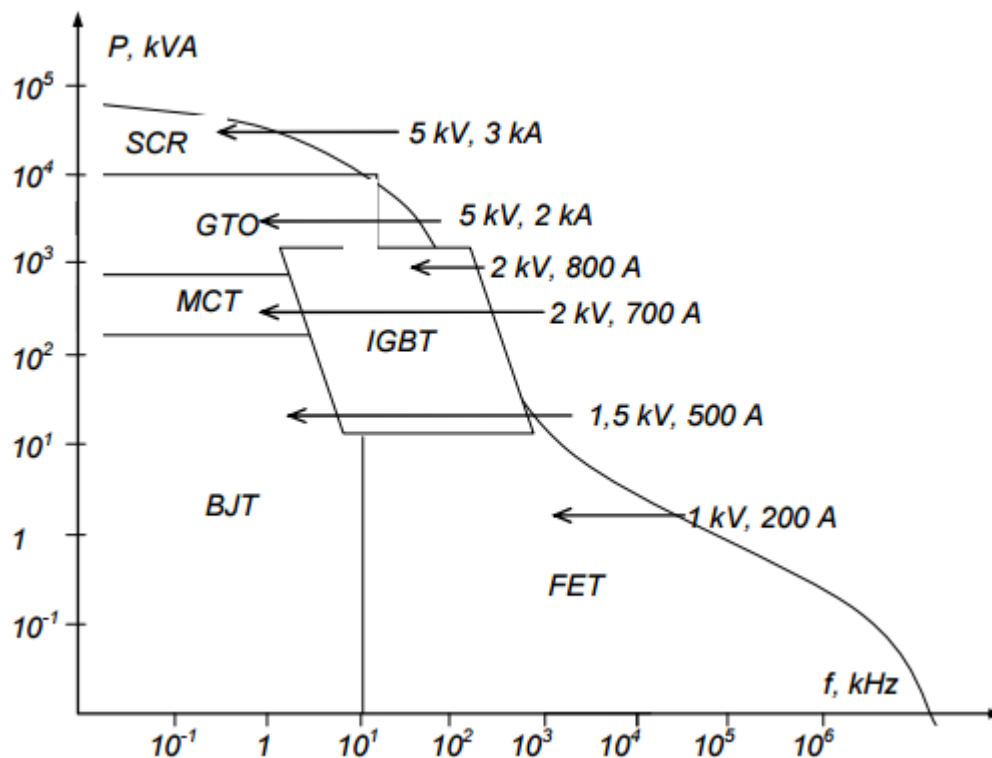
Bipolaarne transistor oli ainus jõutransistor MOSFET-ide saabumiseni 1970-ndatel. BJT vajab sisselülitamiseks suurt baasivoolu ning nende väljalülitamine on teiste transistoridega võrreldes aeglane. Bipolaartransistoridel on negatiivne temperatuuri koefitsient, mille tõttu kollektori vool suureneb ning seetõttu kiireneb transistoride kuumenemine. Madalatel sisendpingetel töötades on juhtivuskaod suured, sest kollektor-emitteri küllastuspingelang moodustab sisendpingest võrdlemisi suure osa [14].

MOSFET on pingega juhitav ning omab positiivset temperatuuri koefitsienti. Kuna väljatransistoridel ei ole kindlat küllastunud oleku pingelangu, vaid sisselülitatud oleku neelu ja lätte vaheline takistus, siis juhtivuskaod on BJT-ga võrreldes palju väiksemad. MOSFET-idel on ka sisseehitatud anti-paralleelne diod, mis on kasulik freewheeling voolude juhtimiseks [14].

IGBT on bipolaar- ja väljatransistori ristik. IGBT väljundi lülitus- ja juhtivuskarakteristikud on pärit BJT-lt, kuid selle pingega juhitavus pärineb MOSFET-ilt. See annab IGBT-le BJT suurte voolude juhtimise võimekuse ning MOSFET-i lihtsa juhitavuse. Nagu BJT-l on IGBT-l pikk väljalülitusaeg ning sellel puudub ka sisseehitatud anti-paralleelne diod [14].

Mootorite juhtimiseks kasutatakse tavaliselt kas MOSFET-sid või IGBT-sid. Neil on siiski erinevad rakenduskohad ning transistori valik tuleb teha vastavalt rakenduse elektrilistele omadustele.

Antud rakenduses on jõutransistoride lülitussageduseks valitud 30 kHz. Seadme maksimaalne väljundvõimsus on ligikaudu 1,5 kVA. Vastavalt joonisele 5.1 on antud rakenduses sobilik kasutada väljatransistore.



Joonis 5.1. Jõutransistoride valikut selgitav joonis [15]

Õige transistori valik võimaldab vähendada eralduvat kaovõimsust, suurendades seadme eluiga ning pikendades aku kestvust. Väiksemad kaod võimaldavad kasutada väiksemat ja kergemat jahutussüsteemi.

5.1.1. MOSFET-de kaovõimsuse arvutamise meetod

Sõltuvalt rakendusest, on transistoride kaovõimsuste arvutuskäik erinev. Järgnevate valemite põhjal on võimalik arvutada kolmefaasilise vahelduvvoolumootori ajami MOSFET-ide kadusid [16].

$$P_{CM} = R_{DSon} * I_o^2 * \left(\frac{1}{8} + \frac{m_a * \cos(\varphi 1)}{3 * \pi} \right), \quad (5.1)$$

kus P_{CM} on MOSFET-i juhtivuskadu, R_{DSon} on küllastunud olekus neelu ja lätte vaheline takistus, I_o on väljundvoolu amplituudväärtus, m_a on moduleerimisindeks, $\cos(\varphi 1)$ on mootori faasinihkest põhjustatud võimsustegur.

$$I_{Gon} = \frac{U_{Dr} - U_{platoo}}{R_G}, \quad (5.2)$$

kus I_{Gon} on MOSFETi paisuvool sisselülitamisel, U_{Dr} on paisule lülitatav pinge, $U_{GS(plateau)}$ on Miller-i platoo pinge, R_G on paisu takistus.

$$I_{Don} = I_{Doff} = I_{DCekv} = \frac{1}{\pi} * I_o, \quad (5.3)$$

kus I_{Don} on neelu vool peale sisselülitamist, I_{Doff} on neelu vool enne väljalülitamist, I_{DCekv} on ekvivalentne alalisvool väljundis.

$$tfu = \frac{tfu1+tfu2}{2}, \quad (5.4)$$

$$tfu1 = (U_{DD} - R_{DSon} * I_{Don}) * \frac{C_{GD1}}{I_{Gon}}, \quad (5.5)$$

$$tfu2 = (U_{DD} - R_{DSon} * I_{Don}) * \frac{C_{GD2}}{I_{Gon}}, \quad (5.6)$$

kus tfu on pinge langemiseks kuluv aeg. See on mahtuvuste $C_{GD1}=C_{GD}(U_{DD})$ ja $C_{GD2}=C_{GD}(R_{DSon} \cdot I_{on})$ laadimiseks kuluvate aegade ($tfu1$ ja $tfu2$) mediaan. U_{DD} on sisendpinge.

$$E_{onM} = U_{DD} * I_{Don} * \frac{tri+tfu}{2} + Q_{rr} * U_{DD}, \quad (5.7)$$

kus E_{onM} on MOSFETi sisselülitamiseks kuluv energia, tri on voolu tõusuks nullist I_{Don} väärtuseni kuluv aeg, Q_{rr} on diodi taastumiseks (*reverse recovery*) kuluv laeng.

$$I_{Goff} = -\frac{U_{plateau}}{R_G}, \quad (5.8)$$

kus I_{Goff} paisu vool väljalülitamisel.

$$tru = \frac{tru1+tru2}{2}, \quad (5.9)$$

$$tru1 = (U_{DD} - R_{DSon} * I_{Don}) * \frac{C_{GD1}}{I_{Goff}}, \quad (5.10)$$

$$tru2 = (U_{DD} - R_{DSon} * I_{Don}) * \frac{C_{GD2}}{I_{Goff}}. \quad (5.11)$$

kus tru on pinge tõusuks kuluv aeg. See on mahtuvuste C_{GD1} ja C_{GD2} tühjenemiseks kuluvate aegade ($tru1$ ja $tru2$) mediaan.

$$E_{offM} = U_{DD} * I_{Doff} * \frac{tru+tfi}{2}, \quad (5.12)$$

kus E_{offM} on MOSFETi väljalülitamiseks kuluv energia, tru on pinge tõusuks kuluv aeg, tfi on voolu langemiseks kuluv aeg.

$$P_{swM} = (E_{onM} + E_{offM}) * f_{sw}, \quad (5.13)$$

kus P_{swM} on MOSFETI lülituskaod, f_{sw} on lülitussagedus.

$$P_M = P_{CM} + P_{swM}, \quad (5.14)$$

kus P_M on MOSFETi kogukaod.

$$P_{CD} = u_{D0} * I_o * \left(\frac{1}{2*\pi} - \frac{m_a*\cos(\varphi_1)}{8} \right) + R_D * I_o^2 * \left(\frac{1}{8} + \frac{m_a*\cos(\varphi_1)}{3*\pi} \right), \quad (5.15)$$

kus P_{CD} on antiparalleel-diodide juhtivuskadu, u_{D0} on diodi sisselülitatud oleku nullvoolu pinge, R_D on diodi sisselülitatud oleku takistus.

$$E_{onD} = \frac{1}{4} * Q_{rr} * U_{Drr}, \quad (5.16)$$

kus E_{onD} on diodi sisselülitamiseks kuluv energia, U_{Drr} on pinge diodil taastumise hetkel.

$$P_{swD} = E_{onD} * f_{sw}, \quad (5.17)$$

kus P_{swD} on diodi lülituskaod.

$$P_D = P_{CD} + P_{swD}, \quad (5.18)$$

kus P_D on antiparalleel-diodi kogukaod

5.1.2. Kaovõimsuste arvutuste tulemused

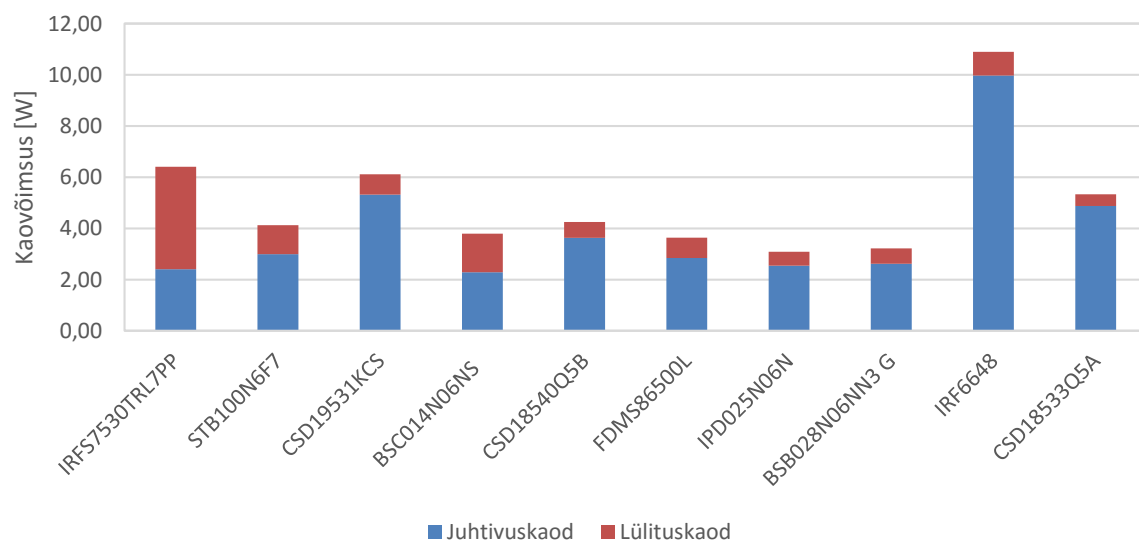
Elektrisõidukite üks tähtsamaid omadusi on läbitav teepikkus ühe laadimiskorraga. Selleks on aga tähtis, et süsteemi kaod oleksid võimalikult väikesed. Läbitavat teepikkust on võimalik pikendada ka suuremate või rohkemate akudega. Selleks, et oleks rohkem ruumi akudele, on eesmärgiks ehitada võimalikult kompaktne mootorikontroller. Väiksemate kadudega kontrolleri puhul on võimalik jahutuse mõõtmete pealt ruumi kokku hoida.

Antud töö raames sai eelnevate valemite (peatükk 5.1.1) alusel kalkuleeritud erinevate MOSFETide kaovõimsused. Arvutuste aluseks on võetud järgmised süsteemi parameetrid:

- Sisendpinge U_{DD} on 48 V
- Maksimaalne ruutkeskmine väljund faasivool I_{orms} on 25 A
- Lülitussagedus f_{sw} on 30 kHz
- Tüürahela lülituspinge U_{Dr} on 12 V
- Maksimaalne moduleerimisindeks m_a on 0,866 [29]
- Mootori arvestuslikuks faasinihkest põhjustatud võimsusteguriks $\cos\phi_1$ on võetud 0,8

MOSFETide parameetrid R_{DSon} , tri , t_{fi} , Q_{rr} , u_{D0} , R_D , $U_{GS(plateau)}$, C_{GD1} , C_{GD2} on leitud andmelehtedelt.

Arvutustulemuste (joonis 5.2) põhjal valiti antud projektis kasutatavaks MOSFET-ks BSB028N06NN3 G.



Joonis 5.2. Erinevate MOSFET-de kadude võrdlus antud rakenduse tarbeks

5.2. Jahutus

MOSFET-de kadude arvutustest selgus, et halvimal juhul on valitud transistori kaovõimsus 3,22 W. See võimsus tuleb juhtida MOSFETi siirdest läbi kesta, isolaatori ja radiaatori ümbritsevasse keskkonda. Kuna kolmefaasiline vaheldi koosneb kuuest jõutransistorist, siis kogu eralduv kaovõimsus on 19,32 W. Kõik transistorid on ühendatud ühise radiaatori külge. Energia eraldumist iseloomustab ekvivalentne termiline ahel (joonis 5.3).

Sobiva radiaatori valiku arvutuste tarbeks on seatud piirangud:

- Maksimaalne lubatud siirde temperatuur T_{Jmax} on 120 °C
- Ümbritseva keskkonna temperatuur T_A on 30 °C

Termiline takistus on suurus, mis iseloomustab vastupanu soojuse levikule [17].

$$\theta = \frac{d}{k \cdot A}, \quad (5.19)$$

kus θ on termiline takistus [K/W], d on materjali paksus [m], k on materjali termiline juhtivus [W/m*K], A on pindala [m²].

Kasutades valemit 5.19 on võimalik arvutada isolaatori termiline takistus. Vajalikud andmed:

- Valitud transistori kontaktpind isolaatoriga on ligikaudu 30 mm² (0,0003 m²).
- Isolaatori termiline juhtivus on 6 W/m*K
- Isolaatori paksus on 0,5 mm (0,0005 m).

Isolaatori arvatud termiline takistus on 2,77 K/W.

BSB028N06NN3 G terminile takistus on 1,6 K/W.

Soojuse eraldumist iseloomustab valem 5.20. Avaldades sellest termilise takistuse, on võimalik arvutada radiaatori maksimaalne sobilik termiline takistus [17].

$$P = \frac{T_J - T_A}{\theta}, \quad (5.20)$$

$$\theta = \frac{T_{Jmax} - T_A}{P_{kokku}} = \theta_{SA} + \theta_{JSkokku}, \quad (5.21)$$

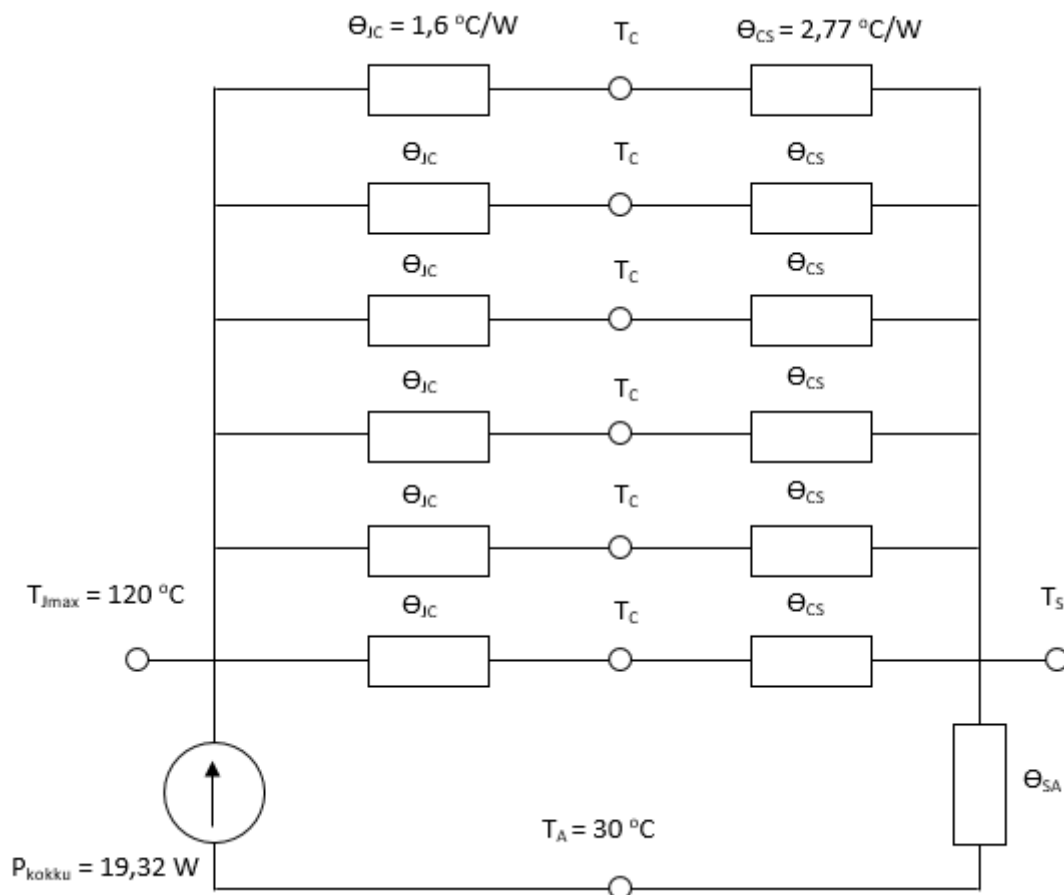
$$\theta_{JSkokku} = \frac{\theta_{JC} + \theta_{CS}}{6}, \quad (5.22)$$

$$\theta_{SA} = \frac{T_{jmax} - T_A}{P_{kokku}} - \theta_{JSkokku}, \quad (5.23)$$

kus P_{kokku} on kõigi transistoride summaarne kaovõimsus, $\theta_{JSkokku}$ on kõigi rööbiti paiknevate (joonis 5.3) transistoride ja nendel asetseva isolaatorite summaarne soojustakistus.

$$\theta_{SA} = \frac{120 - 30}{19,32} - 0,72 = 3,9 \text{ K/W} \quad (5.24)$$

Kasutatava radiaatori maksimaalne lubatud termiline takistus on 4,1 K/W. Antud töös on kasutusele võetud 100 mm x 72 mm x 35 mm alumiiniumist radiaator, mille termiline takistus on 3,6 K/W.



