



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**ALALISPINGEMUUNDURI ARENDAMINE
TUDENGIVORMELILE FEST22**

**DEVELOPMENT OF A DC-DC CONVERTER FOR FORMULA
STUDENT CLASS CAR FEST22**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Hans Anniste

Üliõpilaskood: 185546EAAB

Juhendaja: Indrek Roasto, Vanemteadur

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 2022

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2022

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2022 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Hans Anniste, (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Alalispingemuunduri arendamine tudengivormelile FEST22,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Indrek Roasto,
(*juhendaja nimi*)

- 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.
-

18.05.2022 (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Hans Anniste

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Alalispingemuunduri arendamine tudengivormelile FEST22

Kuupäev:
18.05.2022

72 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Indrek Roasto

Töö konsultant (konsultandid): -

Sisu kirjeldus:

Antud töö eesmärgiks oli arendada FEST22 tudengivormelile alalispingemuundur. Alalispingemuundur paikneb vormeli akupaki elektroonikasektsioonis, kus ruum on äärmiselt piiratud. Lisaks sellele on oluline muunduri kõrge efektiivsus, sest suurte soojuskadude hajutamine elektroonikasektsioonis on keeruline.

Töö esimeses osas tutvustatakse tudengivormeli võistlussarja reeglistikku ning antakse ülevaade vormeli elektrisüsteemist ja eelmise hooaja vormelauto FEST21 alalispingemuundurist. Töö teises osas määratakse FEST22 muunduri tööparameetrid. Seejärel valitakse muundurile sobiv topoloogia. Topoloogia valikule järgneb muundurit juhtiva mikroskeemi valik. Seejärel valitakse ning arvutatakse skeemi tööks vajalikud komponendid. Komponentide valikule järgneb erinevate disainivahenditega soojuskadude ja efektiivsuse arvutamine. Töö kolmandas osas disainitakse muundurile trükkplaat ning teostatakse jahutussüsteemi arvutused ja komponentide valik. Töö neljandas osas joodetakse trükkplaat. Seejärel mõõdetaks muunduri kaod ning vaadeldakse termokaamerga komponentide temperatuure maksimaalkoormusel. Mõõtmistele järgneb soojuskadude analüüs ning FEST22 parameetrite võrdlus FEST21 muunduriga.

Märksõnad: alalispingemuundur, tudengivormel, elektroonika, jõuelektroonika, bakalaureusetöö

ABSTRACT

<i>Author:</i> Hans Anniste	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Development of a dc-dc Converter for Formula Student Class Car FEST22	
<i>Date:</i> 18.05.2022	<i>72 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Indrek Roasto	
<i>Consultant(s):</i> -	
<i>Abstract:</i> <p>The aim of this bachelor thesis was to develop a dc-dc converter for Formula Student class car FEST22. The dc-dc converter is located in the accumulator container electronics section, where free space is a very limited resource. Also the appliance power losses must be minimal, because cooling is complicated.</p> <p>The first part describes Formula Student competition and its rules. Next year's car electrical systems and dc-dc converter are discussed. In the second part FEST22 dc-dc converter operating parameters are determined and converter topology is chosen. After that controller IC is selected. Next all other components are selected and their values calculated according to the controller IC datasheet. When all components are chosen, dc-dc converter losses and efficiency are evaluated with the help of different design tools. In the third part PCB is designed for the converter and cooling system components are determined and selected. In the fourth part the dc-dc PCB is soldered and its losses are evaluated during testing. Thermal camera is also used to evaluate component temperatures during full load. After testing, calculated losses are compared to the actual losses. Thereafter FEST22 converter performance is compared to the FEST21 converter performance</p>	
<i>Keywords:</i> dc-dc converter, Formula Student, electronics, power electronics, Bachelor Thesis	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Alalispingemuunduri arendamine tudengivormelile FEST22
Lõputöö teema inglise keeles:	Development of a dc-dc Converter for Formula Student Class Car FEST22
Üliõpilane:	Hans Anniste, 185546EAAB
Eriala:	Mehhatroonika ja elektroenergeetika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Indrek Roasto
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	
Lõputöö ülesande kehtivusaeg: (kehtivusaja annab juhendaja)	Choose an item. Choose an item.
Lõputöö esitamise tähtaeg:	15.04.22

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Antud teema on oluline tudengivormeli meeskonna jaoks, sest kogu auto toimimiseks vajalik elektroonika saab toitepinge alalispingemuundurist. Pingemuundur asub akupaki elektroonikasektsioonis, kus on ruum piiratud. Seetõttu peab muundur olema kompaktse disainiga. Muunduri juures on kõige olulisem selle efektiivsus, et energiakulu minimeerida. Energiakasutus on tudengivormeli juures üks olulisemaid parameetreid, sest akupakk on vormeli kõige raskem komponent. Tänu kompaktsusele ja efektiivsele alalispingemuundurile on võimalik valmistada väiksem ja kergem akupakk ning nii säästa rohkem energiat mootorite jaoks.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on arendada tudengivormelile selline alalispingemuundur, mis on:

- FEST21 muundurist efektiivsem, uue muunduri efektiivsus on suurem kui 95%
- Võrreldes FEST21 muunduriga kahekordse võimsustihedusega, ehk vähemalt 10 W/cm³

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Projekteerida alalispingemuundur väljundvõimsusega 480 W, kasuteguriga vähemalt 95% ja võimsustihedusega suurem kui 10 W/cm³
- Projekteerida muundur sobiva kujuteguriga
- Saavutada väiksem akupaki mass tänu efektiivsemale alalispingemuundurile

4. Lähteandmed

Lähteandmeteks on: LM25116 andmeleht, AN-1617 LM25116 näidisdisain Texas Instruments elektroonika simulaatorid TINA ja Webench Power designer, eelmistel hooaegadel vormeli pealt logitud andmed.

5. Uurimismeetodid

Esmalt arvutatakse muunduri komponentide väärtused, koostatakse muunduri arvutimudel ja simuleeritakse ning seejärel kontrollitakse tulemused reaalselt ehitatud prototüübil.

6. Graafiline osa

Graafiline osa on peamiselt töö põhiosas, muundurite skeemid on lisades.

- Vormeli üldskeem
- FEST21 ja FEST22 alalispingemuundurite skeemid
- FEST21 ja FEST22 alalispingemuundurite parameetrid
- Muunduri jahutus (termokaamera pildid)

7. Töö struktuur

- Lõputöö lühikokkuvõte
- Abstract
- Lõputöö ülesanne
- Eessõna
- Lühendite ja tähiste loetelu
- Sissejuhatus
- Teoreetiline taust
 - Formula Student võistlussari
 - FEST22 elektrisüsteem
- Alalispingemuunduri topoloogia ja komponentide valik
- Muunduri arvutimudeli koostamine ja simuleerimine
- Alalispingemuunduri ehitamine
 - FEST21 alalispingemuunduri lahenduse analüüs
 - FEST22 alalispingemuunduri parameetrite määramine
 - FEST22 alalispingemuunduri elektroonika disain
 - FEST22 alalispingemuunduri jahutuse disain
- Testimine ja võrdlus FEST21 muunduriga
- Kokkuvõte
- Kasutatud kirjanduse loetelu
- Lisad

8. Kasutatud kirjanduse allikad

- FSG reeglid
https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v0.9.pdf
- LM25116 andmeleht
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm25116.pdf?ts=1635489979337&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM25116

- Switching Power Supply Design, Third Edition Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 2009
- Switch-Mode Power Supplies Spice Simulations and Practical Designs 2nd Edition, Christophe P. Basso, 2014

9. Lõputöö konsultandid

Vajadusel konsultantide nimed ja töö osad, mille juures abi saadakse.