Joonis 5.3. Ekvivalentne termiline ahel

5.3. Tüürahelad

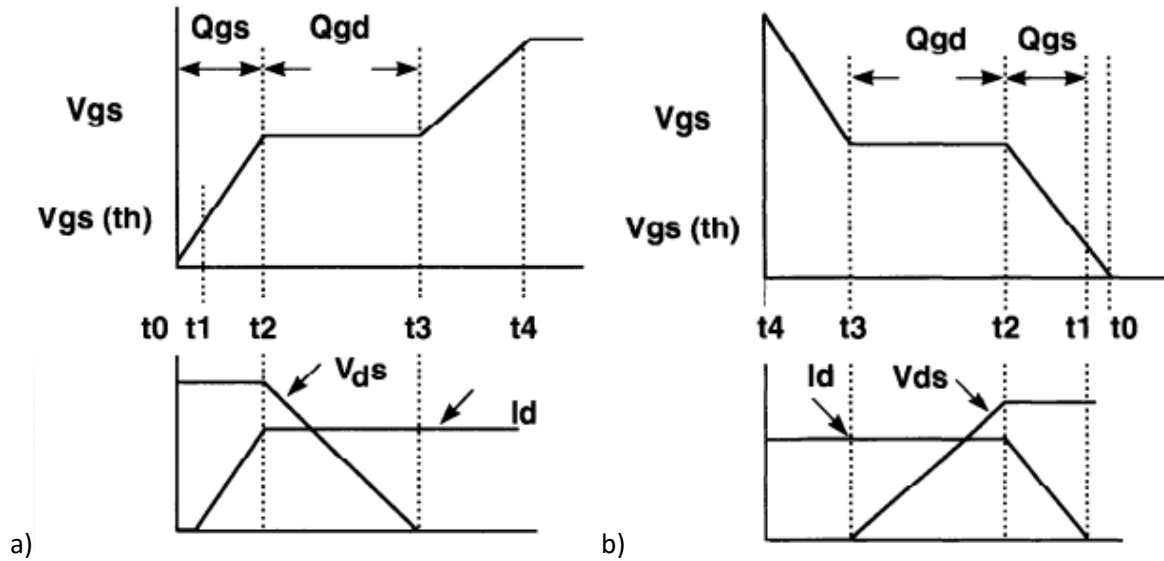
Jõutransistore nagu MOSFETid ja IGBTd ei ole võimalik lülitada otse läbi mikrokontrolleri. Nende lülitamiseks on vaja suuremat voolu, mida mikrokontroller ei ole võimeline pakkuma. Selliste transistoride lülitamiseks kasutatakse tüürahelaid (gate driver). Neid ahelaid on võimalik kokku panna nii diskreetsetest elementidest kui ka integreeritud loogikalülitustest.

MOSFETide sisselülitamise saab jagada neljaks etapiks [18](joonis 5.4 a):

1. t_0-t_1 – Viiteaeg
 - Paisu ja läte vaheline pinge U_{GS} tõuseb $U_{GS(th)}$ -ni
 - Neeluvoolu I_D ei ole
 - Neelu ja läte vaheline pinge U_{DS} ei muutu
2. t_1-t_2 – Lülituse esimene osa
 - U_{GS} tõuseb $U_{GS(th)}$ -st $U_{GS(plateau)}$ -ni
 - Neelus tekib vool
 - U_{DS} hakkab vähenema
3. t_2-t_3 – Lülituse teine osa.
 - U_{GS} püsib $U_{GS(plateau)}$ väärtusel (Milleri efekt)
 - Neelu vool saavutab maksimaalse väärtuse
 - U_{DS} saavutab minimaalse väärtuse
4. t_3-t_4 – Ülelaadimine
 - U_{GS} tõuseb $U_{GS(plateau)}$ -st U_{Dr} -ni
 - Neeluvool ei muutu
 - U_{DS} ei muutu

MOSFETi väljalülitamine on vastupidine protsess(joonis 5.4 b).

Aeg, mis kulub MOSFET-i sisselülitamiseks on määratud kahe laengu Q_{GS} ja Q_{GD} paisu laadimise ajaga, ehk periood t_0-t_3 . Ülelaadimine ei oma märkimisväärset mõju MOSFET-i juhtivusele. Seega võib tüürahela vajaliku väljundvoolu arvutamise aluseks võtta ainult laengud Q_{GS} ja Q_{GD} ja mitte paisu kogulaengu Q_G [19].



Joonis 5.4. MOSFET-i a) sisse- ja b) väljalülitamise tunnusjooned [18].

Kuna MOSFETi lülitamine toimub ajahetkest t_1 kuni t_3 , kui MOSFETi sisendmahtuvusse laetakse laeng Q_{sw} (lülituslaeng), siis MOSFETi sisselülitamiseks vajalik vool, on arvutatav:

$$I_G = \frac{Q_{sw}}{\Delta t} \quad (5.25)$$

MOSFETi BSB028N06NN3 G korral on lülituslaeng Q_{sw} 23 nC. Lülitusaeg Δt on määratud neelu voolu tõusuaja t_{ri} (andmelehelts leitav) ning neelu ja läte vahelise pinge U_{DS} langemise aja t_{fu} summana. Antud juhul on valitud lülitusajaks 20 ns. Sellisel juhul on paisuvool I_G 1,15 A.

Paisuvoolu piirab takisti, mille väärtus on leitav avaldades valemist 5.2 takistuse:

$$R_{Gon} = \frac{U_{Dr} - U_{plato}}{I_G} \quad (5.26)$$

Projekteeritavas kontrollerris on paisu lülituspinge U_{Dr} 12 V korral vajalik paisu takistus 6,44 Ω . Võttes arvesse MOSFETi BSB028N06NN3 G sisemise paisu takistuse 0,5 Ω , on vajaliku välise takistuse väärtus 5,94 Ω . Prototüübi küljes on kasutatud väärtus 6,2 Ω .

Võimaldamaks kiiremat MOSFET-i väljalülitamist on vaja, et takistus paisuvoolule oleks ühes suunas väiksem kui teises. Selleks on rööpselt ühendatud kaks takistit, millest ühele on jadamisi ühendatud diod. Sedasi voolab sisselülitav paisuvool läbi ühe takisti (suurem kogutakistus) ning väljalülitav paisuvool läbi kahe rööpse takisti (väiksem kogutakistus).

MOSFETI väljalülitamiseks vajaliku takistuse väärtuse saab leida avaldades valemist 5.8 takistuse.

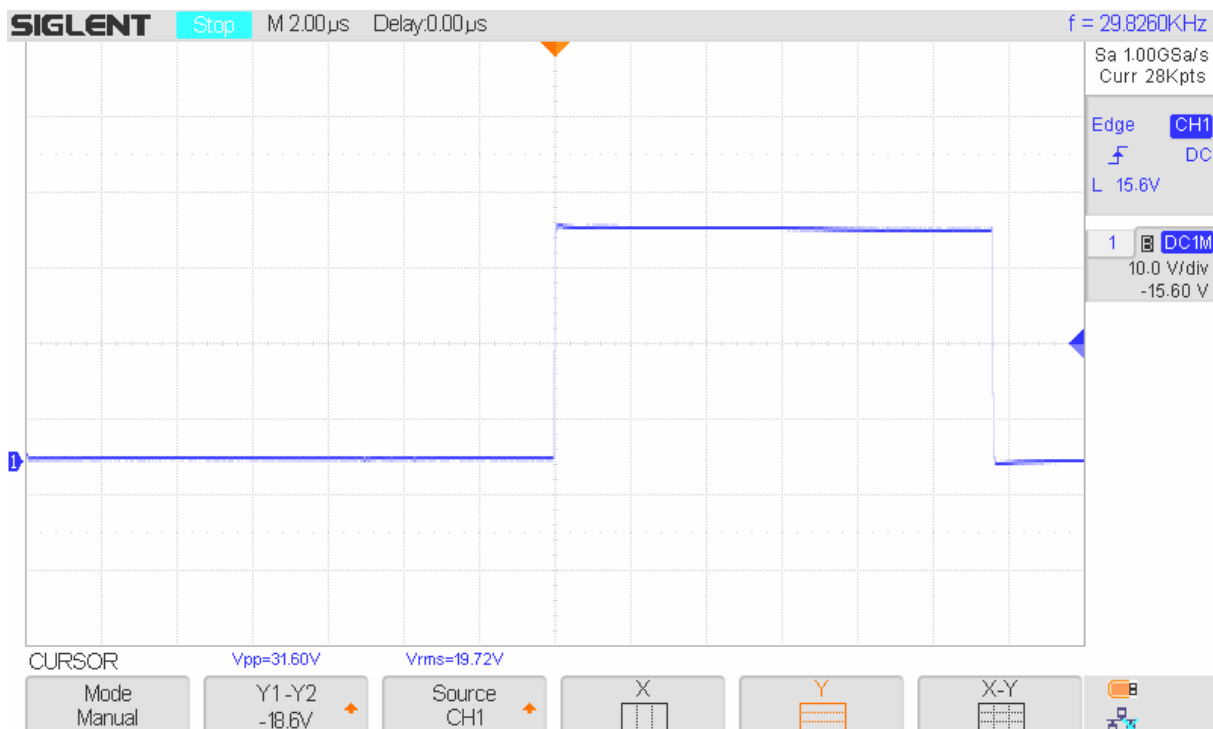
$$R_{Goff} = \frac{U_{plato}}{I_G}, \quad (5.27)$$

Sobilik paisu kogutakistus on 4Ω , millest välise takistuse väärtus on $3,5 \Omega$. Et rööbiti olevate takistite koguväärtus saaks olla 4Ω , peab teise takisti väärtus olema $8,32 \Omega$ (Eeldusel, et diodi juhtiva oleku takistus on $0,2 \Omega$). Prototüübi küljes on kasutatud $8,66 \Omega$.

Projekteeritavasse kontrollerisse on tüürahela juhtloogikana kasutusele võetud Texas Instruments UCC27211DDA. Antud mudel võimaldab sisselülitusvoolusid kuni $3,7 \text{ A}$ ning väljalülitusvoolu kuni $4,5 \text{ A}$.

Transistori lülitamist on kujutatud ostsilloskoobiga jäädvustatud pildil (joonis 5.5).

Tüürahelate ülesehitus Lisas 2, skeem pealkirjaga Inverter pole.

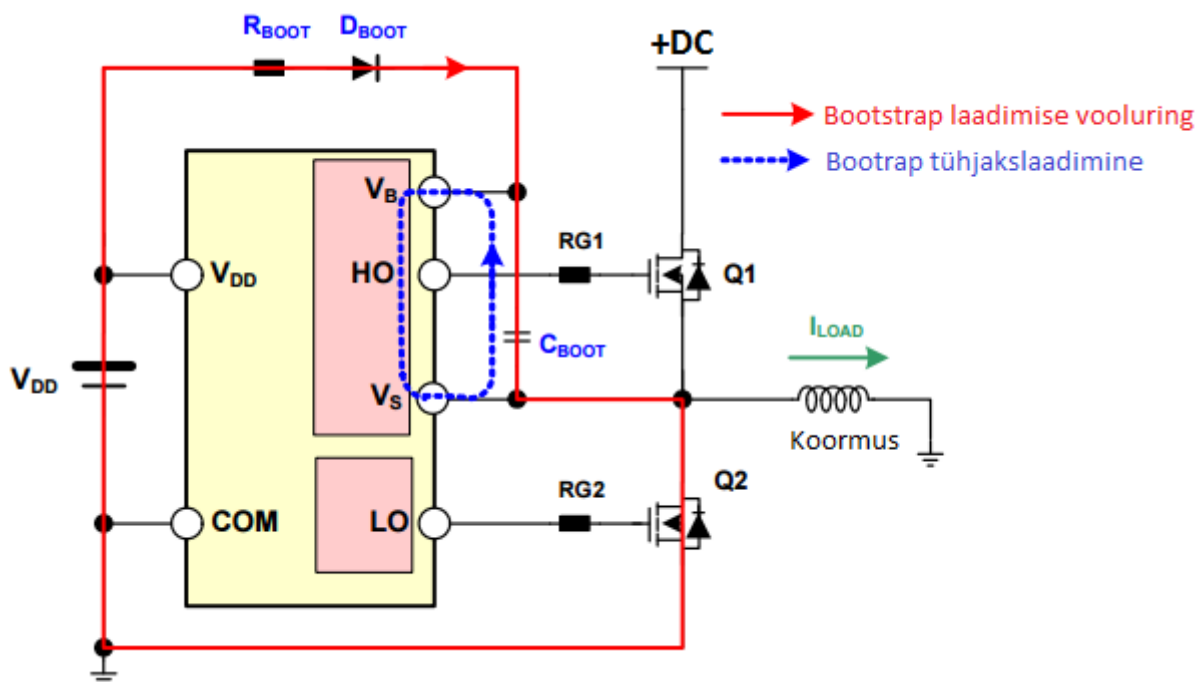


Joonis 5.5. MOSFET-i lülitamine, neelu ja läte vaheline pinge

5.3.1. Tüürahela toide

Üks populaarsemaid viise ülemise MOSFETi tüürahela toiteks on bootstrap ahel. See koosneb bootstrap diodist ja kondensaatorist (joonis 5.6). Sellise lahenduse eeliseks on lihtsus ja odavus. Selliseid ahelaid kasutatakse rakendustes, kus sisendite pingetasemed ei luba ülemise poole (high side) MOSFET-e või IGBT-sid juhtida sama tüürahela toitepingega kui alumise poole (low side) jõulüliteid [20].

Bootstrap toiteahela tööpõhimõte seisneb kõikusvas pingetasemes, mis on fikseeritud ülemise poole MOSFETi lättega. See pingeniivo kõigub kahe taseme vahel. Kui alumise poole MOSFET on sisselülitatud, on pingeniivo võrdne maaga. Sel hetkel saab läbi bootstrap diodi laadida bootstrap kondensaatorit. Avatud alumise poole jõulüliti korral on ülemise MOSFETi lätte pingeniivo tavaliselt kõrgem kui tüürahela toitepinge. Seega ei saa kasutada tüürahela toitepinget transistori lülitamiseks. Lülitamiseks kasutatakse laetud kondensaatorit, mis laetakse tühjaks kõrgema MOSFETi lülitamisel. Bootstrap ahela laadimist iseloomustab joonis 5.6.



Joonis 5.6. Bootstrap kondensaatori laadimine ja tühjaks laadimine [20]

Bootstrap kondensaatori väärtuse saab leida [20]:

$$C_{BOOT} = \frac{Q_{tot}}{\Delta V_{BOOT}}, \quad (5.28)$$

kus Q_{tot} on bootstrap kondensaatorisse talletatav laeng, ΔV_{BOOT} on maksimaalne lubatud pingelang lülitusprotsessi ajal.

$$Q_{tot} = Q_G + (I_{LKCAP} + I_{LKGS} + I_{QBS} + I_{LK} + I_{LKDIODE}) * t_{on} + Q_{LS}, \quad (5.29)$$

kus Q_G on paisu kogulaeng, I_{LKGS} on paisu-lätte lekkevool, I_{LKCAP} bootstrap kondensaatori lekkevool, I_{QBS} on bootstrap ahela jõudeolekuvool, I_{LK} bootstrap ahela lekkevool, Q_{LS} on vajalik laeng sisemise ülemise tüürsignaali pingetaseme muutmiseks, t_{on} on ülemise jõulüliti sisselülitatud oleku aeg, $I_{LKDIODE}$ bootstrap dioodi lekkevool.

Antud rakenduses on arvutuste parameetrite väärtused: Q_G (maksimaalne) on 143 nC, I_{LKGS} (maksimaalne) on 100 nA, I_{LKCAP} on 0, I_{QBS} on 170 μ A, I_{LK} on 1 μ A, Q_{LS} on 3nC, t_{on} on 16,6 μ s, ΔV_{BOOT} on 1,5 V. Arvutatud bootstrap kondensaatori C_{BOOT} väärtus on 99 nF

5.4. Alalisvoolu vahelüli

Elektrisõidukites on alalisvoolu vahelüli (DC-link) eesmärgiks [21]:

- Reaktiivvõimsuse pakkumine
- Pulseerivate voolude summutamine
- Vähendada elektromagnetiliste häiringute tekkimist
- Lülitamisest põhjustatud pingepiikide summutamine

Alalisvoolu vahelüli valiku kriteeriumiteks on [21]:

- Pulseerivate voolude taluvus vaheldi kõigi tööolukordade juures
- Alalisvoolu vahelüli pinge kõikumine ei tohiks ületada 10% nominaalpingest olenemata koormusest

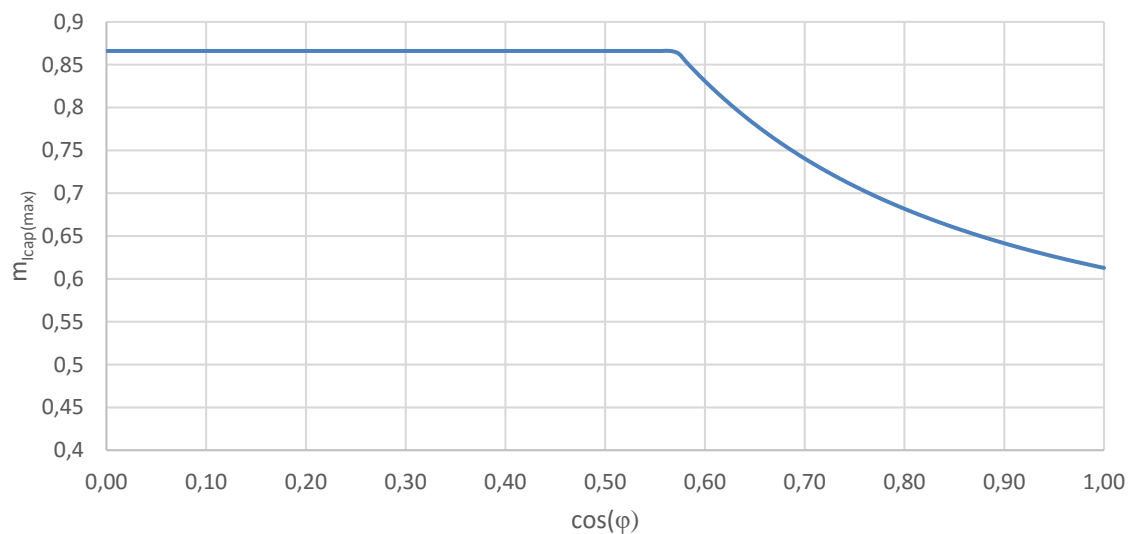
SVM modulatsiooni korral on kondensaatori ruutkeskmise pulseeriva voolu ja väljundi faasivoolu suhe leitav [21]:

$$I_{cap}/I_o = \sqrt{\frac{m_a}{32\pi} + [4\sqrt{3} * (4\cos 2\varphi + 6) - 9\pi * m_a * (\cos 2\varphi + 1)]}, \quad (5.30)$$

kus I_{cap} on alalisvoolu vahelüli kondensaatorit läbiva voolu efektiivväärtus, I_o on väljundi faasivoolu amplituud, m_a on moduleerimisindeks ja φ on faasinihkenurk.

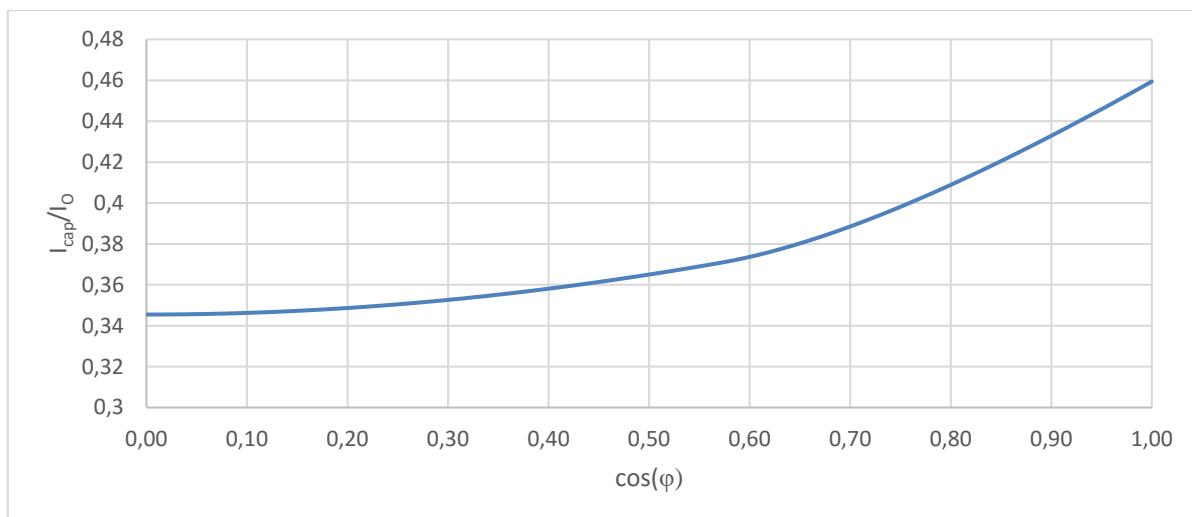
Moduleerimisindeks $m_{I_{cap(max)}}$, mis vastab maksimaalsele kondensaatori pulseerivale voolule mingi faasinurga korral on leitav valemiga 5.28 [21]. Saadud tulemused on kujutatud joonisel 5.7.

$$m_{I_{cap(max)}} = \left[\frac{4\sqrt{3}(2\cos 2\varphi + 3)}{9\pi(\cos 2\varphi + 1)}, 0,866 \right] \quad (5.31)$$



Joonis 5.7. Suurimale alalisvoolu vahelüli pulseerivale voolule vastav moduleerimise indeks mingi faasinurga korral.

Kasutades valemist 5.30 saadud halvimalle olukorrale vastavaid väärtusi $\cos(\varphi)$ ja $m_{I_{cap(max)}}$ valemis 5.29, saame leida maksimaalse kondensaatori pulseeriva voolu ja väljundi faasivoolu sõltuvuse faasinurgast (joonis 5.8).



Joonis 5.8. Pulseeriva voolu ja väljundi faasivoolu suhe sõltuvalt faasinurgast

Kasutatava mootori eeldatav maksimaalne $\cos(\varphi)$ on 0,8, mille korral $m_{I_{cap(max)}}$ on 0,68. Võttes maksimaalseks faasivoolu amplituudiks 35,36 A (efektiivväärtus 25 A) ning korrutades seda suhtega $I_{cap}/I_o(\cos(\varphi)=0,8) = 0,409$, saan maksimaalseks kondensaatori ruutkeskmiseks pulseerivaks vooluks 14,46 A.

Pinge pulsatsioon alalisvoolu vahelülis on leitav:

$$U_{puls} = U_{puls_baas} * U_{puls_pu}, \quad (5.32)$$

kus U_{puls} pulsatsioonipinge ruutkeskmine väärtus, U_{puls_baas} [V] on selle baasväärtus ning U_{puls_pu} [p.u.] on ühiku kohta (per-unit) väärtus.

Pulsatsioonipinge ruutkeskmine baasväärtus on leitav [21]:

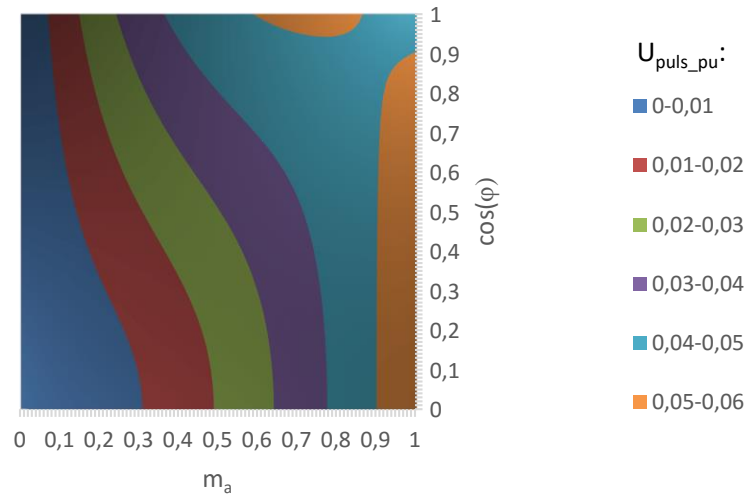
$$U_{puls_baas} = \frac{I_o}{C * f}, \quad (5.33)$$

kus C on alalisvoolu vahelüli kondensaatorite mahtuvus, f_{sw} on lülitussagedus.

SVM modulatsiooni korral avaldub U_{puls_pu} järgnevalt [21]:

$$U_{puls_pu} = \frac{m_a}{16} \sqrt{\left(6 - \frac{96\sqrt{3}}{5\pi} m_a + \frac{108\pi - 81\sqrt{3}}{16\pi} m_a^2\right) \cos^2 \varphi + \frac{8\sqrt{3}}{5\pi} m_a}, \quad (5.34)$$

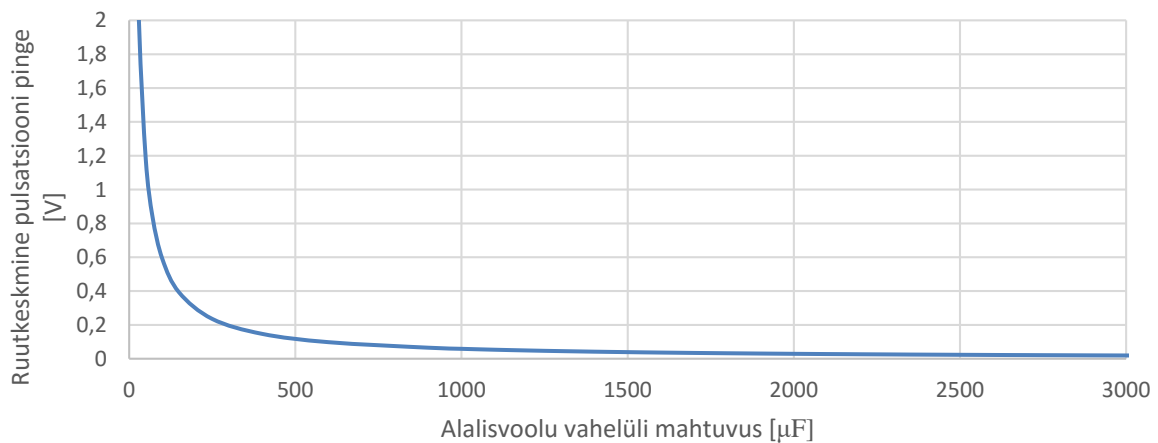
U_{puls_pu} sõltuvus modulatsiooni indeksist m_a ja faasinihkenurgast φ iseloomustab joonis 5.9. Antud rakenduse jaoks ($m_a = 0,866$, $\cos(\varphi) = 0,8$) on selle maksimaalne väärtus ligikaudu 0,05.



Joonis 5.9. U_{puls_pu} sõltuvus modulatsiooni indeksist ja faasinihkenurgast

Pulsatsiooni pinge ja mahtuvuse sõltuvuse leidmiseks on võetud $I_o = 35,36$ A ja $f_{sw} = 30$ kHz.

U_{puls} sõltuvust mahtuvusest kujutab joonis 5.10.



Joonis 5.10. Alalisvoolu vahelüli pinge pulseerimine sõltuvalt kondensaatorite mahtuvusest

Kasutusele on võetud 6 elektrolüüt kondensaatorit MULTICOMP MCGPR63V228M18X36, mille mahtuvus on $2200\mu\text{F}$ ja lubatud pulseeriv vool on $4,18$ A (10 kHz juures). Alalisvoolu vahelüli kogumahtuvus on seega $13200\mu\text{F}$ ja lubatav pulseeriv vool $25,08$ A.

Alalisvoolu vahelüli skeem Lisas 3.

5.5. Toiteahelad

Süsteemi toiteallikaks on akupakk, mille maksimaalne lubatud nimipinge on 48 V.

Erinevad ahelad vajavad erinevaid toitepingeid (toiteahelate skeemid Lisas 1, skeemil Power):

- 48 V – Vaheldi sisendpinge
- 12 V – Jõulülitite tüürahelad
- 5 V – Vooluandurid
- 3,3 V - Loogikalülitused

48 V-st 12 V saamiseks on kasutusele võetud pinget alandav Buck muundur (joonis 5.11). Tegemist on lülitava toitemuunduriga, mille eelisteks lineaarsete pingeregulaatorite kasutamise ees on väiksemad kaod ning suurem pinge reguleerimise vahemik (lineaarse regulaatoriga ei ole võimalik otse 48 V-st saada 12 V).

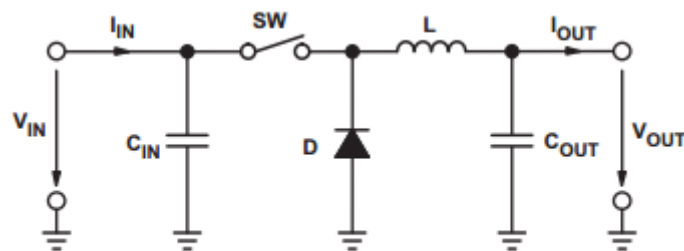


Figure 1. Buck Converter Power Stage

Joonis 5.11. DC/DC Buck muunduri skeem [23]

Antud lahenduses on Buck muunduri lülitusloogikana kasutusele võetud TL2575HV-12. Muunduri juurde kuuluvad induktor, diod ja kondensaatorid on valitud vastavalt TL2575HV-12 andmelehe soovitudele [24].

3,3 V ahelas on põhiliseks tarbijaks mikrokontroller TMS320F28069M (mikrokontrolleri valiku selgitus edasises töö osas). Voolutarve 3,3 V ahelas on katseliselt leitud, kasutades selleks Texas Instruments F28069M LaunchpadXL arendusplaati ning näidiskoodi mootorite juhtimiseks. Mõõdetud voolutarve on ligikaudu 160 mA. Kasutatud pingeregulaator on LM1117MP-3.3.

5 V ahela ainsad tarbijad on vooluandurid (8 tükki), mille maksimaalne voolutarve on 13,5 mA. Kogu voolutarve selles ahelas on 108 mA. Kasutatud pingeregulaator on LM1117MP-5.0.

5.6. Mikrokontroller

Kogu süsteemi tööd juhib mikrokontroller. Väljavektorjuhtimine vajab suurt arvutusvõimsust ning veel suuremat kahe mootori juhtimisel.

Mikrokontrolleri valiku kriteeriumid:

- Mootori juhtimise arendustööriistad: TI InstaSPIN-FOC
- Vähemalt 12 pulsilaiusmodulaatori kanalit
 - 2 x 6 mootorite juhtimiseks
- Vähemalt 16 analoog-digitaal muundurit
 - 2 x 4 voolude mõõtmiseks
 - 2 x 4 pingete mõõtmiseks
- CAN liides teise seadmetega suhtlemiseks

Antud projektis on kasutusele võetud Texas Instruments'i TMS320F28069M. Tegemist on C2000 seeriasse kuuluva Piccolo perekonna mikrokontrolleriga. C2000 seeria on mõeldud protsesside reaajas juhtimiseks. Konkreetne mudel toetab ka Texas Instruments'i InstaSPIN FOC ja InstaSPIN Motion tehnoloogiaid, mis teevad selle kontrolleri hästi kasutatavaks 3-faasiliste mootorite juhtimiseks.

Valitud mikrokontrolleri tähtsamad tehnilised andmed:

- Taktsagedus 90 MHz
- 256 KB välmälu (FLASH)
- 100 KB muutmälu (RAM)
- FPU – Floating Point Unit
- CLA – Control Law Accelerator
- 16 kanaliga pulsilaiusmodulaator
- 16 kanaliga 12-bit analoog-digitaalmuundur
- UART, SPI, CAN

Tänu CLA ja FPU olemasolule, saab vähendada mikrokontrolleri tuuma kasutust. Nii jääb rohkem vaba ressursi teistele ülesannetele. Nendeks on andmeside, logi pidamine, algoritmide jooksutamine.

Mikrokontrolleri ühendused Lisas 1, skeemidel Controller ja Power.

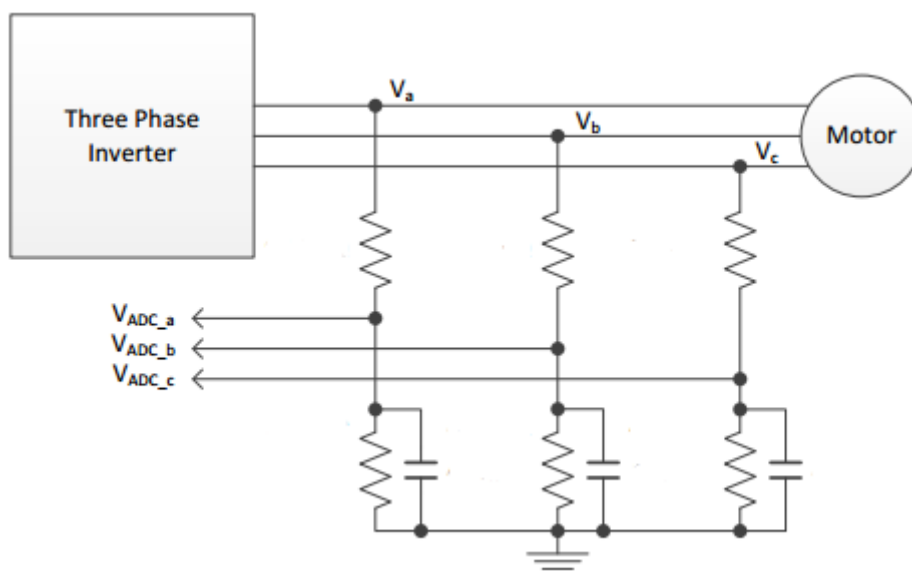
5.7. Mõõtmisahelad

Anduriteta vektorjuhtimise võimaldamiseks on vaja saada tagasisidet faasivoolude ja faasi- ning sisendpingete kohta. Projekteeritava seadme mõõtmisahelate paigutus skeemis on kujutatud lisas 2 skeemil Inverter Overview ning mõõteahelate ülesehitus lisas 2 skeemil Measurement circuit.