10. Töö etapid ja ajakava

- Kirjanduse läbitöötamine (05.12.2021)
- Lähteandmete kogumine (12.12.2021)
- Teoreetilise osa kirjutamine (15.12.2021)
- Arvutuste ja simulatsioonide teostamine (01.01.2022)
- Muunduri disain ja testimine (07.01.2022)
- Järelduste kirjutamine (10.04.2022)
- Kokkuvõtte koostamine (10.04.2022)
- Töö esimene versioon valmis (17.04.2022)
- Töö lõplik versioon valmis (01.05.2022)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
EESSÕNA	11
Lühendite ja tähiste loetelu	12
SISSEJUHATUS	13
1 TEOREETILINE TAUST	15
1.1 Tudengivormeli võistlussarja ülesehitus	15
1.2 Vormeli disainile esitatavad nõudmised	16
1.3 Akupaki jahutus ja temperatuur akupakis	16
1.4 Elektroonikasüsteemide kirjeldus	17
1.5 FEST21 DC/DC süsteemi ülesehitus	18
1.6 Pingeregulaatori tööpõhimõte	19
1.6.1 Lineaarne pingeregulaator	19
1.6.2 Lülitusrežiimis töötav pingeregulaator	20
2 ALALISPINGEMUUNDURI PROJEKTEERIMINE	22
2.1 FEST22 alalispingemuundurile esitatavad nõudmised	22
2.2 FEST22 alalispingemuunduri topoloogia valik	23
2.3 Alalispingemuunduri kontrolleri valik	24
2.4 Komponentide valik	26
2.4.1 Lülitussagedus	26
2.4.2 Induktor	28
2.4.3 Väljundkondensaatorid	29
2.4.4 Sisendkondensaatorid	30
2.4.5 Transistori draiveri toiteallikas	32
2.4.6 Lühisekaitse šunt	32
2.4.7 Sujuvkäivituse kondensaator	33
2.4.8 Alapingekaitse	34
2.4.9 Lülitustransistorid	35
2.4.10 Väljundpinge jagur ja tagasiside kompensatsioon	38
2.4.11 Sisendterminalid	39
2.4.12 Väljundpistik	39
2.4.13 Indikaatorid	40
2.4.14 Aktiivjahutuse termolüliti	40
2.5 Simuleerimine ja tulemuste hindamine	41

2.5.1 Kaod transistoritel ja kondensaatoritel	41
2.5.2 Kaod mikrokiibil	42
2.5.3 Kaod induktoril	42
2.5.4 Kaod šunt takistil	43
2.5.5 Muunduri arvutuslik efektiivsus	44
3 TRÜKKPLAADI DISAIN	46
3.1 Voolukontuuride optimeerimine	46
3.2 Komponentide paigutus	48
3.2.1 Üldised kitsendused komponentide paigutusele	48
3.2.2 Peamiste komponentide paigutus	48
3.2.3 Jahutuse arvutused	50
4 Alalisingemuunduri ehitamine ja katsetamine	54
4.1 Alalisingemuunduri ehitamine	54
4.2 Alalisingemuunduri efektiivsuse mõõtmine.....	55
4.3 FEST22 alalisingemuunduri võrdlus FEST21 muunduriga	60
4.4 Tuleviku arendused	62
KOKKUVÕTE	63
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	64
Lisa 1: FEST22 24 V ahela tarbijad	67
Lisa 2: FEST22 alalisingemuunduri skeem	68
Lisa 3: FEST22 alalisingemuunduri jahutusventilaatori termolüliti skeem	69
Lisa 4: FEST22 alalisingemuunduri trükkplaadi pealne kiht	70
Lisa 5: FEST22 alalisingemuunduri trükkplaadi esimene kiht	70
Lisa 6: FEST22 alalisingemuunduri trükkplaadi teine kiht	71
Lisa 7: FEST22 alalisingemuunduri trükkplaadi alumine kiht	71
Lisa 8: FEST22 alalisingemuunduri 3D mudeli pealtpoolt vaade	72
Lisa 9: FEST22 alalisingemuunduri 3D mudeli altpoolt vaade	72

EESSÕNA

Antud lõputöö on valminud koostöös Formula Student Team Tallinnaga. Töö koostati Tallinnas, Tallina Tehnikaülikoolis. Antud lõputöö käigus arendati FEST22 tudengivormelile alalispingemuundur.

Lõputöö autor avaldab tänu juhendajale, Indrek Roastole ning kõikidele tudengivormeli meeskonna liikmetele, kes olid töö valmimisel abiks.

Lühendite ja tähiste loetelu

AMS	(Accumulator Management System) akuhaldussüsteem, mis mõõdab üksikute akuelementide pinget ja temperatuuri
DC/DC	alalispingemuundur
DCR	(Direct Current Resistance) induktori mähise parameeter, mille baasil hinnatakse alalisvoolust tulenevat võimsusekadu
ESR	(Equivalent Series Resistance) kondensaatori parasiit takistus
HV DC/DC	alalispingemuundur vormelis, mis muundab akupakist tuleva kõrgepinge madalpingeks
IMD	(Isolation Monitoring Device) süsteem, mis tuvastab isolatsiooni tõrke kõrgepinge ja madalpinge süsteemide vahel
IVT	süsteem voolutugevuse ja pinge mõõtmiseks
LED	(Light Emitting Diode) valgusdiod
LV DC/DC	alalispingemuundur vormelis, väljundpingega 24 V
MLCC	(Multilayer Ceramic Capacitor) mitmekihiline keraamiline kondensaator
MOSFET	(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) väljatransistor
NCT	(Negative Temperature Coefficient) takisti, mille takistus sõltub tema temperatuurist, temperatuuri ja takistuse suhe on negatiivne
Rds	väljatransistori parameeter, mis iseloomustab neelu ja lätte vahel olevat aktiivtakistust
RMS	(Relay Monitoring System) süsteem, mis tuvastab releede tõrkeid
SMD	(Surface Mount Device) pindmontaaž elektroonikakomponent, mis monteeritakse trükkplaadi pinnale

SISSEJUHATUS

Tudengivormeli võistlussari sai alguse 1981. aastal USA's. Selle algatajateks oli autoinseneride selts [1]. Tudengivormeli sarja eesmärgiks on anda tudengitele lisaks teoreetilistele teadmistele ka praktiline inseneeria kogemus, et valmistada nad paremini tööturuks ette. Tudengivormeli ühe hooaja kestvuseks on üks aasta. Selle aja jooksul peavad tudengid disainima, projekteerima, arendama ning valmis ehitama väiksemõõtmelise prototüüp vormelauto. Iga hooaja lõpus toimuvad võistlused, kus erinevate ülikoolide meeskonnad saavad oma vormeli proovile panna [2]. Disaini ja fabritseerimisprotsess hõlmab paljusid valdkondasid, sealhulgas mehhaanikat, elektroonikat, infotehnoloogiat, materjaliteadust jne.

Eesti tudengivormeli meeskond sai alguse 2006. aastal. Projekti üheks eestvedajaks on Juhan Sein, kes oli 1959-2001 aastatel seotud vormelautode Estonia seeriatootmisega [3]. Ka tudengivormelid on osaliselt oma nimetuse pärinud Estonia vormelautodelt. Kõikide Eestis valmistatud tudengivormelite nimetamisel kasutatakse nimeskeemi FESTxx, kus tähekombinatsioon FEST tähendab Formula Estonia ning xx kohal on vastava auto valmistamise aasta kaks viimast numbrit. Meeskond koosneb TTK ja TTÜ tudengitest. Tänapäevaks on valminud 14 vormelautot, neist viis on sise põlemismootoriga ning üheksa elektrimootoriga. Töö kirjutamise hetkel on valmimas 10. elektrivormel. Kõik valmistatud vormelid on saavutanud Euroopa võistlustel märkimisväärseid tulemusi.

Antud lõputöö käsitleb alalispingemuunduri projekteerimist ja prototüübi loomist FEST22 tudengivormelile. See teema on meeskonnale oluline mitmel põhjusel. Elektrivormeli kõik süsteemid vajavad toimimiseks stabiilset toitepinget, mis saadakse alalispingemuundurilt. Alalispingemuundur peab olema äärmiselt töökindel, sest igasugune häire muunduri töös pärsib kogu ülejäänud auto elektroonika funktsioneerimist. Teiseks põhjuseks on pingemuunduri asukoht akupaki elektroonikasektsioonis. Elektroonikasektsiooni mõõtmed on piiratud ja seetõttu on oluline muunduri piisav võimsustihedus ning optimeeritud kujutegur, et tagada kompaktne muunduri paigutus. Lisaks sellele läbib akuelemente jahutav õhk esimesena elektroonikasektsiooni, mistõttu on tähtis ka muunduri kõrge efektiivsus, et jahutusõhu temperatuur tõuseks võimalikult vähe.

Töö esimene osa kirjeldab tudengivormeli võistlussarja ning selle punktisüsteemi. Lisaks sellele antakse ülevaade vormeli elektrisüsteemidest ning nende parameetritest ja pingeregulaatoritest üldiselt. Seejärel analüüsitakse erinevaid pingemuundurite topoloogiaid

ning valitakse välja sobivaim topoloogia uue muunduri jaoks. Topoloogia valikule järgneb komponentide valimine, arvutamine ja simuleerimine. Seejärel disainitakse uuele muundurile trükkplaat ning jahutus. Muunduri disainile järgneb selle testimine ja võrdlus FEST21 muunduriga.