5.7.1. Pinge mõõtmine

Texas Instrumentsi FAST tarkvaraline rootori positsiooni hindaja vajab parimaks jõudluseks laias kiiruste vahemikus pingete tagasisidet. Paljud teised algoritmid toetuvad tarkvaralistele muutujatele, mis ei suuda täpselt kirjeldada faaside väljundpingeid. FAST-i kasutamise korral faasipinged on mõõdetud otse mootori faasidelt, mitte tarkvaraliselt eeldatud. Seetõttu on pinge tagasiside kohustuslik osa InsataSPIN lahendusest ning vajalik mootori parameetrite identifitseerimisel.

Pinge mõõtmiseks on kasutatud pinge regulaatorit koos RC madalpääsfiltriga (joonis 5.12), mille väljund on ühendatud mikrokontrolleri analoog-digitaalmuundurisse (ADC).



Joonis 5.12. Faasipingete tagasiside ahelad [13]

Süsteemi maksimaalseks toitepingeks on mõeldud 48 V nimiväärtusega akupakk. Mikrokontrolleri ADC maksimaalne lubatud pinge väärtus on 3,3 V. Pingejaguri arvutamisel on sisendpingeks võetud varuga 55 V.

Pingejaguri arvutusvalem [25]:

$$\frac{U_{väljund}}{U_{sisend}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.35)$$

Võttes R_2 4,7 k Ω , on leitava takistuse R_1 väärtus 73,63 k Ω . Lähima reaalse takisti väärtus on 73,2 k Ω .

FAST rootori positsiooni hindaja vajab pinge tagasiside täpseks mõõtmiseks filtrit. Filtri lõikesagedus peaks olema piisavalt madal, et välja filtreerida pulsilaiusmodulatsiooni signaalid, kuid läbi lasta kiirelt pöörleva mootori faasipingete signaalid [13]. Lõikesagedus paarsada hertsi on piisav, et välja filtreerida PWM sagedused alates 10 kHz. Antud ülesandes on lõikesageduseks valitud 360 Hz.

RC filtris kasutatava takisti väärtus on leitav Thevenin-i teoreemiga. Selle teoreemi kohaselt kõik kaheklemmilised ahelad, mis koosnevad takistitest ning pingeallikatest, on ekvivalentsed ahelaga, kus ühe takistiga on jadamisi pingeallikas [25].

Thevenini ekvivalentne takistus pingejaguri puhul:

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.36)$$

Leitud ekvivalentne takistus R_{Th} on 4416,5 Ω .

Filtri kondensaatori väärtuse saab leida RC filtri lõikesageduse avaldisest:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.37)$$

Võttes lõikesageduseks f_c 360 Hz, takistuseks $R = R_{Th}$ 4416,5 Ω , saame kondensaatori C väärtuseks 100 nF.

5.7.2. Vooluandurid

Kõige sagedamini kasutatakse mootorijuhtimise rakendustes voolu määramiseks:

- Šunt takisteid
- Hall'i efekti andureid
- Voolutrafosid

Šunt takistid on populaarsed vooluandurid, kuna pakuvad täpsust madala kuluga. Šunte saab paigaldada kahel viisi: toiteallikaga jadamisi (High side) või koormuse ja maanduse vahel (Low side). Toiteallikaga jadamisi paigutades on eeliseks väiksem intrusiivus, kuid nõuab keerulisemat ahelat kui teine lahendus. High side lahendus ei oma suurt mõju süsteemile, kui šunt takisti on väike ning resulteeruv pingelang on väike. Low side lahenduse korral aga maandusühendus on rikutud ning see võib põhjustada müra ja elektromagnetilise ühilduvuse probleeme [26].

Hall'i efektil baseeruvad vooluandurid mõõdavad juhti ümbritsevat magnetvälja, mis on põhjustatud voolust juhis. Hall'i efekti andurid on kasutatakse, kuna nad ei mõjuta mõõdetava ahela parameetreid ning on saadaval väiksemõõtmelistes integraallülitustes, mis hõlmavad endas Hall'i andurit ning signaalitöötlust. Nendest integraallülituste väljund on analoogsignaali, mille saab suunata otse mikrokontrolleri analoog-digitaalmuundurisse. Hall'i andurite põhilised puudused on nende kõrge hind ning täpsuse sõltuvus temperatuurist [26].

Voolutrafod töötavad trafo põhimõttel, kus primaar- ja sekundaarvool on seotud mähiste keerdude suhtega. Eelkõige kasutatakse neid suurte voolude mõõtmisel. Voolutrafode põhiline eelis on galvaaniline isolatsioon. Põhiliseks puuduseks on vajalikkus vahelduvvoolu sisendsignaali järgi, vältimaks trafo küllastusse sattumist [26].

Erinevate vooluandurite omaduste võrdlus on välja toodud tabelis 5.1.

Tabel 5.1. Vooluandurite omaduste võrdlus

	Šunt	Hall'i efekt	Voolutrafo
Mõõtetäpsus	Hea	Hea	Keskmine
Täpsuse sõltuvus temperatuurist	Hea	Halb	Hea
Hind	Madal	Kõrge	Keskmine
Isoleeritus	Ei	Jah	Jah
Suurte voolude mõõtmise võimalus	Halb	Hea	Hea
Küllastuse/Hüstereesi probleemid	Ei	Jah	Jah
Võimsus kulu	Suur	Väike	Väike
Intrusiivne mõõtmine	Jah	Ei	Ei
AC/DC mõõtmine	Mõlemad	Mõlemad	AC

Eesmärgiks on luua võimalikult kompaktne seade, mis oleks võimeline töötama suurte vooludega (~35A), seejuures väikeste kadudega. Samuti on tähtis, et kõrgema pingega ahelad oleksid juhtimisahelatest isoleeritud. Seega šuntide kasutamine on välistatud. Kuna sarnase voolumõõtmise võimekusega voolutrafo on ebatäpsemad ning mõõtmisel oluliselt suuremad kui Hall'i andurid, on antud töös võetud kasutusele Hall'i andurid.

Täpne kasutusel võetud Hall'i anduri mudel on Allegro ACS758LCB-050B-PFF-T.

Tähtsamad andmed andmelehel [27]:

- Voolu mõõtepiirkond – ± 50 A
- Tundlikkus – 40 mV/A
- Toitepinge – 5 V
- Takistus – 100 $\mu\Omega$

Kuna antud komponendi väljundsignaali maksimaalne pinge on 5 V, kuid mikrokontrolleri ADC suurim lubatud pinge on 3,3 V, on vaja rakendada pingejagurit. Pingejaguri takisti väärtused on arvutatavad valemiga 5.35. Võttes $R_1 = 2$ k Ω on takisti R_2 väärtus 3,9 k Ω .

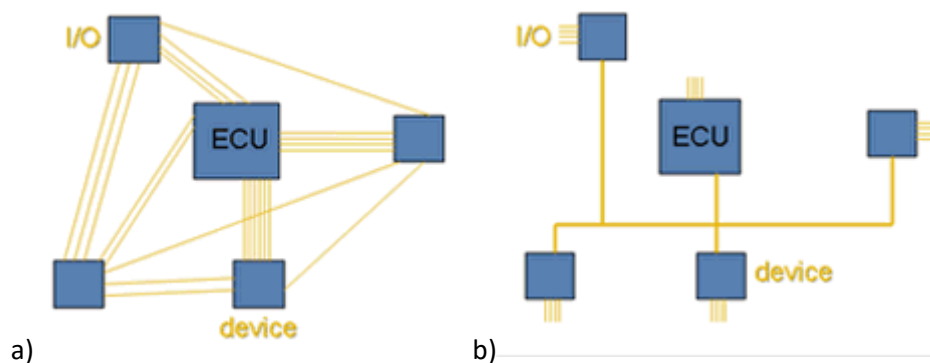
5.8. Andmeside

Seade on mõeldud kasutamiseks koos rakendust juhtiva kontrolleriiga. Rakenduse kontrolleri on mootorikontrolleri jaoks sisendiks, millest saadakse informatsioon soovitud kiiruse, kiirenduse, peatumise, sisse/väljalülitamise, hädapeatumise ja muu informatsiooni kohta.

Mootorikontrolleril endal ei ole sisendeid ega väljundeid. Informatsioon liigub mööda andesidesiini. Antud projektis on kasutusele võetud CAN (Controller Area Network) andmeside. CAN andmeside on laialt levinud ning esialgselt loodud kasutamiseks just sõidukites.

CAN andmeside eelised [28]:

- Odav ning lihtsa ülesehitusega võrk, vähe kaableid. CAN ühendus vajab vaid kahte andmejuhti.
- Kõikidel seadmetel on ligipääs kõikidele sõnumitele selles võrgus. Seadmed ise teavad millist informatsiooni nad kasutama peavad. Tänu sellele on võrgus muudatuste tegemine lihtne.
- Sõnumitel on prioriteedid. Tähtsamad käsud saavad saavad varem täidetud
- Vigaste sõnumite toimetulek. Kõikide sõnumite sisu kontrollitakse. Vigase sõnumi leidmisel kõik võrgu sõlmed ignoreerivad seda sõnumit.



Joonis 5.13. Paralleelühenduse (a) ja CAN võrgu (b) keerukuse võrdlus [28]

CAN võrgus on iga sõlm ühendatud transiiveriga ning see omakorda mikrokontrolleriga. Antud töös, sarnaselt TI F28069M arendusplatformile, on CAN transiiverina kasutusele võetud SN65HVD234D. Transiiveri ühenduskeem on kujutatud Lisas 1 skeemil Communication.

6. TRÜKKPLAADI DISAIN

Trükkplaatide projekteerimiseks on kasutatud tarkvara Altium CircuitMaker.

Antud töö raames valmis esimene prototüüp joonis 6.1 ja 6.2. Prototüübi disainimisel on püütud lähtuda kulutõhususest. Selleks sai projekteeritud kahekihilistele trükkplaatidele. Kokku valmis kolm erinevat trükkplaati:

- Vaheldi moodul (10 cm x 10 cm)
- Juhtmoodul (5 cm x 10 cm)
- Alalisvoolu vahelüli (5 cm x 10 cm)

Kahekihilise trükkplaadi valikul on ka negatiivsed küljed:

- Pikemad ja looklevamad rajad
- Raskendatud komponentide paigutus
- Suuremad mõõtmed

Parima komponentide ja trükkplaadi radade paigutuse leidmiseks sai katsetatud erinevaid paigutusviise. Põhiliseks paigutust mõjutavaks teguriks oli erinevate süsteemi osade (toiteahelad, loogikalülitused, tüürahelad, jõuahelad) eraldatus.

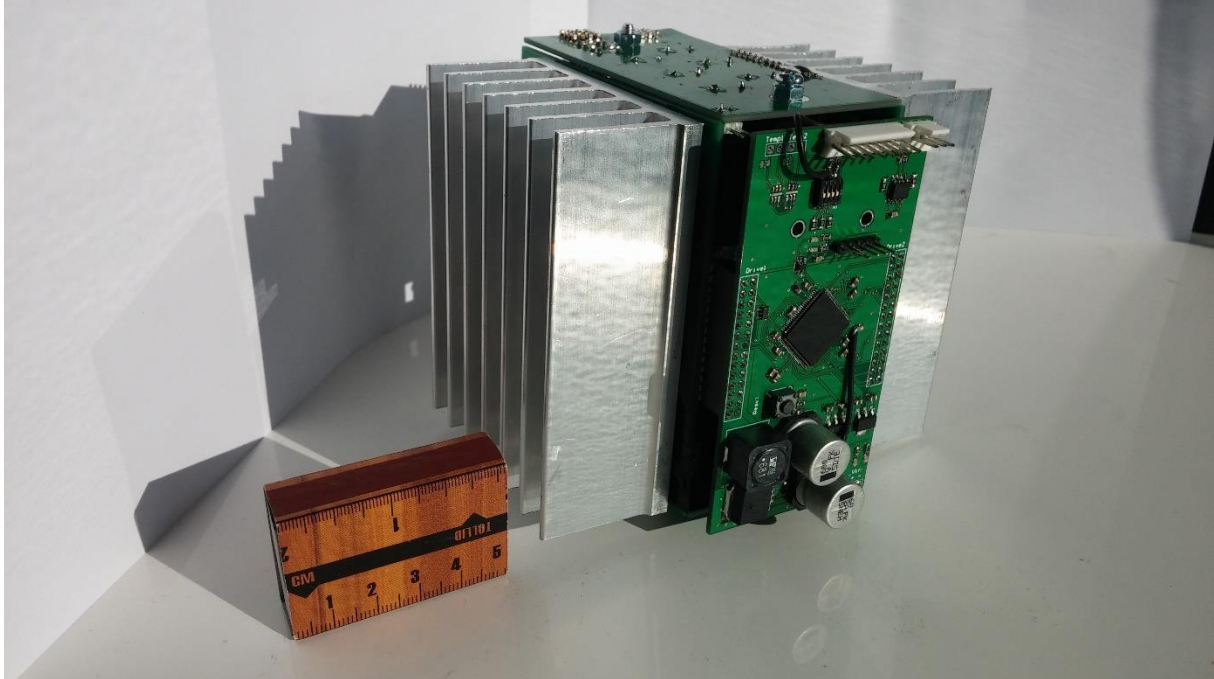
Suurimaks takistuseks osutus jõuahelate radade paigutus. Jõulülitite tüürsignaali rajad peaksid olema lühikesed ning omama väikest induktiivsust. Seega sai need rajad projekteeritud võimalikult lühikeseks ning otseseks. Samas on aga väikeste kadude ja pingelangude tarbeks vajalik, et suure vooluga ahelad oleksid võimalikult laiad ja jämedad. Seega on püütud need ahelad võimalikes kohtades projekteerida kahekihiliselt. Probleem seisnes jõuvooluahelate ja jõulülitite tüürahelate lõikumises. Seega katkesid jõuvoolu rajad ühel trükkplaadi poolel.

Probleemi lahendamiseks on kasutusele võetud radade läbiviigud ning katkestused ületatakse teiselt poolt trükkplaati. Samuti on kasutusele võetud jämedad, 140 µm paksuse vasekihiga rajad. Alalispinge vahelüli trükkplaat on samuti 140 µm vasekihiga, juhtmoodul on aga 70 µm vasekihi paksusega trükkplaadil.

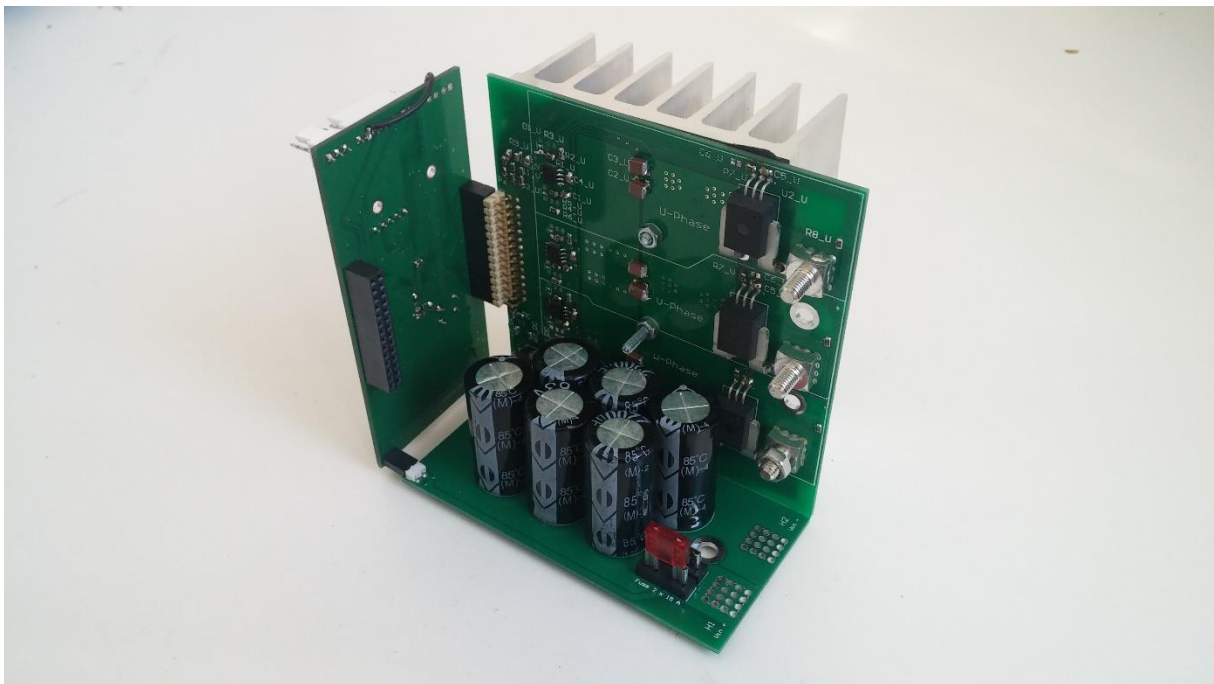
Kuna valitud vooluandurite ja pingemõõtmisahelate väljudid ei ole diferentsaalsignaalid, siis on need tundlikud elektromagnetilise müra suhtes. Müra mõju vähendamiseks on

mõõtesignaalid jõuahelatest võimalikult kaugemale viidud. Samuti on analoogahelate tarbeks kasutusele võetud eraldi maandus.