1 TEOREETILINE TAUST

1.1 Tudengivormeli võistlussarja ülesehitus

Igal suvel toimuvad Euroopas Formula Student võistlused. Võistlused toimuvad: Itaalias, Saksamaal, Ungaris, Austrias, Šveitsis ja Hispaanias. Seejuures lähtuvad kõik võistlused Saksamaa poolt püstitatud reeglitest. Reeglid jagavad vormelautod kolme klassi: sisepõlemismootoriga vormelautod, elektrimootoriga vormelautod ja isesõitvad vormelautod [2]. Antud töös käsitletav vormelauto kuulub elektrivormelite hulka. Kõikidel võistlustel teenivad meeskonnad vastavalt oma sooritusele punkte. Võistlushooaja lõpus selgitatakse võistlustelt teenitud punktide põhjal välja parimad meeskonnad.

Võistlused on jagatud kaheks osaks: staatilised alad ja dünaamilised alad. Staatiliste alade hulka kuuluvad: äriplaani esitlemine, tootmisprotsessi ja kulude kaitsmine ning insenerilahenduste kaitsmine. Dünaamiliste alade hulka kuuluvad: kaheksa sõitmine, kiirendus, autokross ja kestvussõit. Kestvussõidu energiakasutuse põhjal saab auto lisaks kestvussõidu punktidele ka efektiivsuse punktid. Kokku on võimalik igal võistlusel teenida 1000 punkti [2]. All olevas tabelis Tabel 1.1 on ülevaade staatilistel ja dünaamilistel aladel maksimaalsetest võimalikest teenitavates punktides.

Tabel 1.1 Maksimaalsed võimalikud punktid Formula Student võistlustel [2]

Kategooria	Ala nimetus	Maksimaalsed punktid
Staatilised alad	Äriplaani esitus	75
	Tootmisprotsessi ja tootmiskulude kaitsmine	100
	Insenerilahenduste kaitsmine	150
Dünaamilised alad	Kaheksa sõitmine	75
	Kiirendus	75
	Autokross	100
	Kestvussõit	325
	Efektiivsus	100
Maksimaalsed punktid kokku		1000

1.2 Vormeli disainile esitatavad nõudmised

Kõige rohkem punkte on võimalik teenida kestvussõiduga. Punktide arvult teisel kohal on autokross. Kestvussõidu – ja autokrossi rada on tavaliselt ühesugune. Seetõttu on vormeli ehitamisel lähtunud põhimõttest, et auto oleks optimeeritud just nende kahe ala jaoks.

Kestvussõidu rada on tehniliselt keeruline, et panna proovile vormeli kurvi läbimise suutlikkus. Seetõttu on oluline, et vormel oleks võimalikult kerge. Hea juhitavuse eelduseks on ka madal massikeske. Vormeli kõige raskem komponent on akupakk, kaaludes 60 kg. Akupakk koosneb kahest põhilisest osast: akumulaatorist ja elektroonika sektsioonist. Akumulaatori osas on 6 liitiumelementidega moodulit, mis on ühendatud elektroonika sektsioonis asuva akuhaldussüsteemiga. Igas moodulis on kasutusel ühendusskeem 24s2p. Akupaki esimeses osas asub elektroonika sektsioon, kus on peamiselt võistlusreeglitega sätestatud ohutust tagavad elektroonika komponendid ja süsteemid. Nendeks on: AMS, IMD, RMS, DC/DC käivitus ja kaitseahel, IVT, HV DC/DC, LV DCDC, akumulaatori pluss ja miinus klemmi galvaaniliselt eraldavad kontaktorid, sulavkaitse ja *precharge* relee. Kõik süsteemid ja komponendid peale DC/DC on seotud võistlusreeglites määratletud ohutus ahelatega, lisaks sellele ka kõrgepingega. Seetõttu on nende süsteemide optimeerimine võrdlemisi piiratud ja keeruline.

Madala massikeskme saavutamiseks on oluline, et elemendid oleks võimalikult madalal. Seda saab mõjutada liitiumelementide geomeetrilise paigutusega. Elementide paigutusega kaasneb aga mitmeid piiranguid: elementide ühendusviis, elementidele mõjuvad jõud ja auto laius. Tulenevalt nendest kitsendustest on akupakk kitsas ja pikk. Arvestades, et lisaks akumulaatori osale asub akupaki ees ka elektroonika sektsioon võib juhtuda, et akupakk ei mahu vormelist välja. Raskendatud on ka vormeli tagaosas pikemaks ehitamine, sest sellega kaasneb teljevahe muutus, mis omakorda muudab auto kinemaatikat. Seetõttu on oluline, et elektroonikasektsioonis asuvad süsteemid oleks oma mõõtudel optimeeritud ja hästi paigutatud, et tagada võimalikult väiksed elektroonika sektsiooni mõõtmed.

1.3 Akupaki jahutus ja temperatuur akupakis

Võistlusrajal toimub palju kiirendamisi ja pidurdamisi, mille käigus läbib akuelemente suur vool. See põhjustab omakorda kadusid akuelementide parasiit takistusel, mille

tagajärjel akuelementide temperatuur tõuseb. Võistlusreeglites on sätestatud, et akuelementide temperatuur ei tohi ületada 60 °C [2]. Kuid oluline on arvestada ka seda, et akuelementide sisetakistuse magnituud sõltub nende temperatuurist. Seega on lisaks reeglite poolt seatud temperatuuri piirväärtusele veel olulisem tagada akuelementidele kõige optimaalsem töötemperatuur. Selle jaoks on vaja elemente jahutada. Elementide jahutamiseks on kasutusel kaks ventilaatorit, mis asuvad akupaki tagaosas. Need imevad õhku esmalt läbi elektroonika sektsiooni ülemise osa ning seejärel jahutab õhk akuelemente läbi nende peal asuvate ühendusklemmide. Jahutusõhk läbib esmalt elektroonikasektsiooni ülemist osa, sest ka DC/DC muundurid vajavad jahutust. Selle lahendusega kaasneb ka üks puudus, nimelt DC/DC muundurid kuumutavad õhku, enne akuelementideni jõudmist, vähendades seeläbi süsteemi akuelementide jahutamise võimekust. Seega on oluline, et DC/DC muundur oleks võimalikult väikse soojuskaoga.

1.4 Elektroonikasüsteemide kirjeldus

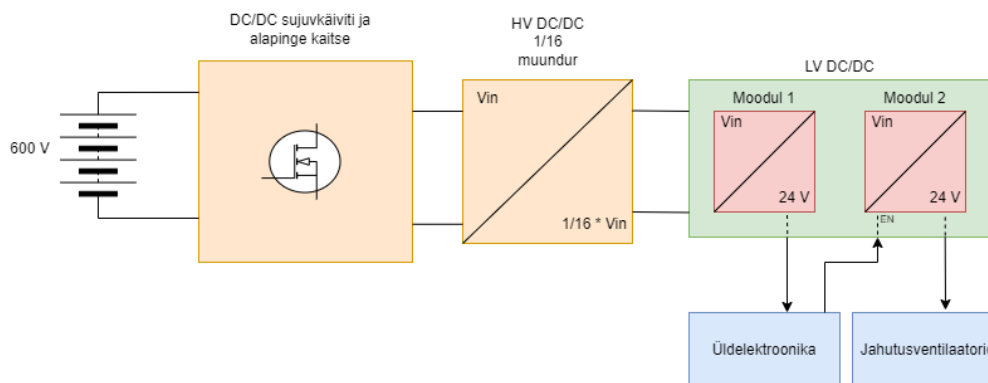
Tudengivormeli reeglistik jagab autol oleva elektroonika kahte klassi: madalpingesüsteemid ja kõrgepingesüsteemid. Madalpingesüsteemide hulka klassifitseeruvad kõik süsteemid, milles maksimaalne pingeväärtus on alalisvoolu korral väiksem kui 60 V ja vahelduvvoolu korral väiksem kui 25 V RMS [2]. FEST21 ja FEST22 vormelite üldine elektroonika ülesehitus on samasugune. Kõrgepingesüsteemis on kasutusel 600 V pinge, mida kasutavad vormeli veoajamid. Lisaks sellele on kasutusel DC/DC muundur, et muundada kõrgepinge madalpingeks, milleks on 24 V.

Vormeli madalpinge süsteemis on kasutusel 24 V pinge. Madalpinge süsteemi nimipingeks on valitud just 24 V, sest mitmed olulised tarbijad töötavad sellise nimipingega. Nendeks on inverter, veepump ja jahutusventilaatorid. Kuna 24 V on tööstuses standardne pinge, siis hõlbustab see ka teiste komponentide valikut. Kogu autos vaid ühe toitepinge kasutus tagab ka süsteemi ja juhtmestuse üleüldise lihtsuse ja töökindluse. Lisas 1 on näha kõik vormeli 24 V süsteemi tarbijad ning tarbitav vool ja võimsus.

1.5 FEST21 DC/DC süsteemi ülesehitus

FEST 21 DC/DC muunduri süsteem koosneb kahest astmest. Esimese astmena on kasutusel firma Vicor poolt toodetud DC/DC muundur BCM4414xG0F4440yzz, mis muundab akupakist tuleva kõrgepinge madalpingeks ning tagab kõrgepinge ja madalpinge süsteemi vahel galvaanilise isolatsiooni. Antud muunduri iseärasuseks on selle fikseerimata väljundpinge. Muunduri väljundpinge on koormuseta olekus 1/16 sisendpingest [4]. Antud muunduri plussideks on selle väiksed mõõtmed, suur väljundvõimsus ning kasutamise lihtsus. Muundur ei vaja toimimiseks mitte ühtegi välist komponenti.

Teise astmena on kasutusel firma Vicor poolt toodetud DCM3623x50M26C2yzz muunduri moodul. Antud muunduri sisendpinge võib jääda vahemikku 16 – 50 V ja väljundpinge on 24 V. Muunduri väljundvõimsus on 320 W [5]. Keskmine 24 V süsteemis tarbitav võimsus sõidu ajal on 412 W. Seetõttu on teises astmes kasutusel kaks muundurit. Üks muundur on üldelektronika jaoks. See muundur töötab alati, kui auto on sisse lülitatud. Teine muundur on jahutusventilaatorite toiteallikaks. See muundur on tavalises olekus välja lülitatud. Teine muundur aktiveeritakse sõidu alguses koos ülejäänud jahutussüsteemiga. FEST21 põhimõtteline alalispingemuunduri ühendusskeem on Joonis 1.1.



Joonis 1.1 Alalispingemuundurite ühendusskeem

Erinevalt esimese astme muundurist ei ole teise astme muundurid eraldiseisvana kasutatavad. Moodulid peab jootma trükkplaadile. Lisaks sellele on vaja nii sisendisse kui ka väljundisse silukondensaatoreid. Tulenevalt nendest teguritest on teise astme DC/DC muunduri süsteem kõige suurem detail elektroonika seksioonis.

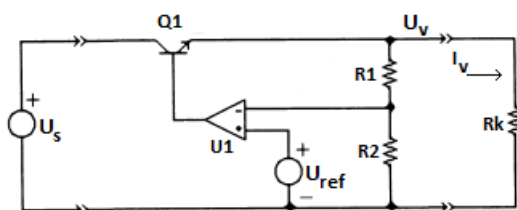
1.6 Pingeregulaatori tööpõhimõte

Kõikidel elektroonikaseadmetel on kindlaks määratud parameetrid, mis peavad olema täidetud, et seade töötaks nii nagu tootja on selle disaininud. Üheks selliseks parameetrik on toitepinge vahemik. Tavaliselt on tootja seadme andmelehes märkinud minimaalse, nominaalse ja maksimaalse toitepinge. Seadme kasutamine väljaspool minimaalset ja maksimaalset pingevahemikku põhjustab vastava seadme ebakorrapärase toimimist või jäädavaid kahjustusi. Seejuures on minimaalse ja maksimaalse toitepinge vahemik sageli väike. Ehkki seadme lubatav toitepinge kõikumine on võrdlemisi piiratud, võib tarbitav vool suures ulatuses varieeruda. Selleks, et tagada muutuva koormuse juures stabiilne toitepinge on vaja pingeregulaatorit [6].

Pingeregulaatorit võib vaadelda kui neliklemmi. Sellel on kaks sisendklemmi ja kaks väljundklemmi. Pingeregulaatori eesmärgiks on tagada fikseeritud pinge oma väljundklemmidel, sõltumata muutustest sisendpinges ja väljundvoolus. Pingeregulaator koosneb reguleerivast elemendist ja tagasiside ahelast. Selleks, et väljundpinge ei muutuks muutuvate töötingimuste juures on kasutusel pingereferents ja negatiivne tagasiside. Pingeregulaatoreid on kahte tüüpi: lineaarsed ja lülitusrežiimis töötavad [6].

1.6.1 Lineaarne pingeregulaator

Joonis 1.2 on näha lineaarse pingeregulaatori tööpõhimõtet illustreeriv skeem. Pinget reguleerivaks elemendiks on transistor Q_1 , mis töötab lineaarrežiimis. Tagasiside ahel koosneb komponentidest R_1 , R_2 , U_{ref} ja U_1 . Võimendi U_1 võrdleb pingereferentsi ja väljundpinge erinevust ning genereerib sellele proportsionaalse vea signaali. Vea signaal muudab transistori juhtivust, reguleerides transistorit läbivat voolu, muutes seeläbi väljundpinget. Koormuse suurenedes avatakse transistorit rohkem, hoides seeläbi väljundpinge konstantsena [6].



Joonis 1.2 Lineaarse pingeregulaatori põhimõtte skeem [7]

Lineaarsel pingeregulaatoril esineb mitmeid puudusi. Üheks puuduseks on regulaatori madal kasutegur, mistõttu eraldub pinget reguleerival transistoril suur hulk soojust.

Transistoril hajuv soojusvõimsus on leitav valemiga (1.1). Vältimaks transistori ülekuumenemist, peab kasutama jahutusradiaatorit. Väljundvõimsuse suurenedes muutuvad regulaatori mõõtmed üsna kiiresti irratsionaalselt suureks, peamiselt jahutussüsteemi detailide mõjul. Seetõttu lineaarset pingeregulaatorit suurte voolude korral üldiselt ei kasutata. Teiseks puuduseks on fakt, et lineaarse pingeregulaatori väljundpinge peab olema alati madalam kui sisendpinge. Lisaks sellele peab arvestama ka reguleerival transistoril oleva minimaalse pingelanguga, mis tavaliselt peab olema vähemalt 0,5 V [6].

$$P = (U_s - U_v) \cdot I_v \quad (1.1)$$

Kus: P – transistoril hajuv võimsus

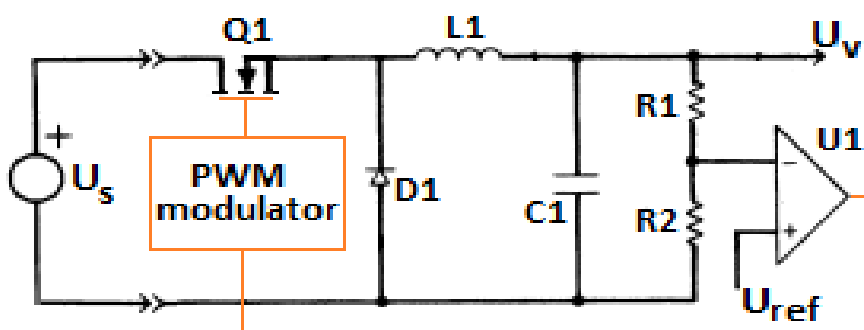
U_s – sisendpinge

U_v – väljundpinge

I_v – väljundvool

1.6.2 Lülitusrežiimis töötav pingeregulaator

Lülitusrežiimis töötavate pingeregulaatorite kasutusvaldkond hakkas laienema 1970 aastal. Selliste regulaatorite efektiivsus on tunduvalt suurem ja mõõtmed väiksemad kui samaväärsetel lineaarsetel pingeregulaatoritel. Seda tüüpi regulaatorid võimaldavad väljundpinget sisendpinge suhtes tõsta, langetada, muuta polaarsust ning galvaaniliselt isoleerida [6]. Järgnevalt vaatleme lülitusrežiimis töötava pingeregulaatori lihtsustatud tööpõhimõtet *buck* muunduri näol. Joonisel 1.3 on regulaatori tööpõhimõtet illustreeriv skeem.