Trükkplaadi joonised asuvad lisas 7.



Joonis 6.1. Esimene prototüüp valmiskujul



Joonis 6.2. Vaade seestpoolt, ainult ühe jõumooduliga

7. JUHTIMISALGORITMI KOOSTAMINE

Antud töö peaesmärgiks on riistvara arendus. Tarkvara osas on välja toodud vaid miinimum, et tõestada projekteeritava mootorikontrolleri põhifunktsionaalsust ehk mootori pöörlema panemist vektorjuhtimise abil.

Kontrolleri testimiseks ja kasutama õppimiseks on parimad vahendid Texas Instrumentsi MotorWare paketi leiduvad laboritööd. Tegemist on õppematerjalide ja näidiskoodide paketiga, mis annab praktilise kogemuse kontrolleri seadistamisest töötamaks valitud mootoriga.

Laboritööde sisu:

- Mootori parameetrite identifitseerimine ja riistvara seadistamine
- Kiiruse juhtimine
- Momendi juhtimine
- Väljanõrgenemine
- Kahe mootori juhtimine

Mootorikontrolleri riistvara projekteerimisel on arvestatud sellega, et nimetatud laboritööde sooritamisel peaks tegema võimalikult vähe muudatusi olemasolevas koodis. Antud mootorikontrolleril on võimalik läbida TI F28069M LaunchPadXL arendusplatvormi jaoks mõeldud laboritööd. Siiski osadest riistvaralistest erinevustest tingituna tuleb lisaks laborijuhendis olevatele seadistustele teha veel mõned koodimuudatused.

Failis nimega user_j1.h ja user_j2.h tuleb teha järgnevad muudatused:

Kõrgemast toitepingest ja teistsugusest pingejagurist mõõtmisahelates tingituna

```
#define USER_ADC_FULL_SCALE_VOLTAGE_V    (54.696)
```

Teistsugusest voolu tagasisidest tingituna

```
#define USER_ADC_FULL_SCALE_CURRENT_A    (100.0)
```

Pinge mõõtmisahela filtrist tingituna

```
#define USER_VOLTAGE_FILTER_POLE_Hz    (360.0)
```

8. KATSETAMINE

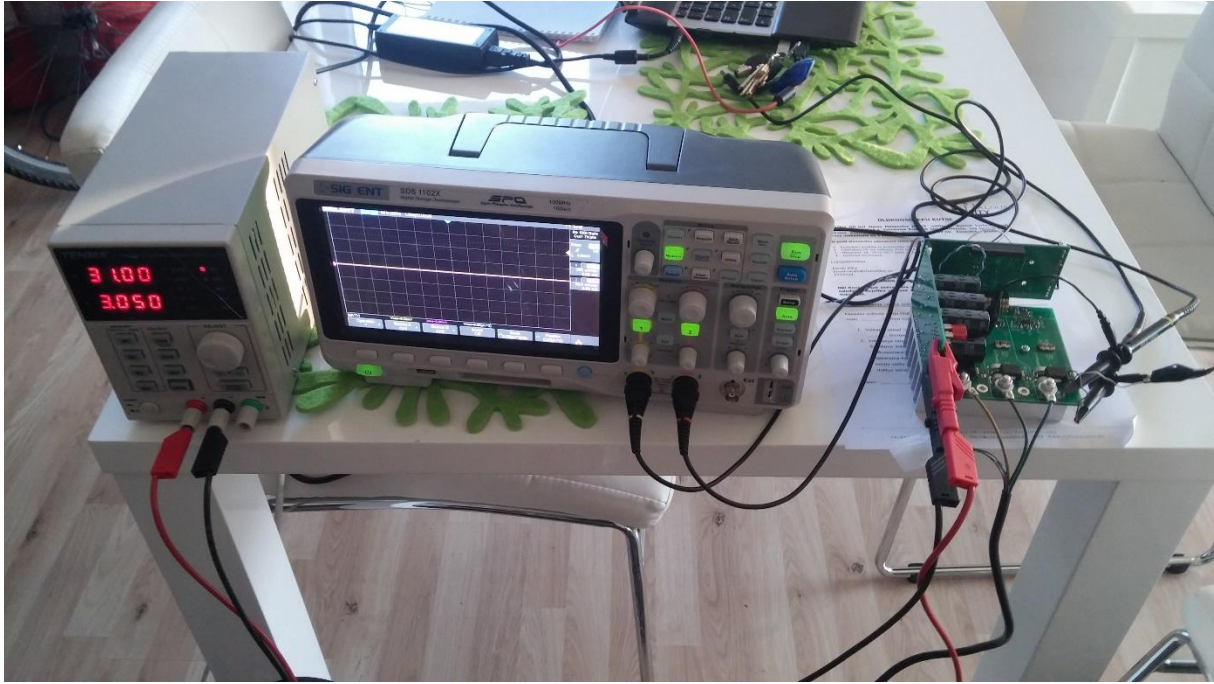
Elektriratta rummumootoriga on läbi viidud tühijooksukatse. Elektrijalgratas on asetatud kohapeal sõitmise stendile (joonis 8.1). Koormuseks on jalgratta enda kaal ning stendi rullikute veerehõõre. Katse on sooritatud kiirustel 10 pööret minutis kuni väljanõrgenemise kiiruseni 260 pööret minutis. Kogutud on andmed muunduri sisendpinge, sisendvoolu, väljundpinge ja väljundvoolu kohta. Mõõtmised on sooritatud hetkel kui kiirus on stabiliseerunud. Filtreeritud faasivoolu ja -pinge signaalid on kujutatud joonisel 8.5. Filtreeritud faasipinged ja liinipinge on kujutatud joonisel 8.6. Jäädvustatud andmete põhjal on leitud väljund- ja sisendvõimsus ning nendevaheline suhe. Tulemused on kujutatud joonisel 8.3.

Kasutatud seadmed:

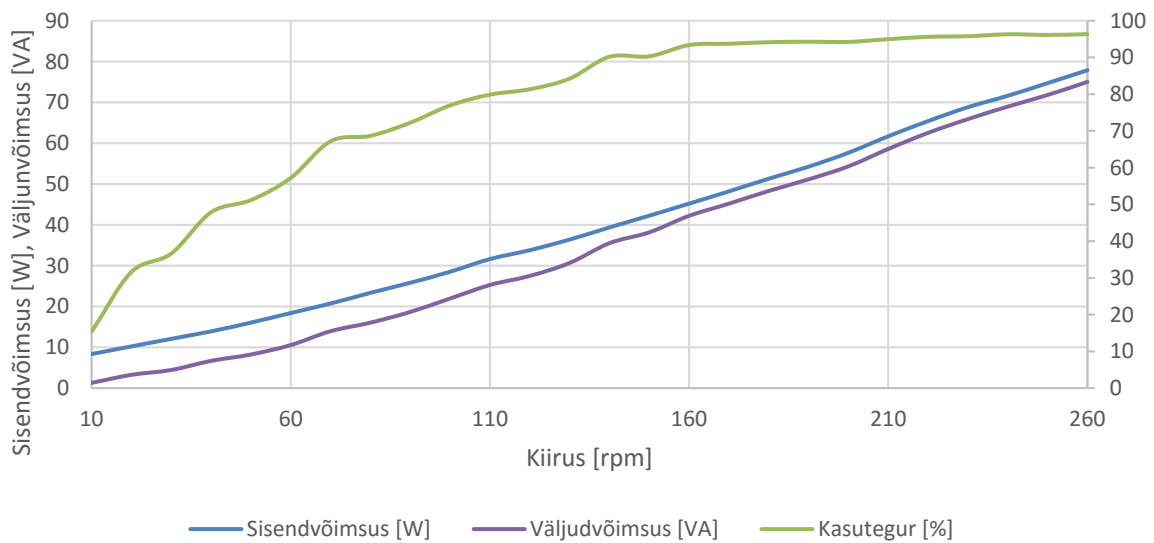
- Multimeeter Peaktech 3725
- Ostsilloskoop Siglent SDS1102X
- Ampertangid Fluke 80I-110S
- Toiteplokk Tenma 72-10480
- Rummumootor 1kW, 48V
- Jalgratta kohapeal sõitmise stend



Joonis 8.1. Kohapeal sõitmise stend

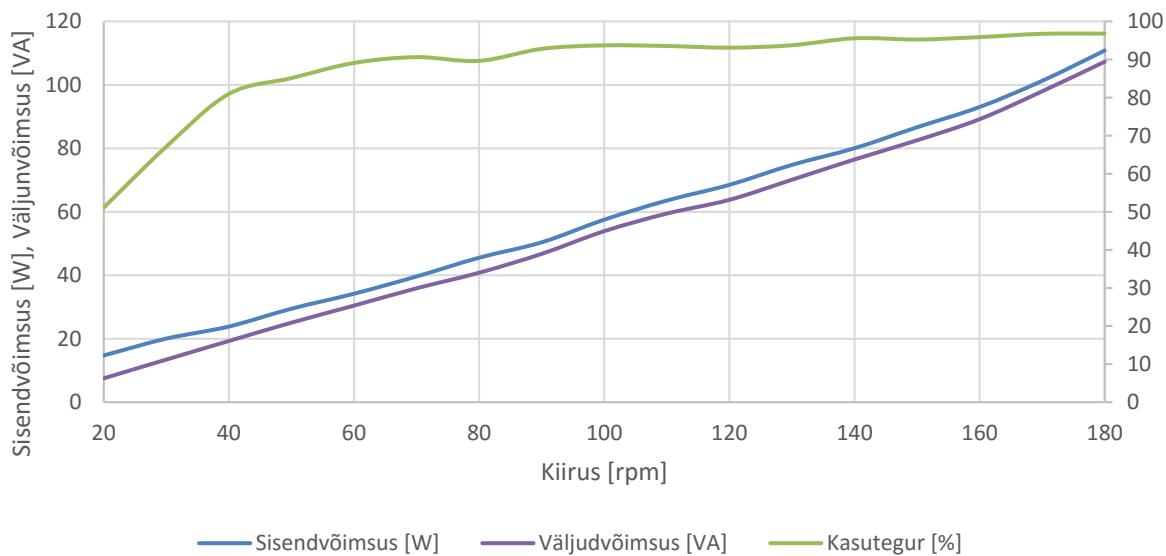


Joonis 8.2. Katseseadmed

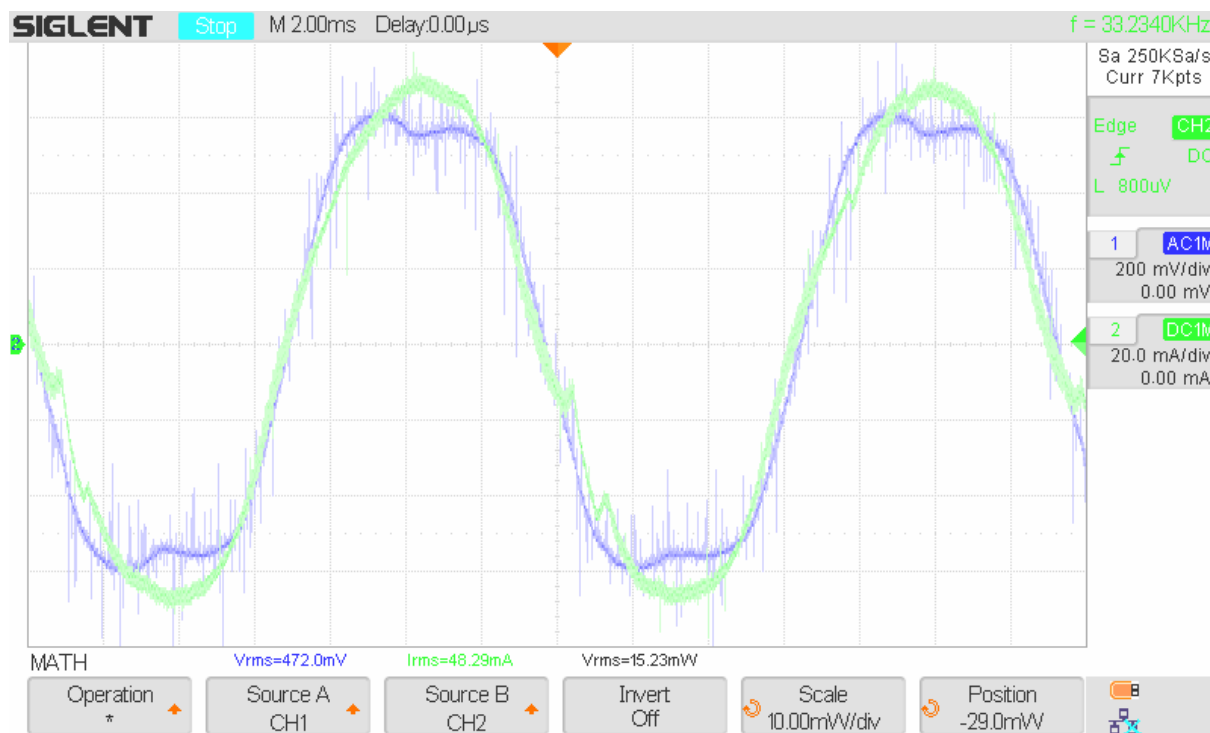


Joonis 8.3. Ilma koormuseta katse, muunduri väljund- ja sisendvõimsuse suhe

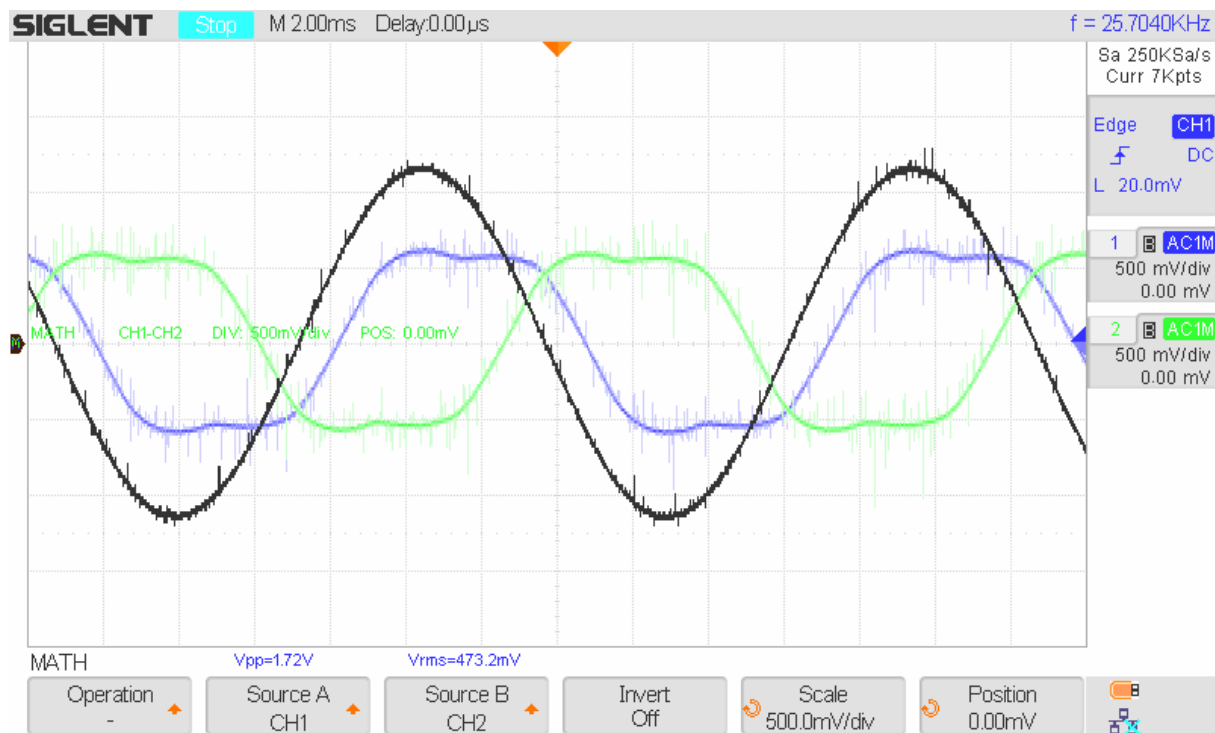
Koormatud katse puhul on koormuseks lisatud inimene, massiga 74 kg. Toiteallikana on kasutatud 5,8 Ah liitium-polümeer akut nominaalpingega 22,2 V. Katse on sooritatud kiirustel 20 kuni 180 pööret minutis. Tulemused on kujutatud joonisel 8.4.



Joonis 8.4. Koormatud katse, muunduri väljund- ja sisendvõimsuse suhe



Joonis 8.5. SVM moduleeritud faaspinge(sinine) ja faasivool(roheline)



Joonis 8.6. SVM moduleeritud faasipinged (sinine, roheline) ja liinipinge (must)

10. PUUDUSED JA EDASIARENDAMISE VÕIMALUSED

Antud töö põhilised puudused on tingitud majanduslikust kokkuhoiust, mille tõttu sai trükkplaadid projekteeritud kahekihilistele trükkplaatidele. Selle tõttu kannatasid trükkplaadi komponentide paigutus ning radade vedamine. Sellest tingituna ei saavutatud väiksemaid võimalikke mõõtmeid ning ebaoptimaalsest radade vedamisest võib tekkida rohkem häiringuid. Järgmine prototüüp tuleks projekteerida neljakihilisele trükkplaadile.