Joonis 1.3 *Buck* muunduri põhimõtte skeem [7]

Transistorit Q1 kasutatakse lülitusrežiimis. Tänu sellele on erinevalt lineaarsest režiimist kaod transistoril väikesed. Juhtloogika juhhib transistorit kindla sagedusega, kuid transistori avatud aega muudetakse sõltuvalt koormusest ühe lülitusperioodi ulatuses. Muutes transistori avatud aega, saab muuta väljundpinget. Transistori lülitamine

põhjustab voolu pulsatsiooni induktoris L1. L1 ja C1 on ühendatud LC madalpääsu filtrina, mis filtreerivad välja voolu pulsatsiooni. Selle tulemusena jääb skeemi väljundisse alaliskomponent, mida kirjeldab valem (1.2) [6].

$$U_v = U_s \cdot \frac{t_{ON}}{T} \quad (1.2)$$

Kus: U_v – väljundpinge

U_s – sisendpinge

t_{ON} – transistori avatud aeg

T – transistori lülituse periood

2 ALALISPINGEMUUNDURI PROJEKTEERIMINE

2.1 FEST22 alalispingemuundurile esitatavad nõudmised

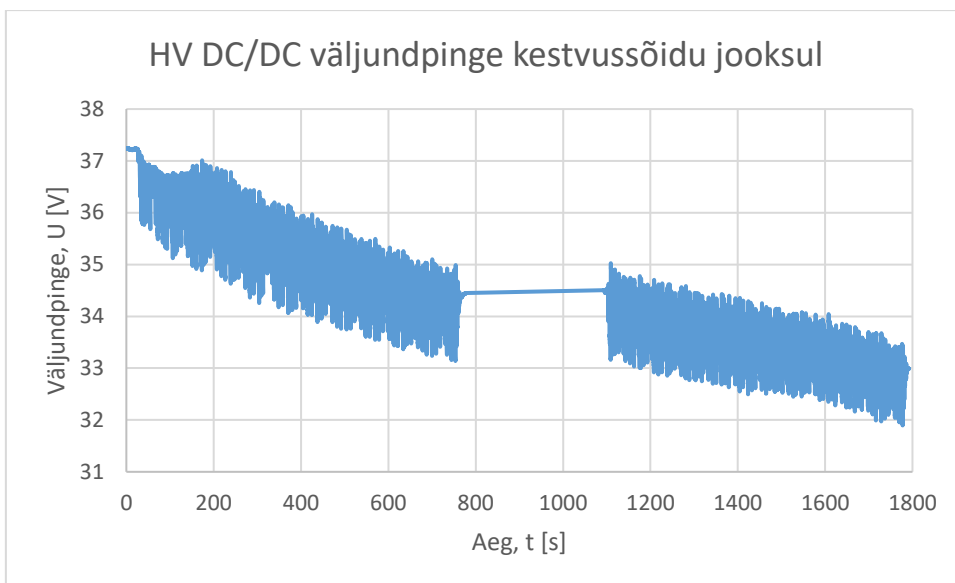
Lisas 1 on tabel FEST22 madalpingesüsteemi tarbijatest ning nende poolt tarbitavast võimsusest. Keskmine suurim tarbimine on 362 W. Muunduri maksimaalne väljundvõimsus peab olema suurem leitud keskmisest võimsusest kahel põhjusel. Esimeseks põhjuseks on võimalus, et vormeli arendamise käigus süsteemide poolt tarbitav võimsus võib vähesel määral kasvada. Teiseks põhjuseks on süsteemide lülitamisel toimuvad siirdeprotsessid, mille käigus hetkeline tarbimine on suurem kui keskmine. Seetõttu on FEST22 alalispingemuunduri väljundvõimsuseks valitud 432 W.

FEST22 vormelis kasutatakse kõrgepinge-madalpinge muundurina samasugust Vicori muundurit, mis FEST21 autol. Antud muunduri eripäraks on väljundpinge sõltuvus sisendpingest 1/16 ülekandeteguri korda, mida kirjeldab valem [4]. Kestvussõidu käigus akupaki pinge langeb, mistõttu langeb ka alalispingemuunduri sisendpinge. Joonis 2.1 on näha HV DC/DC väljundpinge kestvussõidu jooksul. Graafikult selgub, et täislaetud akuga kestvussõidu alguses on alalispingemuunduri sisendpingeks 37,2 V ja kestvussõidu lõpus on minimaalne sisendpinge 31,9 V. Arvesse tuleb võtta ka seda, et sõltuvalt aku laetuse tasemest, võib esialgne väljundpinge kõrgem olla. Sõltuvalt võistlusrajast võib ka aku pinge sõidu lõpus madalam olla. Seetõttu on alalispingemuunduri sisendpinge vahemikuks valitud 28 – 38 V. Lähtuvalt eelnevalt kirjeldatud kriteeriumitest on Tabel 2.1 näha kokkuvõtvalt FEST22 alalispingemuundurile esitatavad nõudmised ning võrdluseks on toodud FEST21 alalispingemuunduri parameetrid.

$$U_s = \frac{1}{16} \cdot U_v \quad (2.1)$$

Kus: U_v - väljundpinge

U_s - sisendpinge



Joonis 2.1 HV DC/DC väljundpinge kestvussõidu jooksul

Tabel 2.1 FEST22 alalispingemuundurile esitatavad nõudmised ja FEST21 muunduri parameetrid

Parameeter	FEST21	FEST22
Väljundvõimsus, P [W]	640	432
Sisendpinge vahemik, U [V]	15 - 60	28 - 38
Väljundpinge, U [V]	24	24
Väljundpinge kõikumine	+/- 6,5%	+/- 6,5%
Maksimaalne väljundvool, I [A]	26,67	18
Võimsustihedus [W/cm ³]	4,49	>8,98
Efektiivsus	90,50%	>95%

2.2 FEST22 alalispingemuunduri topoloogia valik

Arvestades, et muunduri väljundpinge on alati madalam kui sisendpinge, on vaja pinget langetavat muundurit. Topoloogiaid, mis pinget langetavad on mitmeid. Isoleerimata topoloogiatest sobib pinget madaldav alalispingemuundur (ingl. *buck*). Isoleeritud topoloogiatest sobiks näiteks *flyback*. Antud väljundvõimsuse juures ei ole isoleeritud topoloogia kasutus mitmetel põhjustel mõistlik. Esiteks puudub otsene vajadus muunduri sisend ja väljund galvaaniliselt eraldada. Teiseks on võrreldes *buck* muunduriga isoleeritud muunduri ehitus keerulisem. Kolmandaks kaasnevad isoleeritud topoloogia kasutusega kaod transformaatoris ja alaldis, mida ei esine *buck* muunduril [8]. Seetõttu on valitud FEST22 alalispingemuunduri topoloogiaks *buck*.

2.3 Alalispingemuunduri kontrolleri valik

Buck muundur on laialt levinud muunduri tüüp ning seda juhtivat mikroskeemi toodavad kõik suuremad aktiivkomponentide tootjad. Kuna tudengivormelis on laialdaselt kasutusel Texas Instruments aktiivkomponendid, siis lähtuti ka muunduri disainis Texas Instruments tootevalikust, lisaks sellele vaadeldi ka Analog Devices tootevalikut. Kahe tootja komponentide hulgast valiti viis sobivaimat komponenti, mille põhilised parameetrid on välja toodud Tabel 2.2. Kõik viis mikroskeemi on võrdlemisi sarnased. Vaadeldud mikroskeemidest koosatud tüüpskeemid koosnevad keskmiselt 18 komponendist. Arvestades maksimaalse 38 V sisendpingega ei sobi mikroskeem nr. 5, sest maksimaalsest sisendpingest jääb varu ainult 2 V. Mikroskeem nr 4 on mõeldud kahefaasilise muunduri jaoks. Arvestades, et FEST22 muundur on plaanitud ühefaasiline, ei ole antud mikroskeemi kasutamine otstarbekas. Mikroskeemide nr 2 ja nr 3 peamiseks puuduseks võrreldes nr 1 on VQFN korpus, mida on käsitsi keerulisem joota, kui HTSSOP korpust. Ülejäänud parameetritelt on antud mikroskeemid võrdlemisi sarnased. Tulenevalt mikroskeemi nr 1 sobivaimast korpusest on FEST22 muunduri kontrolleri jaoks valitud mikroskeem LM25116.