Seadme mõõde oleks saanud täiendavalt vähendada jahutuse arvelt. Antud töös sai jahutuse elementide valikul arvestatud pideva maksimaalse koormusega, kuid reaalses rakenduses on pidevalt sellise koormuse kasutamine ebatõenäoline.

Esimesel prototüübil ei ole palju tähelepanu pööratud seadme konstruktsioonile. Seadet hoiavad koos elektriliste ühenduste pistikud ning tugipostid. Jahutus on kinnitatud vaid kahe poldiga. Käes hoides tundub seade piisavalt tugev, kuid vibratsiooni või tugevamate löökide mõjul võib see lagunema hakata. Praegu ei ole seade ka ilmastikukindel. Korpuse lisamine aitaks lahendada mainitud probleemid.

Puuduoleva riistvara tõttu ei olnud võimalik seadet katsetada sellele ettenähtud koormuse juures. Kuigi seade peaks olema võimeline töötama toitepingega kuni 48 V, ei olnud seda võimalik testida. Suurimaks toitepingeks, millga antud töö raames katsed sai sooritatud, on 31 V ning ka see oli väikese koormusega sooritatud katse. Normaalkoormusega katse sai sooritatud liitium-polümeer akuga nimitoitepingega 22,2 V.

KOKKUVÕTE

Antud magistritöö valmis huvist elektriagamite ja elektrisõidukite vastu. Uurimustöö käigus sai selgeks, et antud hetkel puuduvad universaalsed lahendused väikelektrisõidukite mootorite juhtimiseks. Kõik olemasolevad lahendused mootorite juhtimiseks on loodud spetsiifiliste rakenduste tarbeks, nagu elektrirattad, ratastoolid, mootorpaadid. Antud töö eesmärgiks oli projekteerida ning ehitada valmis esmane prototüüp universaalsemast lahendusest.

Universaalsuse tagab rakendusspetsiifiliste sisendite ja väljundite puudumine. Rakenduse tööd juhtivad signaalid kogutakse kokku mootorikontrollerist eraldiseisvasse rakenduse kontrollerisse ning sealt edastatakse mootori juhtimiseks käsklused mootorikontrollerisse üle andmeside. Selline lahendus muudab kogu süsteemi universaalsemaks ning modulaarsemaks.

Mootorikontroller on disainitud modulaarselt. See koosneb 3 trükkplaadi koostust: juhtplaat ning kaks inverteeri moodulit koos alalisvoolu vahelüliga. Modulaarsuse eesmärgiks on võimaldada süsteemi arendamist. Selline lahendus tuleks kasuks näiteks elektrilise jalgratta puhul, kus esialgselt on plaanis kasutada ühte vedavat ratast, kuid hiljem on tekib soov suurema jõudluse järgi maastikusõidul.

Eesmärgiks on juhtida väikesõidukites populaarseks saanud mootorite tüüpe: harjadeta alalisvoolumootorid ja püsomagnet sünkroonmootorid. Antud töö käigus sai uuritud erinevaid mootorite juhtimise viise, trapetsoid ja siinuseline kommuteerimine ning vektorjuhtimine. Uuringu tulemusena selgus, et vektorjuhtimisel on mitmeid eeliseid, millest tähtsamad on vaiksem töötamine, suurem stabiilsus/jõudlus erinevatel kiirustel, pikem akukestvus.

Lisaks vektorjuhtimise eelistele, on tänapäeval selle rakendamine lihtsustatud tänu mikrokontrollerite tootjate poolt arendatud lahendustele. Erinevate tootjate lahenduste võrdlemisel tundus antud rakenduse jaoks parim lahendus Texas Instrumentsi InstaSPIN-FOC. Antud lahendus võimaldab juhtida nii püsimangetmootoreid kui ka induktsioonmootoreid. Vektorjuhtimiseks on vajalikud mootori parameetreid, mida sageli sellistes rakendustes kasutatavate mootorite kohta pole teada. Kasutatav lahendus elimineerib selle probleemi, kuna on võimeline mootori parameetrid ise leidma, kasutades spetsiaalset algoritmi ning elementaarseid mootori andmeid, millest osad või kõik leiab mootori nimesildilt/andmelehelte ning ülejäänud visuaalse vaatluse alusel.

Suurema osa tööst moodustab komponentide valik tähtsamate ahelate tarbeks. Käsitletavateks komponentideks on jõulülitid, tüürahelad, jahutus, alalisvoolu vahelüli, toiteahelad ja mikrokontroller.

Suur tähtsus elektrisõidukitel on pikk akukestvus ning seadmete väike ruumikasutus. Seetõttu on tähtis kadude vähendamine. Antud töö raames sai kalkuleeritud ning omavahel võrreldud erinevate jõutransistoride kadusid, võttes näidisrakenduseks elektrijalgratta. Valitud transistorile sai valitud ka sobiv tüürahel ning jahutus.

Ajamisüsteemi tähtis osa on ka alalisvoolu vahelüli, mille ülesandeks on toite stabiliseerimine ning energia salvestamine. Selle põhikomponendiks on kondensaatorid. Kondensaatorite valiku kriteeriumiteks on selle talutava pulseeriva voolu väärtus ning lubatav pingekõikumine alalisvoolu vahelüli. Töö raames sai kalkuleeritud need väärtused ning valitud sobivad kondensaatorid ning nende arv.

Vektorjuhtimise tarbeks on tähtsad voolude ja pingete tagasisided. Selleks sai võrreldud erinevaid voolutagasiside võimalusi. Oma kompaktsuse ja väikeste kadude tõttu osutusid valituks Halli anduritel baseeruvad vooluandurid. Vooluandurite juurde ja pingemõõtmisahelatesse oli vaja kalkuleerida vajalikud pingejagurid ning filtrid.

Kogu seadme tööd juhib mikrokontroller. Selle valikul lähtuti vajalike sisendite ja väljundite olemasolust ja nende arvust. Tähtsamad neist on pulsilaiusmodulaatorid, analoog-digitaalmuundurid ning CAN andmeside. Tähtis aspekt on ka jõudlus. Kahe mootori samaaegseks vektorjuhtimiseks on vaja suurt arvutusvõimsust. Töö hõlbustamiseks on valitud mikrokontroller, mis omab vastavaid tarkvaralisi pakette mootori juhtimiseks, antud juhul InstaSPIN-FOC lahendus.

Töö lõpuks valmis ka esimene prototüüp, millega on tehtud ka esmased katsetused. Muunduri suurim lubatud toitepinge on 48 V ning on mõeldud juhtima mootoreid võimsusega kuni 1 kW. Mõnest väikesest disainiveast hoolimata on tegemist töötava seadmega. Seade on kompaktne (125 mm x 125 mm x 115 mm), kuid seda edasi arendades on võimalik mõõtmeid veelgi vähendada.

Kokkuvõttes on antud tööga saavutatud algne eesmärk, milleks oli väikeelektrisõidukite tarbeks universaalse ning modulaarse lahenduse idee elluviimine. Selle raames sai põhjendatult valitud elektriajamile sobivad põhikomponendid. Töö tipnes töötava lahenduse valmimisega.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Veebilehekülg <http://www.electric-bicycle-guide.com/ebike-controller.html>,
vaadatud 20.04.2016
2. Electricbike veebilehekülg <https://www.electricbike.com/sine-wave/>,
vaadatud 21.04.2016
3. Ebikes veebilehekülg <http://www.ebikes.ca/product-info/grinfineon.html#faq-on-the-current-dual-sensoredsensorless-infineon-controllers>,
vaadatud 21.04.2016
4. Chauhan S. Motor Torque Calculations For Electric Vehicle – International Journal of Scientific ja Technology Reaserch, Vol 4, 2015, No. 8.
5. Gupta U. Research On Permanent Magnet BLDC for small electric vehicle. Uurimustöö. – Noida: Amity University Dept. of Electrical and Electronic engineering
6. Bello A.; Kilishi I.M.; Bari M.M.; Abubakar U. Comparative Review Of PMSM And BLDCM Based On Direct Torque Control Method - International Journal of Scientific ja Technology Reaserch, Vol 3, 2014, No. 3.
7. Meulen V.; Maurin J. Current source inverter vs. Voltage source inverter topology. White paper, 2014
http://www.eaton.com/ecm/idcplg?IdcService=GET_FILE&allowInterrupt=1&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Primary&dDocName=WP020001EN
vaadatud 12.03.2016
8. Nidec Corporation kodulehekülg
<http://www.nidec.com/en-NA/technology/motor/basic/00005/>, vaadatud 20.04.2016
9. Lee S. A Comparison study of the commutation methods for the three-phase permanent magnet brushless DC motor. Uurimustöö. – Pennsylvania: Berks University
10. Scalar Sensorless Methods to Drive BLDC Motors. Rakendamise juhised. Atmel
http://www.atmel.com/Images/Atmel-8305-AVR928-Scalar-Sensorless-Methods-to-Drive-BLDC-Motors_Application-Note.pdf
11. Fisher P. High Performance Brushless DC Motor Control. Bakalaureusetöö. – Central Rockhampton: Central Queensland University Australia, School of Engineering & Technology 2014

12. Design Trends. Publikatsioon. Motor Design Inc. 2008
http://www.motion-designs.com/images/DTrends_May_2008.pdf,
 vaadatud 19.02.2016
13. InstaSPIN-FOC™ and InstaSPIN-MOTION™. Kasutusjuhend. Texas Instruments.
<http://www.ti.com/lit/ug/spruhj1f/spruhj1f.pdf>, vaadatud 22.04.2016
14. Blake C. ; Bull C. IGBT or MOSFET: Choose Wisely. Rakendamise juhise. International Rectifier. <http://www.irf.com/technical-info/whitepaper/choosewisely.pdf>, vaadatud 18.01.2016
15. Vodovozov V.; Jansike R. Jõupooljuhtmuundurid – Tallinn, 2006 – 117.
16. Graovac D.; Pürschel M.; Kiep A. MOSFET Power Losses Calculation Using the DataSheet Parameters. Rakendamise juhise. Infineon.
application-notes.digchip.com/070/70-41484.pdf vaadatud 15.01.2016
17. Sauriol C. HEAT SINKS. Õppematerjal. – Philadelphia: Swarthmore College 2003
<http://www.swarthmore.edu/NatSci/echeeve1/Class/e12Code/HEAT-NOTE.pdf>,
 vaadatud 13.02.2016
18. Practical considerations in high performance MOSFET, IGBT and MCT Gate drive circuits. Rakendamise juhise. Unitrode.
<http://www.ti.com/lit/an/slva105/slva105.pdf>, vaadatud 27.01.2016
19. McArthur R. Making Use of Gate Charge Information in MOSFET and IGBT Data Sheets. Rakendamise juhise. Advanced Power Technology.
http://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/14697-making-use-of-gate-charge-information-in-mosfet-and-igbt-data-sheets, vaadatud 24.01.2016
20. Design and Application Guide of Bootstrap Circuit for High-Voltage Gate-Driver IC. Rakendamise juhise. Fairchild Semiconductors
<https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-6076.pdf>,
 vaadatud 09.02.2016
21. Wen H.; Xiao W.; Wen X.; Armstrong P.R. Analysis and Evaluation of DC-Link Capacitors for High Power Density Electric Vehicle Drive Systems - IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol 61, 2012, No. 7
22. Renken F. Analytic Calculation of the DC-Link Capacitor Current for Pulsed Three-Phase Inverters. Uurimustöö. Siemens VDO Automotive AG.
23. Hauke B. Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage. Rakendamise juhise. Texas Instruments. 2015 <http://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf>,
 vaadatud 11.02.2016

24. TL2575 DC/DC muunduri andmeleht.
<http://www.ti.com/lit/ds/slvs638c/slvs638c.pdf>, vaadatud 20.04.2016
25. Horowitz P.; Hill W. The Art of Electronics – New York: Cambridge University Press, 2015 – 1192.
26. Lepkowski J. Motor Control Sensor Feedback Circuits. Rakendamise juhised. Microchip Technology Inc.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00894a.pdf>, vaadatud 04.03.2016
27. Allegro ACS758 vooluanduri andmeleht.
<http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS758-Datasheet.ashx>,
vaadatud 10.02.2016
28. National Instruments veebilehekülg
<http://www.ni.com/white-paper/2732/en/>, vaadatud 13.03.2016
29. Himamshu Prasad V. Analysis and Comparison of Space Vector Modulation Schemes for Three-leg and Four-leg Voltage Source Inverters. Magistritöö. – Virginia: Polytechnic Institute and State University, Electrical Engineering 1997

LISAD

Lisa 1. Juhtmooduli skeemid

Lisa 2. Jõumooduli skeemid

Lisa 3. Alalisvoolu vahelüli skeem

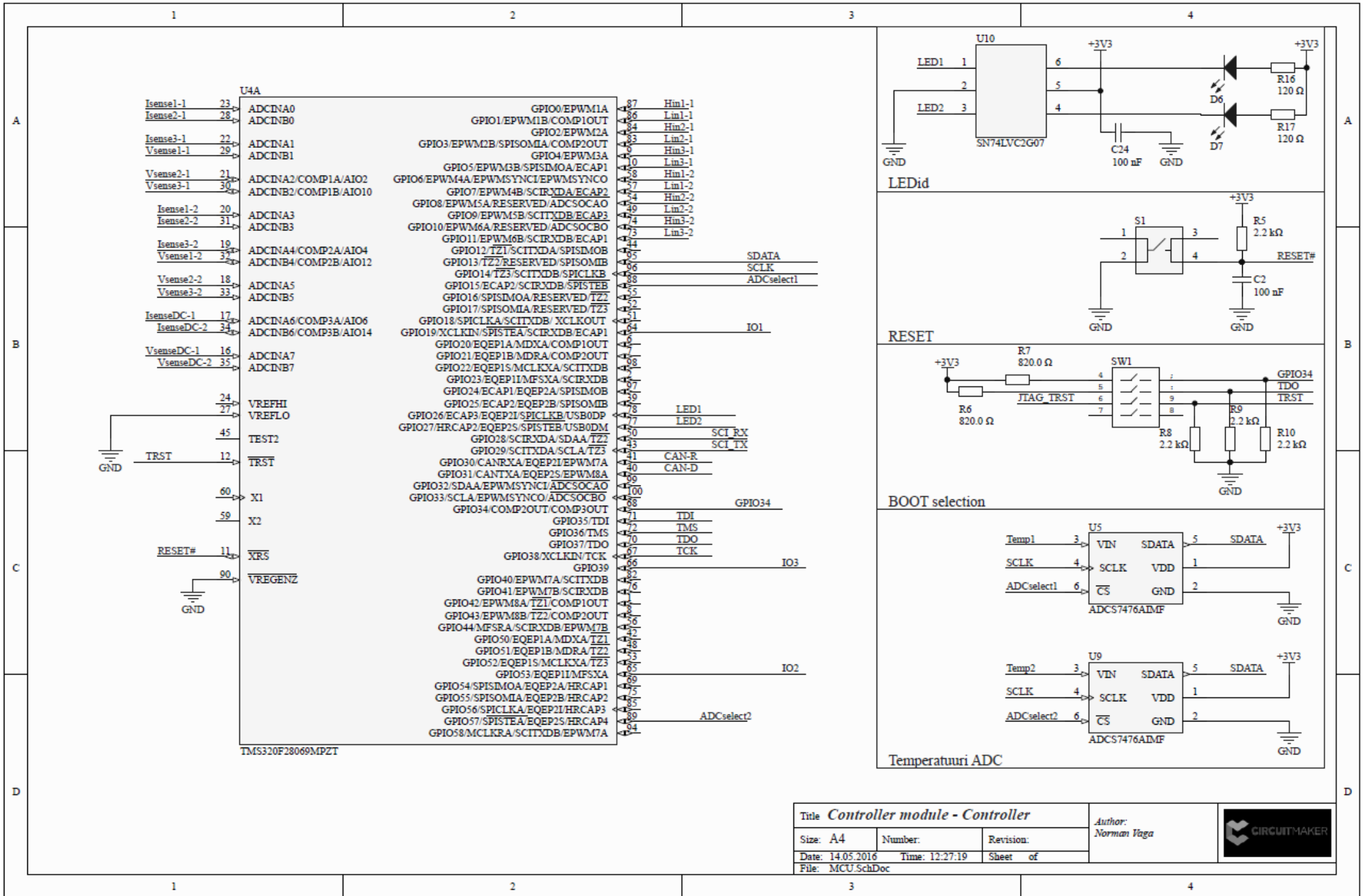
Lisa 4. Juhtmooduli komponentide loetelu

Lisa 5. Vaheldi komponentide loetelu

Lisa 6. Alalisvoolu vahelüli komponentide loetelu

Lisa 7. Trükkplaatide joonised

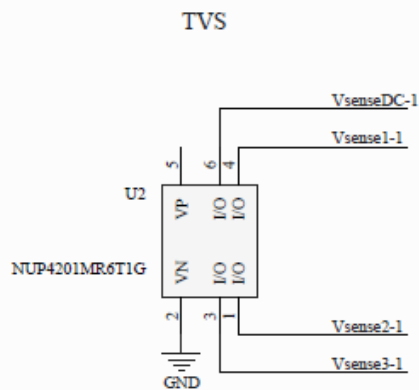
Lisa 1. Juhtmooduli skeemid



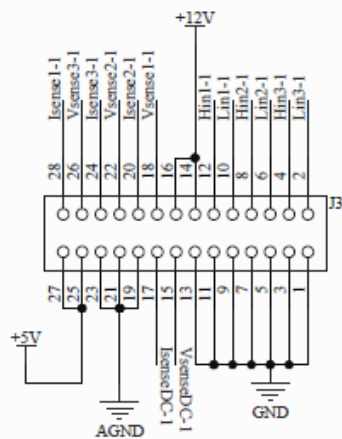
Title <i>Controller module - Controller</i>		
Size: A4	Number:	Revision:
Date: 14.05.2016	Time: 12:27:19	Sheet of
File: MCU.SchDoc		