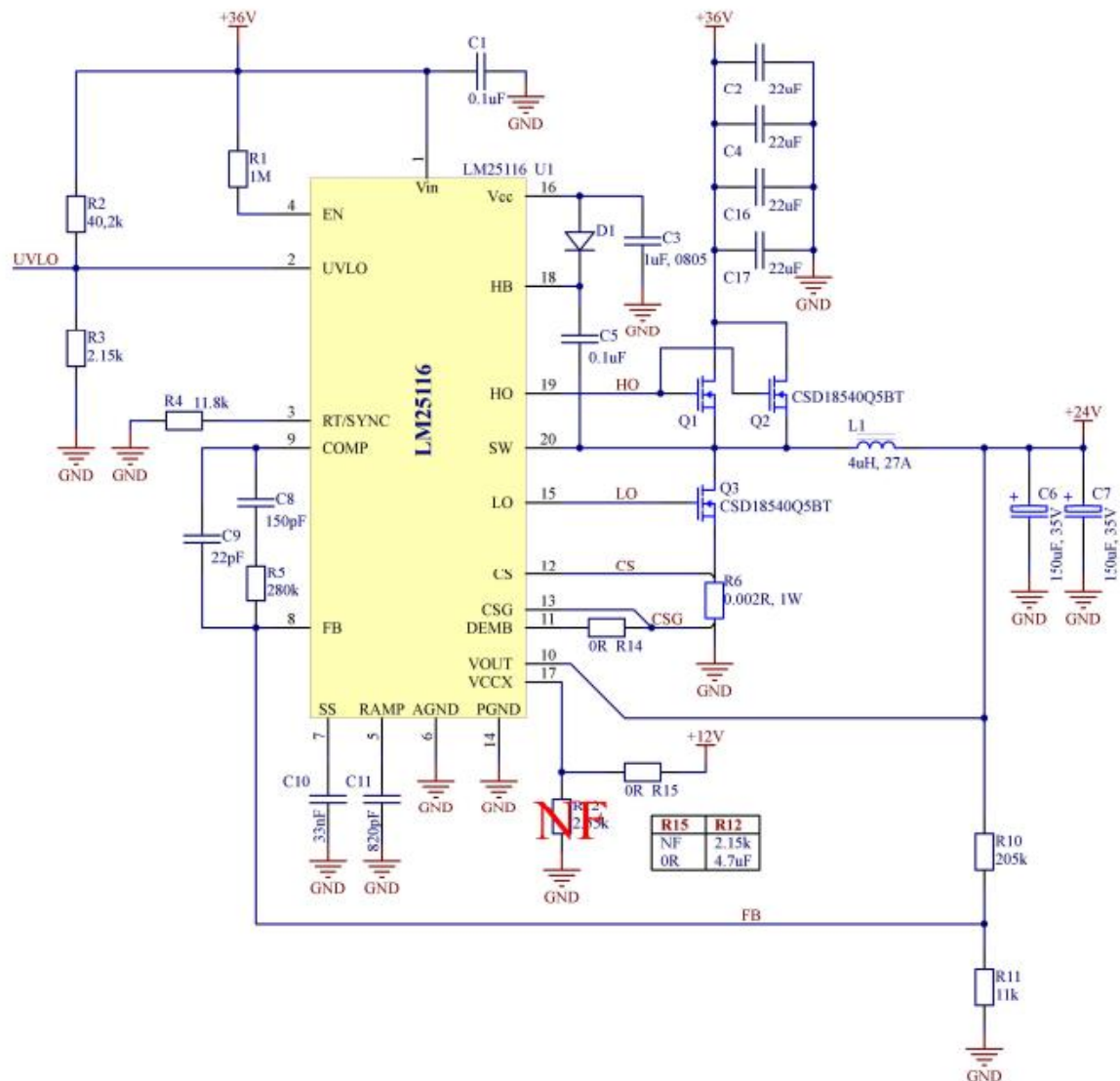
Tabel 2.2 Valik *buck* kontrolleri mikroskeeme

Nr.	Mikroskeem	U_s [V]	U_v [V]	I_v [A]	$f_{üü}$ [MHz]	Korpus
1	LM25116	6,0 – 42,0	1,2 – 36,0	20	0,05 – 1,00	HTSSOP-20
2	LM25145	6,0 – 42,0	0,8 – 40,0	30	0,10 – 1,00	VQFN-20
3	LM5146	5,5 – 100,0	0,8 – 60,0	20	0,10 – 1,00	VQFN-20
4	LM5143	3,5 – 65,0	0,6 – 55,0	60	0,10 – 2,20	VQFN-40
5	LTC7803	4,5 – 40,0	0,8 – 40,0	20	0,10 – 3,00	MSOP-16

Mikroskeem LM25116 on *buck* muunduri kontrolleri, mis sisaldab nii muunduri juhtloogikat kui ka lülitustransistoride draivereid. Mikroskeemil on ka mitmeid olulisi lisafunktsioone: sünkroonne töörežiim, alapingekaitse, väljundvoolu piiramine ja termokaitse. Mikroskeemil on 20 viiku ning see on HTSSOP korpuses, mis on väikeste mõõtmetega, kuid samas on seda mugav trükkplaadile joota. Mikroskeemi sisendpinge võib jääda vahemikku 6 – 42 V ja väljundpinge vahemikku 1,215 – 36 V [10]. Muunduri disainiks vajalikud arvutusvalemid on välja toodud mikroskeemi LM25116 andmelehes. Lisaks sellele on andmelehes ka muunduri disaini näide.

Joonis 2.2 on näha FEST22 alalispingemuunduri skeem, mida juhib LM25116 mikroskeem. Vormeli juures antud muundurit eraldi sisse ja välja ei lülitata. Seetõttu *enable* funktsionaalsust ei ole kasutatud ning R1 takistiga on LM25116 alati töörežiimis. Kondensaator C1 on mikroskeemi toitepinge müra filtreerimiseks. Takistid R2 ja R3

moodustavad pingeljaguri alapingekaitse ahela jaoks, et vältida muunduri tööd ettenähtust madalama sisendpinge korral. Takistiga R4 on seadistatud muunduri lülitussagedus. Kondensaatorid C8 ja C9 ning takisti R5 on kasutusel tagasiside kompensatsiooni ahelas. Kondensaatoriga C10 seadistatakse muunduri sujuvkäivituse aeg. Kondensaator C11 on kasutusel tagasiside ahelas induktori voolu emuleerimiseks. Kondensaatorid C2, C4, C16 ja C17 on muunduri jõu osa sisendi silukondensaatorid. Diiod D1 ja kondensaator C5 moodustavad *bootstrap* ahela, et saavutada vajalik pingeniivo ülemise lülitusõla transistorite avanemiseks. Antud ahela silukondensaatoriks on C3. Q1 ja Q2 on ülemised lülitusõla transistorid. Q3 on alumise lülitusõla transistor. L1, C6 ja C7 moodustavad *buck* muunduri LC filtri. Takistid R10 ja R11 moodustavad pingeljaguri tagasiside diferentsiaalvõimendi jaoks. Takisti R6 on voolu mõõtmise šunt. Takistiga R14 saab reguleerida LM25116 diiodi emuleerimise töörežiimi talitlust. Esialgu on kasutusel 0 Ω takisti, kuid trükkplaadile on jäetud võimalus takisti väärtust muuta. Välise toiteallika kasutamisel on R15 0 Ω takisti ning R12 kohal 4,7 μF silukondensaator. Trükkplaadile on testimise eesmärgil jäetud ka võimekus töötada ilma välise toiteallikata. Sel juhul takistit R15 ei monteerita ning takisti R12 on 2,15 k Ω .



Joonis 2.2 Mikroskeemil LM25116 põhineva FET22 muunduri skeem

2.4 Komponentide valik

2.4.1 Lülitussagedus

LM25116 mikrokiibi lülitussagedus määratakse takistiga R4. Muunduri induktori, sisendkondensaatori ja väljundkondensaatorite füüsilised mõõtmed sõltuvad lülitussagedusest. Lülitussageduse suurenedes on võimalik kasutada väiksemate mõõtmetega reaktiivkomponente. Seetõttu muunduri väikeste mõõtmete saavutamiseks tasub kasutada võimalikult kõrget lülitussagedust. Seejuures peab aga arvestama, et lülitussageduse tõustes suurenevad ka lülituskaod transistoritel. Lisaks sellele on kõrgete lülitussageduse juures oluline transistori kiire avanemine. Transistori avanemise kiirust mõjutab transistori draiver, mille maksimaalne väljundvool mõjutab

oluliselt võimalikku lülitamise kiirust. Antud muunduri suurimate mõõtmega komponent on induktor. Seetõttu on induktori tootja Coilcraft simulaatori abil vaadeldud erinevate lülitussageduste juures sobivate induktorite ruumala ja võimsuskadu ning lähtuvalt sellest tehtud lülitussageduse valik. Lisaks sellele on arvestatud ka transistorite lülitamise kiirusega. Vaadeldakse kolme sagedust: 100 kHz, 250 kHz ja 500 kHz. Iga sageduse juurde on otsitud kahe sobiva induktori parameetrid, mis on näha. Induktori voolupulsatsioon ning soojuskadu on leitud muunduri 38 V sisendpinge juures ning 18 A väljundkoormuse juures. 100 kHz sageduse juures on induktoril nr 1 ruumala võrdlemisi suur, induktoril nr 2 on soojuskadu tabeli suurim. Võrreldes 250 kHz ja 500 kHz lülitussageduse juures sobivaid induktoreid on näha, et suurt ruumalalist võitu ei ole võimalik saavutada. 500 kHz juures on induktorite nr 5 ja nr 6 soojuskad madalamad, kui 250 kHz juures induktoritel nr 3 ja nr 4. Siinkohal peab aga arvestama, et võrreldes 250 kHz on 500kHz juures transistorite lülituskad suuremad, lisaks sellele on transistori draiverile esitatavad nõudmised suuremad. Tulenevalt antud tulemustest on FEST22 muunduri lülitussageduseks valitud 250kHz. (2.2) [10].