Author:
Norman Vaga

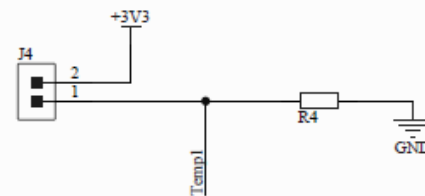




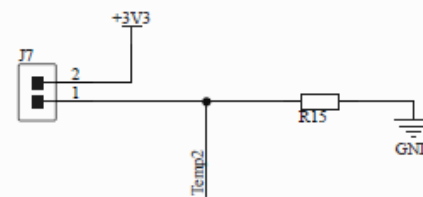
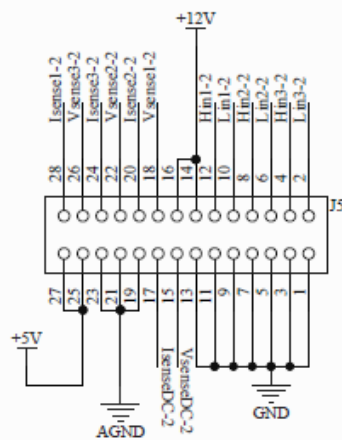
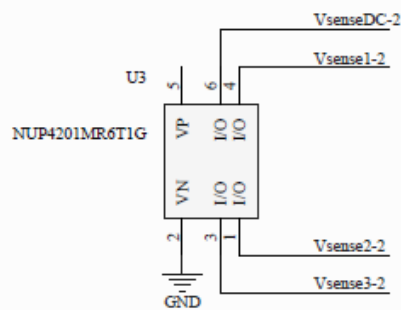
Ühendus Inverteriga



Temperatuurianduri ühendus



Inverter 1



Inverter 2

Title **Controller module - Connectors**

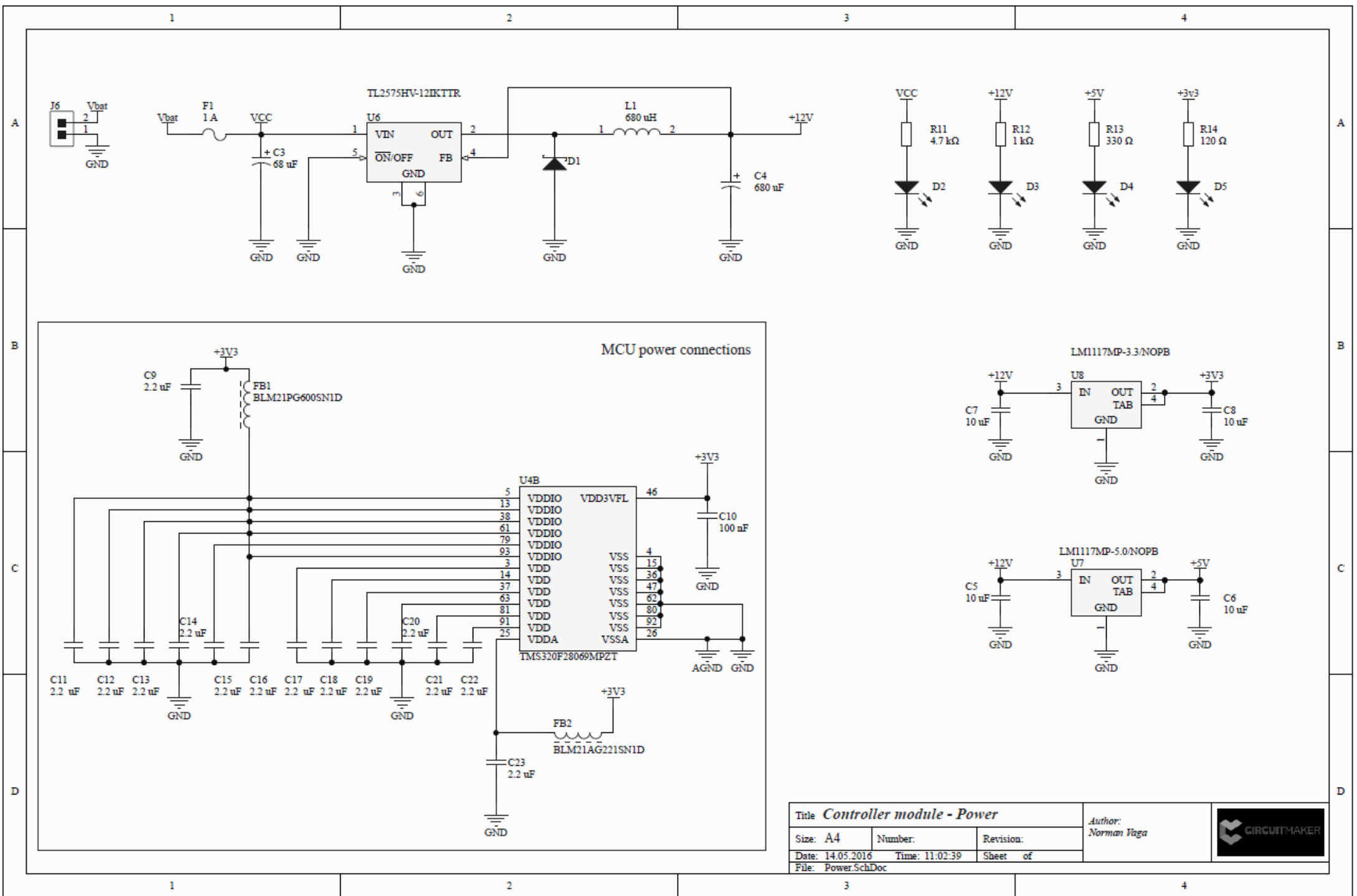
Author:
Norman Taga

Size: A4 Number: Revision:

Date: 14.05.2016 Time: 11:02:18 Sheet of

File: Connectors.SchDoc

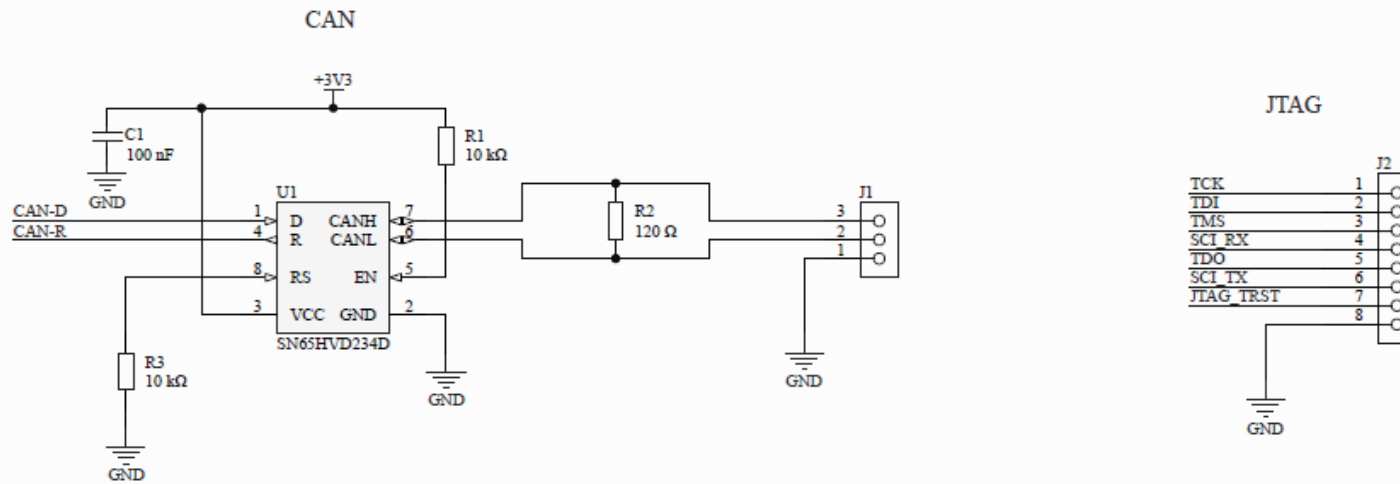




Title <i>Controller module - Power</i>		
Size: A4	Number:	Revision:
Date: 14.05.2016	Time: 11:02:39	Sheet of
File: Power.SchDoc		

Author:
Norman Itaga





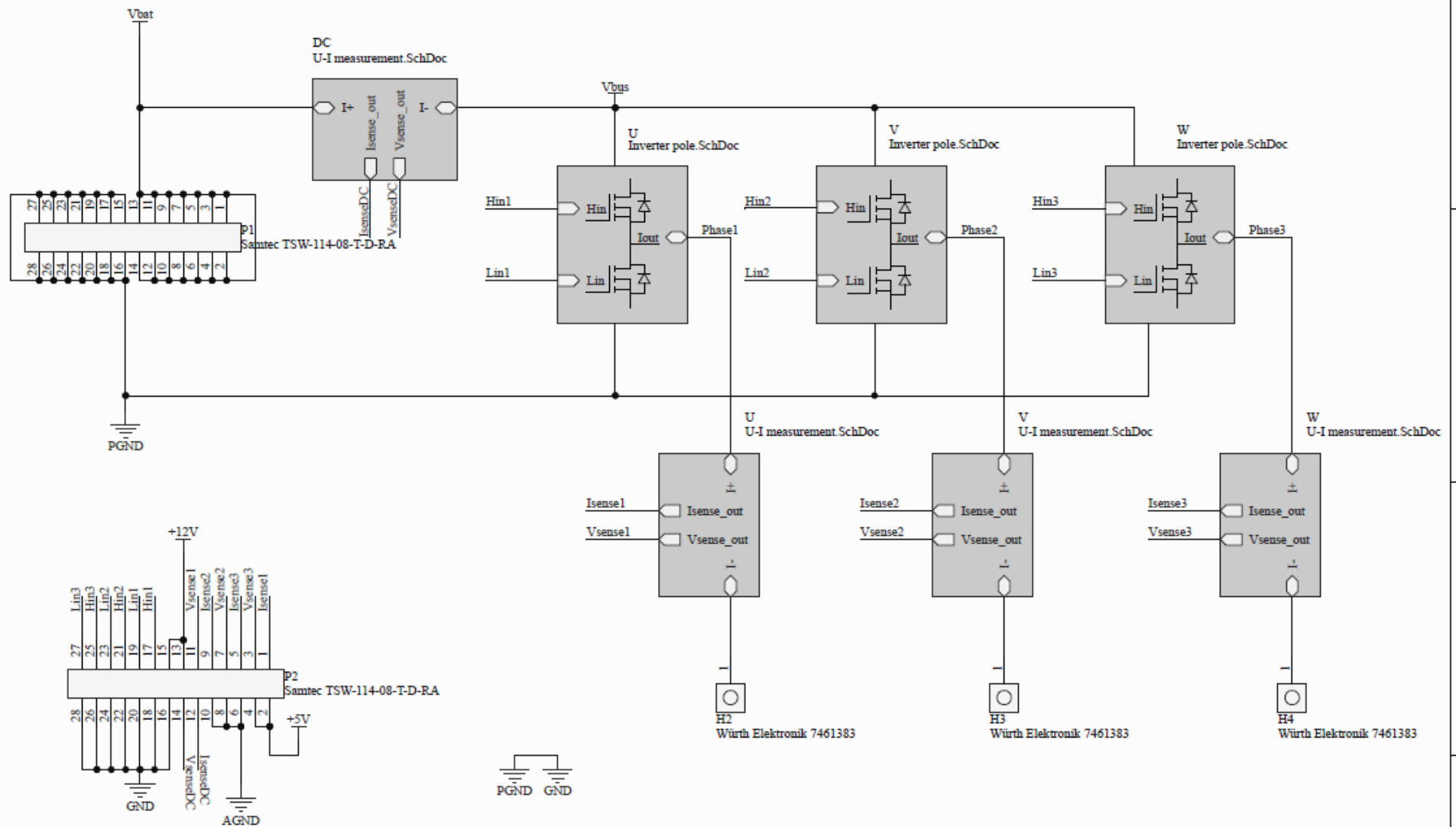
Title *Controller module - Communication*

Author:
Norman Iyaga

Size: A4	Number:	Revision:
Date: 14.05.2016	Time: 11:03:11	Sheet of
File: Communication.SchDoc		



Lisa 2. Jõumooduli skeemid

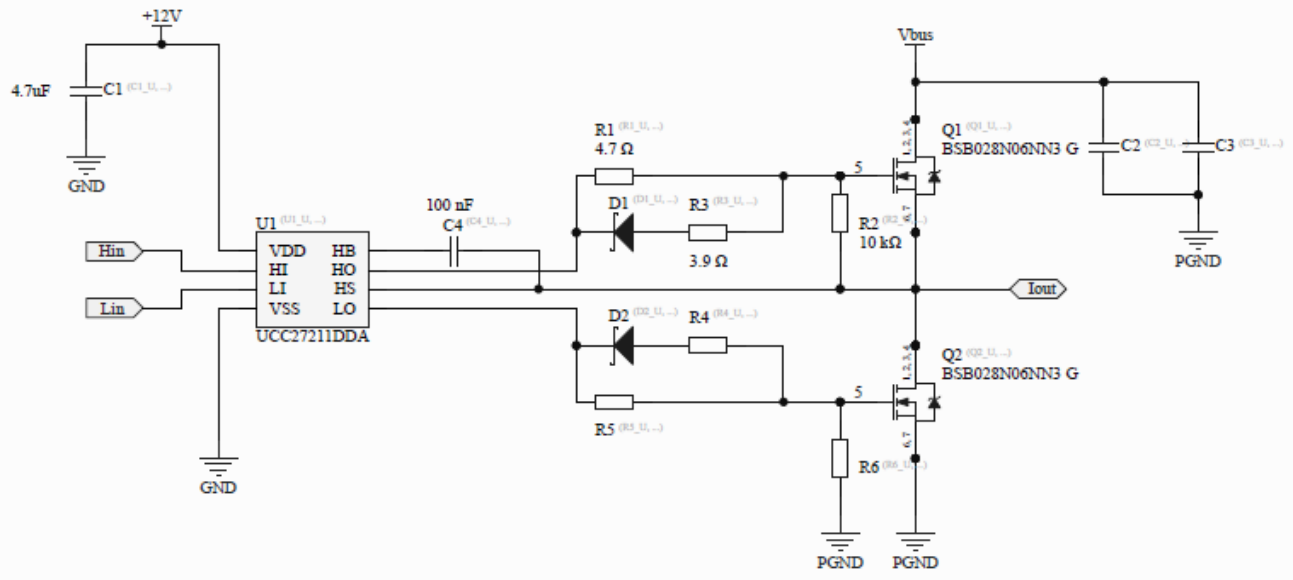


Title *Drive module - Inverter overview*

Author:
Norman Vaga

Size: A4 Number: Revision: 1
Date: 14.05.2016 Time: 13:05:17 Sheet: of
File: Inverter.SchDoc

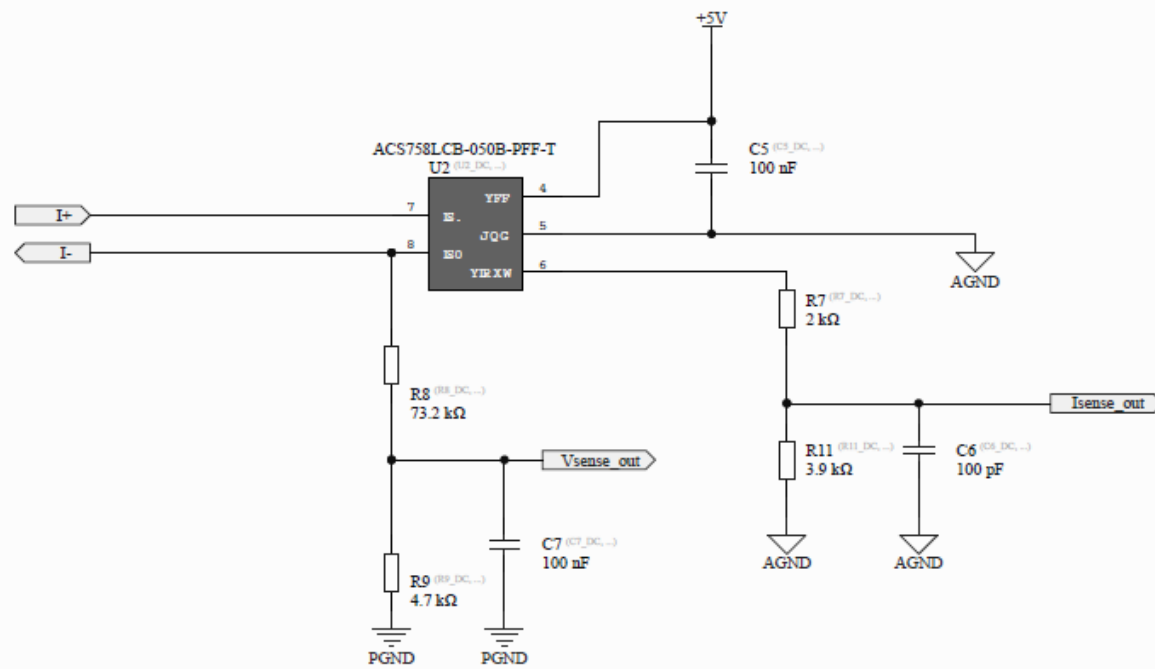




Title <i>Inverter module - Inverter pole</i>		
Size: A4	Number:	Revision:
Date: 14.05.2016	Time: 13:05:29	Sheet of
File: Inverter pole.SchDoc		