Tabel 2.3 Lülitussageduse valik lähtuvalt induktori parameetritest [11]

Nr	f _{lül} [kHz]	T _{lül} [µs]	L [µH]	ΔI [%]	DCR [mΩ]	P [W]	V [cm ³]	Induktor
1	100	10	15	34	2,6	1,95	10,5	VER2923-153
2			15	39	7,7	4,24	3,3	XAL1513-153
3	250	4	4,0	50	2,2	1,66	5,4	SER2014-402
4			6,8	32	4,7	2,66	2,5	XAL1510-682
5	500	2	2,2	45	1,7	0,97	12,0	SER2915L-222
6			3,6	28	1,9	1,2	5,0	SER2013-362

Mikroskeemi LM25116 lülitussageduse seadistamine toimub takisti R4 abil. Vajaliku takisti takistus on leitav valemiga (2.2). 250 kHz lülitussageduse saavutamiseks on vaja takistit takistusega 12,5 kΩ. Tudengivormelil on oma E48 tüüpi takistite ladu. Takistiks R4 on valitud lähim E48 tüüpi takisti väärtus, milleks on 12,7 kΩ. Antud takistiga saavutatav lülitussagedus on 247 kHz.

$$R_T = \frac{T - 450 \text{ ns}}{284 \text{ pF}} \quad (2.2)$$

Kus: T – on lülitussageduse periood

R_T – lülitussagedust reguleeriv takisti

2.4.2 Induktor

Muunduri induktori parameetrid sõltuvad lülitussagedusest, väljundvoolust, sisend- ja väljundpingest ning voolu pulsatsioonist induktoril. Kõik eelnevad parameetrid peale voolu pulsatsiooni on muunduri disaini lähteandmed. Voolupulsatsioon valitakse tavaliselt nii, et see moodustab 30 – 40% maksimaalsest väljundvoolust [10]. Vajalik induktiivsus on arvutatav valemiga (2.3) [10].

$$L = \frac{U_v}{I_{PP} \cdot f_{lül}} \cdot \left(1 - \frac{U_v}{U_{s(MAX)}}\right) \quad (2.3)$$

Kus: L – vajalik induktori induktiivsus

U_v - väljundpinge

I_{PP} – voolu pulsatsioon induktoril

$f_{lül}$ -lülitussagedus

$U_{s(MAX)}$ – maksimaalne sisendpinge

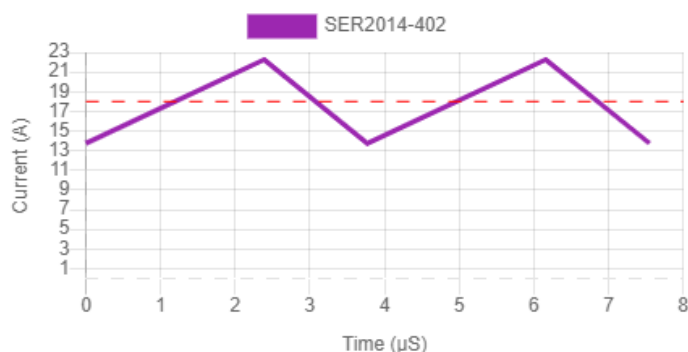
Muunduri lülitussageduse valikul leiti iga lülitussageduse juurde kaks sobivat induktorit. 250 kHz lülitussageduse jaoks sobivate induktorite parameetrid on Tabel 2.4. Kasutades valemit (2.3) kontrolliti Coilcraft simulaatori induktiivsuse tulemused, mis olid samasugused. Induktoril nr 1 ja nr 2 on ligikaudu kahekordne ruumala erinevus. Induktori nr 2 soojuskadu on nr 1 induktorist 1 W võrra suurem. Induktori nr 1 eeliseks on selle avatud disain, kus mähis ei ole ümberringi südamikuga kaetud. Tänu sellele on induktori töötemperatuur võrreldes induktoriga nr 2 15 °C madalam. Sellest tulenevalt osutus valituks induktor nr 1.

Tabel 2.4 Sobivad induktorid 250 kHz lülitussageduse jaoks [11]

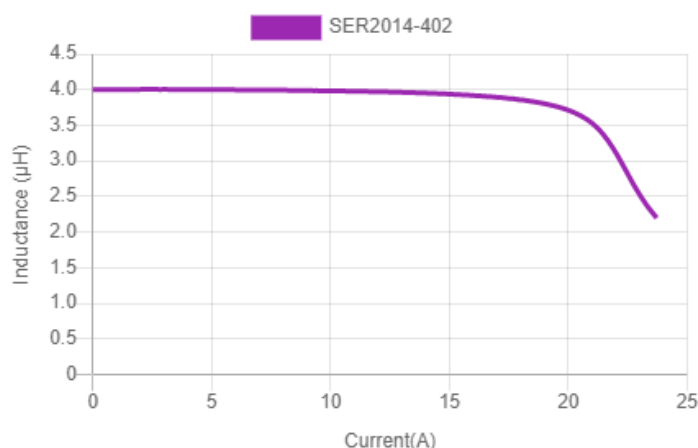
Nr	$f_{lül}$ [kHz]	$T_{lül}$ [µs]	L [µH]	ΔI [%]	DCR [mΩ]	P [W]	V [cm ³]	Induktor
1	250	4	4	50	2,2	1,66	5,4	SER2014-402
2			6,8	32	4,7	2,66	2,5	XAL1510-682

Lisaks sellele on muunduri induktori valikul oluline arvestada selle südamiku materjali eripäradega. Mitte mingil juhul ei tohi muunduri töö käigus induktor minna küllastusse. Siinkohal on oluline arvesse võtta ka induktori ja keskkonna temperatuuri, sest temperatuuri tõustes saavutatakse küllastus väiksema voolu juures kui madalamal temperatuuril [12]. Induktiivsuse sõltuvus temperatuurist tuleneb ferriit materjali temperatuuritundlikkusest. Induktoritel on õhupilu, et saavutada suurem küllastusvool ning väiksem temperatuuritundlikkus. Vähendatud kujul jääb ka temperatuuritundlikkus alles, mida tuleb kontrollida. Induktoriks on valitud firma Coilcraft induktori SER2014-

402MLB. Coilcraft on loonud simulaatori, et nende poolt toodetavate induktorite parameetreid ja sobivust hinnata. Induktori saturatsiooni vool 20 °C juures on 25,3 A ning 70 °C juures 22,8 A. Joonis 2.3 on näha induktoril olev voolupulsatsioon maksimaalse sisendpinge ja maksimaalse väljundkoormuse korral. Pulsatsiooni piik ulatub 22,19 A. Joonis 2.4 on näha induktori induktiivsuse sõltuvus seda magneetivast voolust. Joonis 2.4 selgub, et 22,19 A voolu korral on induktori induktiivsus 3,17 μH [11].