Autor:
Norman Vaga





Title *Inverter module - Measurement circuit*

Author:
Norman Yaga

Size: A4

Number:

Revision:

Date: 14.05.2016

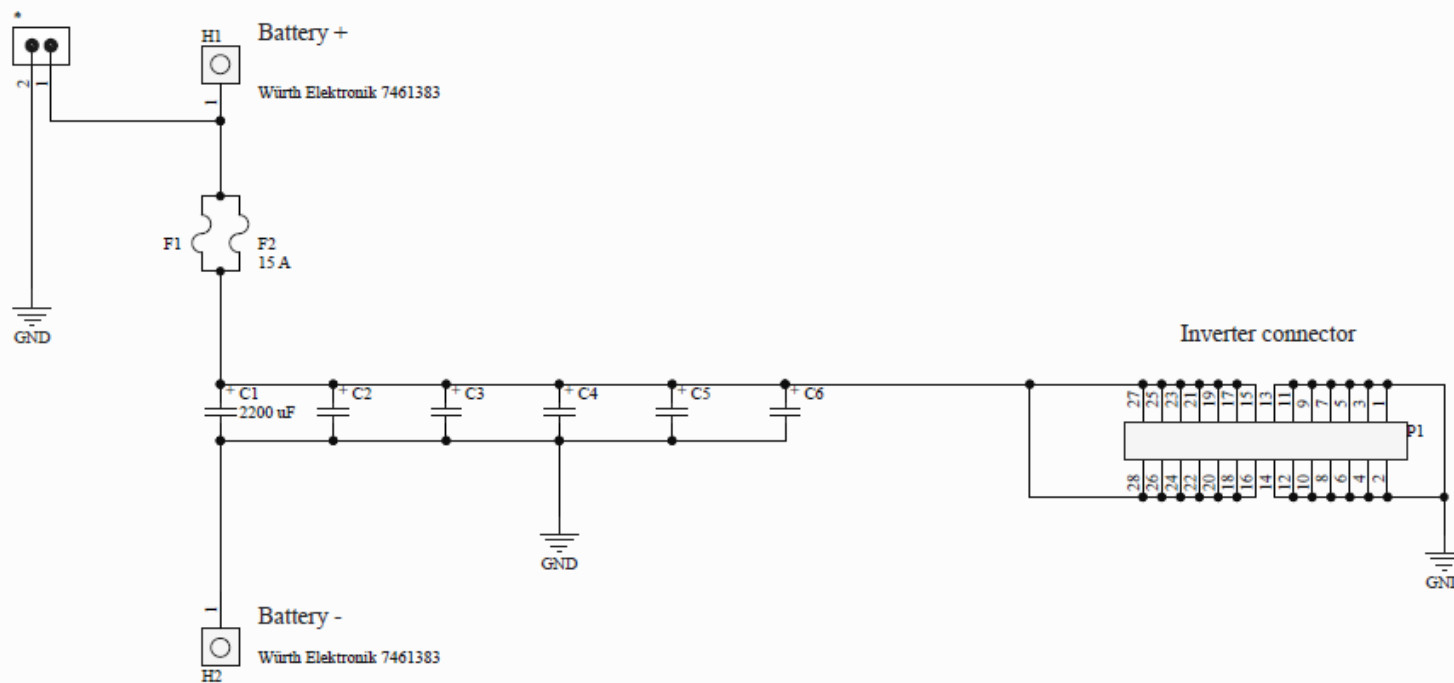
Time: 10:59:54

Sheet of

File: U-I measurement.SchDoc



Lisa 3. Alalisvoolu vahelüli skeem



Title <i>DC link</i>		
Size: A4	Number:	Revision:
Date: 14.05.2016	Time: 11:03:30	Sheet of
File: DClink.SchDoc		

Autor:
Norman Tõga



Lisa 4. Juhtmooduli komponentide loetelu

Kirjeldus	Komponendi mudel	Väärtus	Kogus	Skeemitähis	Pakend
CAP CER 0.1 uF; 50 V	0805B104K500CT	100 nF	4	C1, C2, C10, C24	0805
Cap Aluminum Lytic 68uF 100V	Panasonic EEV-FK2A680Q	68 uF	1	C3	
Cap Aluminum Lytic 680uF 100V	Panasonic EEV-FK1V681Q	680 uF	1	C4	
CAP CER 10UF 16V	C0805C106K4PACTU	10 uF	4	C5, C6, C7, C8	
CAP CER 2,2 uF 10 V	C2012X5R1A225K085AA	2.2 uF	14	C9, C11, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19, C20, C21, C22, C23	0805
Schottky Rectifier 60 V 1 A	NXP PMEG6010CEJ,115		1	D1	SOD-323F
Green LED	TLMP1100-GS08		6	D2, D3, D4, D5, D6, D7	0603
1 A fuse	1206SFF050F/63-2		1	F1	1206
Ferriit bead	BLM21PG600SN1D		1	FB1	0805
Ferriit bead	BLM21AG221SN1D		1	FB2	0805
Header; 3 POS	22-23-2031		1	J1	
Header 8 POS	640456-8		1	J2	
Socket 28 positsiooni	SSW-114-01-T-D		2	J3, J5	
Header; 2 POS	M20-7820246		3	J4, J6, J7	
Power inductor L = 680 µH	7447709681	0.00068 H	1	L1	

RES SMD 0805 10K Ohm	RC0805FR-0710KL	10000.0 Ω	2	R1, R3	0805
RES SMD 120 OHM	WCR0805-120RFI	120.0 Ω	1	R2, R14, R16, R17	0805
RES SMD 2.2K OHM	RC0805FR-072K2L.	2200.0 Ω	4	R5, R8, R9, R10	0805
RES SMD 820 OHM	ERJ6ENF8200V	820.0 Ω	2	R6, R7	0805
RES SMD 4,7K OHM	ERJP06F4701V	4.7 k Ω	1	R11	0805
RES SMD 1K OHM	WF08P1001FTL	1 k Ω	1	R12	0805
RES SMD 330 OHM	CRCW0805330RFKEA	330 Ω	1	R13	0805
Switch Tactile N.O. SPST	4,30186E+11		1	S1	
DIP switch 4POS	GDH04S04		1	SW1	
CAN Transceiver	SN65HVD234D		1	U1	SOIC
TVS, ESD Protection Diodes	NUP4201MR6T1G		2	U2, U3	TSOP
Microcontroller	TMS320F28069MPZT		1	U4	
ADC	MAX11105AUT+T		2	U5, U9	SOT-23
Buck Step Down Regulator with 4.75 to 60 V Input and 12 V Output	TL2575HV-12IKTTR		1	U6	PDIP
800mA Low-Dropout 5V Linear Regulator	LM1117MP-5.0/NOPB		1	U7	SOT-223
800mA Low-Dropout 3V3 Linear Regulator	LM1117MP-3.3/NOPB		1	U8	SOT-223
Ic Dual Inverter Gate	SN74LVC2G07		1	U10	SOT-23

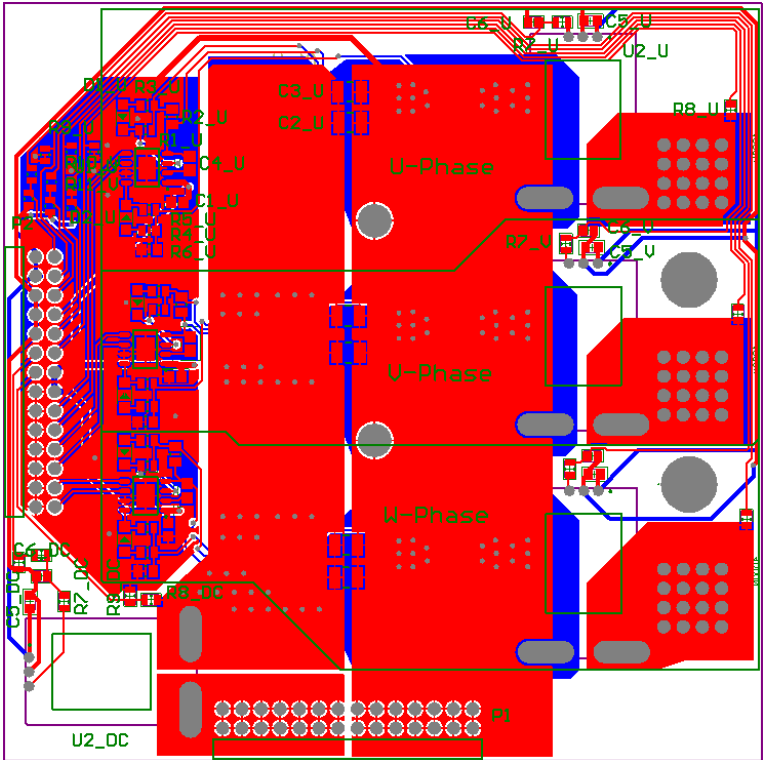
Lisa 5. Vaheldi komponentide loetelu

Kirjeldus	Komponendi mudel	Väärtus	Kogus	Skeemitähis	Pakend
CAP CER 4.7 uF; 16V	TT21F475Z160CT	4.7 uF	3	C1_U, C1_V, C1_W	0805
CAP CER 0.1 uF; 50 VDC	0805B104K500CT	100 nF	11	C4_U, C4_V, C4_W, C5_DC, C5_U, C5_V, C5_W, C7_DC, C7_U, C7_V, C7_W	0805
CAP CER 100 pF 50V	0805N101J500CT	100 pF	4	C6_DC, C6_U, C6_V, C6_W	0805
Rectifier, Schottky Power; 3 A; 40 V	DB2X41500L		6	D1_U, D1_V, D1_W, D2_U, D2_V, D2_W	SOD-123
Power Element Shank M5 16pin	Wuerth Electronic 7461383		3	H2, H3, H4	
Header 28 POS 2.54mm	HTSW-114-08-G-D-RA		2	P1, P2	
N-Channel MOSFET, 60 V , 90 A	BSB028N06NN3 G		6	Q1_U, Q1_V, Q1_W, Q2_U, Q2_V, Q2_W	WDSO-2-5
RES SMD 4.3 Ohm	ERJ6GEYJ4R3V	4,7 Ω	6	R1_U, R1_V, R1_W, R5_U, R5_V, R5_W	0805
RES SMD10K Ohm	RC0805FR-0710KL	10 k Ω	6	R2_U, R2_V, R2_W, R6_U, R6_V, R6_W	0805
RES SMD 1.5 OHM	MCWR08W1R50FTL	1,5 Ω	6	R3_U, R3_V, R3_W, R4_U, R4_V, R4_W	0805
RES SMD 4.3K OHM	MC01W080512K61	2.61k Ω	4	R7_DC, R7_U, R7_V, R7_W	0805
RES SMD 4.7 OHM	ERJ6ENF7322V	73,2 k Ω	4	R8_DC, R8_U, R8_V, R8_W	0805
RES SDM 4,7k Ohm	RC0805FR-074K7L	4,7 k Ω	4	R9_DC, R9_U, R9_V, R9_W	0805
RES SMD 953K OHM	ERJ6ENF3901V	3,9 k Ω	4	R11_DC, R11_U, R11_V, R11_W	0805
High-Side Low-Side Driver	UCC27211DDA		3	U1_U, U1_V, U1_W	SOIC
CURRENT SENSOR, 50A	ACS758LCB-050B		4	U2_DC, U2_U, U2_V, U2_W	

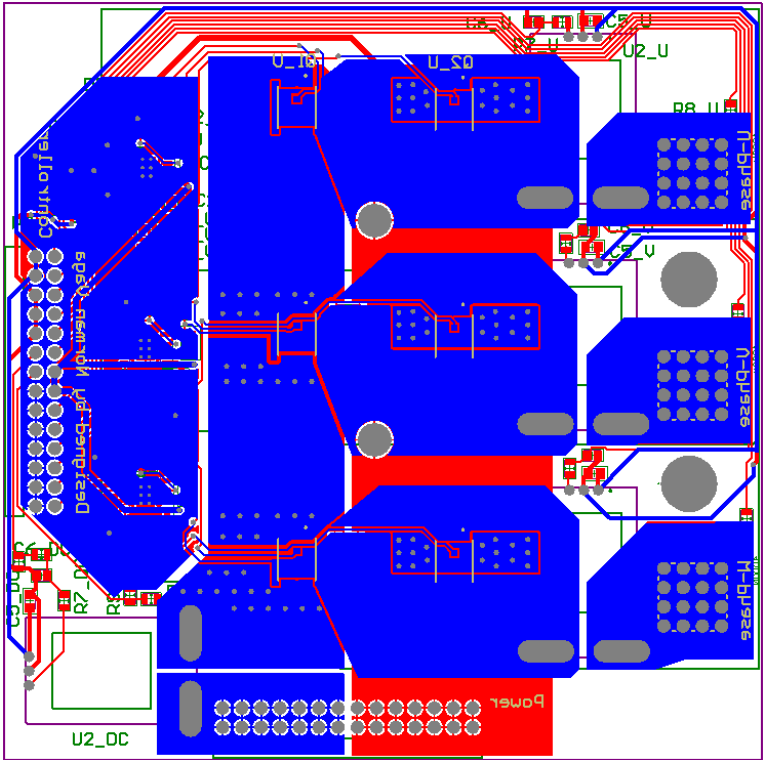
Lisa 6. Alalisvoolu vahelüli komponentide loetelu

Kirjeldus	Komponendi mudel	Väärtus	Kogus	Skeemitähis
KK® 254 Wire-to-Board Header, Single Row, Right Angle, 2 Circuits	Molex 22-05-2021		1	
Cap Aluminum 2200uF	MCGPR63V228M18X36	2200 uF	6	C1, C2, C3, C4, C5, C6
FUSEHOLDER, MINI BLADE	Multicomp MCCQ-122		2	F1, F2
Power Element Shank M5 16pin	Würth Elektronik 7461383		2	H1, H2
Header HDR 28 POS 2.54mm	Samtec TSW-114-08-T-D-RA		1	P1

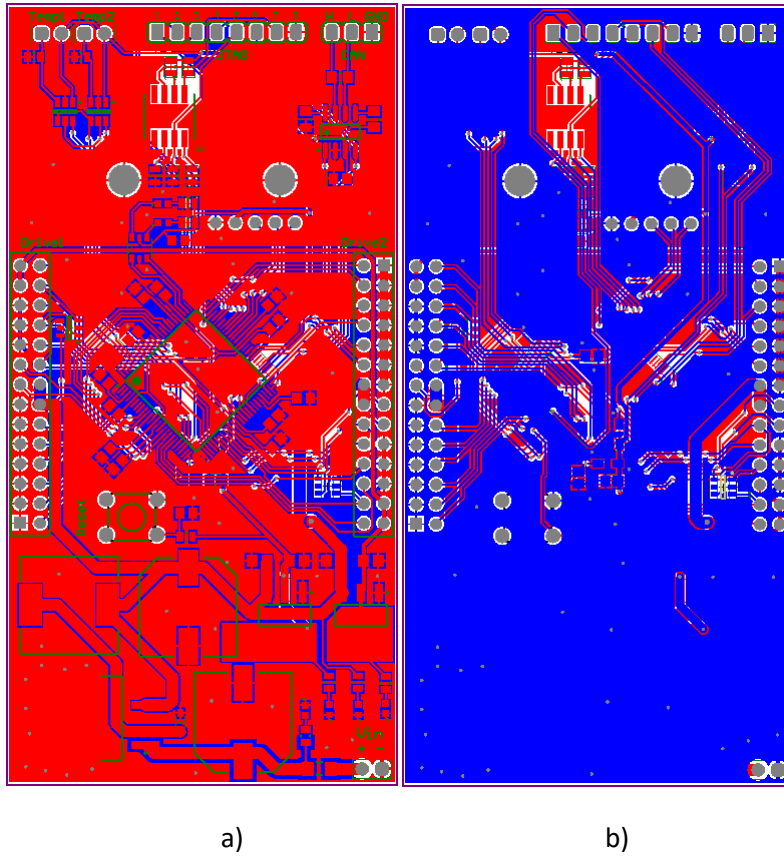
Lisa 7. Trükkplaadi joonised



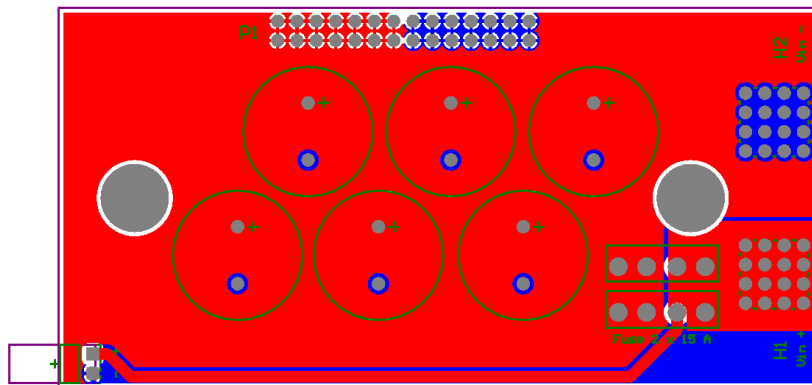
Joonis Lisa 7.1. Vaheldi mooduli pealtvaade



Joonis Lisa 7.2. Vaheldi mooduli altvaade



Joonis Lisa 7.3. Juhtmooduli pealt (a) ja alt (b) vaade



Joonis Lisa 7.4. Alalisvoolu vahelüli