Joonis 2.3 Voolu pulsatsioon induktoril [11]



Joonis 2.4 Induktori voolu ja induktiivsuse sõltuvus [11]

2.4.3 Väljundkondensaatorid

Buck muunduri induktor ja väljundkondensaator moodustavad LC tüüpi madalpääsu filtri. See filter filtreerib välja lülitussagedusest tuleneva voolu pulsatsiooni ning filtri väljundiks jääb suures osas ainult alaliskomponent. Vähesel määral pääseb läbi filtri ka pulsatsioon. Filtrist läbi pääseva pulsatsiooni amplituud sõltub väljundkondensaatori mahutavusest. Mida suurem on mahutavus, seda väiksem on pulsatsioon. Kuna väljundkondensaatorite mahutavus jääb antud juhul sadade μF suurusjärku, peab muunduri mõõte arvestades kasutama elektrolüüt-kondensaatoreid. Võrreldes keraamiliste kondensaatoritega, mille ESR on paari $\text{m}\Omega$ suurusjärgus, on elektrolüüt

kondensaatori ESR kümnete mΩ suurusjärgus. Elektrolüüt kondensaatorid on temperatuuri suhtes tundlikumad kui keraamilised kondensaatorid. Mida kõrgema temperatuuri juures elektrolüüt-kondensaatorid töötavad, seda lühem on nende eluiga [6]. Teades väljundkondensaatorite mahutavust on väljundpinge pulsatsioon leitav valemiga (2.4). Disainitav muundur ei ole tundliku elektroonika toiteallikaks, seetõttu peab olema väljundpinge pulsatsioon väiksem kui 100 mV. Saavutatav pulsatsioonipinge sõltub kahest muutujast, milleks on kondensaatori mahtuvus ja ESR. Tulenevalt sellest on sobiva kondensaatori arvutamine keeruline. Kasutades ühte 20 mΩ ESR näitajaga kondensaatorit on väiksema kui 100 mV pulsatsiooni saavutamiseks vajalik võrdlemisi suur mahtuvus. Sellest tulenevalt valiti väljundkondensaatoriteks ühe asemel kaks elektrolüüt-kondensaatorit mahtuvusega 150 μF ja ESR näitajaga 20 mΩ. Antud kombinatsiooniga saavutatav pulsatsioonipinge on 87 mV. Kahe kondensaatori valik tagab väljundvoolu pulsatsiooni jaotumise kahe kondensaatori vahel, mille tulemusena saavutatakse madalam kondensaatori temperatuur.

$$\Delta V_{OUT} = I_{PP} \cdot \sqrt{ESR^2 + \left(\frac{1}{8 \cdot f_{sw} \cdot C_{OUT}}\right)^2} \quad (2.4)$$

Kus: ΔV_{OUT} – väljundpinge

I_{PP} – voolu pulsatsioon induktoril

ESR – kondensaatori parasiitakistus

f_{sw} – lülitussagedus

C_{OUT} – väljundkondensaatori mahutavus

2.4.4 Sisendkondensaatorid

Sisendkondensaatori eesmärgiks on transistorite lülitamisest tuleneva sisendpinge pulsatsiooni silumine, et tagada muunduri häiretevaba töö. Kuna sisendpinge ja väljundpinge on omavahel läbi pulsilaiuse seotud, siis suur pulsatsioon muunduri sisendis võib põhjustada muunduri ebastabiilset tööd. Sisendkondensaatori poolt põhjustatav pulsatsioonipinge on leitav valemiga (2.5) [10]. Texas instruments *buck* muunduri sisendkondensaatori valikut käsitlevas dokumendis on sisendpinge pulsatsiooniks valitud 240 mV [13]. LM25116 andmelehe näidisdisainis on 1 V [10]. Ka antud muunduri disainis on lähtutud sellisest suurusjärgust. 0,5 V pulsatsiooni saavutamiseks on vaja 29 μF mahtuvust. Keraamilise kondensaatori juures on oluline arvestada asjaoluga, et MLCC tüüpi klass II ja klass III kondensaatori klemmpinge tõustes kondensaatori mahtuvus väheneb. Nimetatud kondensaatorites on dielektrikuna kasutusel BaTiO₃. Tõstes kondensaatori klemmidel alalispinget, hakkab see titaani iooni liigutavale vahelduvkomponendile vastu töötama, takistades iooni liikumist. See

omakorda langetab materjali dielektrilist konstanti, tuues endaga kaasa mahtuvuse vähenemise. Efekt on seda suurem, mida suurem on rakendatud alalispinge võrreldes nominaalpingega. Tootja mõõdab kondensaatori nominaalset mahtuvust kindla pinge juures, mis on maksimaalsest lubatud pingest madalam. Seetõttu peab vastavat kondensaatorit kasutades veenduma selle tegelikus mahtuvuses konkreetses olukorras. Mahtuvuse vähenemist saab kompenseerida valides kondensaator, mille korpus on suurem või maksimaalne lubatud klemmipingest kõrgem [14]. Arvestades muunduri kujutegurit, osutus valituks firma KEMET C2220C226M5R2C7186 kondensaatorimassiiv. Antud kondensaatorimassiivi maksimaalne lubatud tööpinge on 50 V ning nominaalne mahtuvus on 22 μF . Tänu kondensaatorite ülestikku paigutusele on võimalik saavutada väiksemad trükkplaadi mõõtmed. KEMET pakub oma kodulehel kondensaatorite simuleerimise tarkvara, mis võimaldab hinnata kondensaatorite parameetrite muutusi erinevates olukordades. Antud juhul on kasutatud graafikut, mis iseloomustab kondensaatori mahtuvuse muutust sõltuvalt klemmipingest [15]. Allolevalt Joonis 2.5 selgub, et muunduri maksimaalse sisendpinge korral 38 V on kondensaatori mahtuvus vaid 7,9 μF . Kasutades nelja antud kondensaatorit on summaarne mahtuvus 31,6 μF , mis on suurem kui arvatud 29 μF . Kondensaatori valikul kaalutleti ka kilekondensaatori massiivi kasutust, millel on samuti madal ESR näitaja, kuid puudub oluline mahtuvuse sõltuvus rakendatud alalispingest. Kondensaatori mõõtude kaalutlustel otsustati siiski keraamiliste kondensaatorite kasuks.

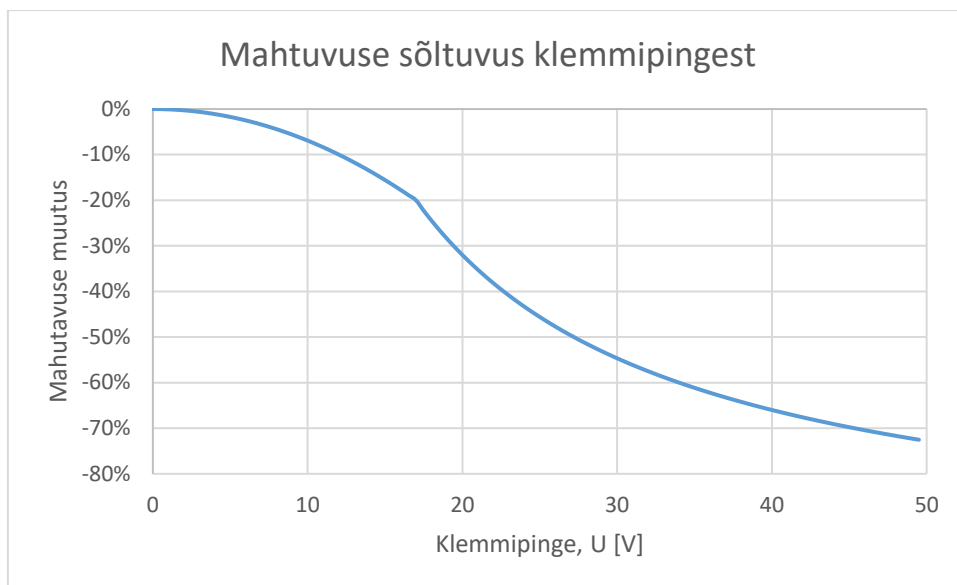
$$\Delta U_s = \frac{I_v}{4 \cdot f_{\text{lül}} \cdot C_{\text{sisend}}} \quad (2.5)$$

Kus: ΔU_s – sisendpinge pulsatsioon

I_v - väljundvool

$f_{\text{lül}}$ - lülitussagedus

C_{sisend} – sisendkondensaatori mahtuvus



Joonis 2.5 MLCC kondensaatorite mahtuvuse sõltuvus klemmipingest [15]

2.4.5 Transistori draiveri toiteallikas

Mikroskeemi LM25116 sees on lineaarne pingeregulaator, millelt võetakse toitepinge transistorite lülitamiseks. Regulaatori väljundpinge on 7,4 V. 38 V sisendpinge korral on pingeregulaatoril 30,6 V pingelang, mis langetab skeemi efektiivsust ning tõstab mikroskeemi temperatuuri. Sellise olukorra vältimiseks on mikroskeemil Vccx viik. Kui antud viigule anda 4,5 V suurem toitepinge, lülitatakse sisemine lineaarregulaator välja ning võetakse toitepinge Vccx viigult. Sellise lahendusega on võimalik suure sisendpinge korral muunduri efektiivsust tõsta ja saavutada madalam integraallülituse temperatuur [10]. Kuna muunduri jahutamiseks kasutatakse 12 V ventilaatorit, siis on seoses jahutussüsteemiga 12 V toiteallikas juba muunduril olemas. Jahutuse 12 V pingeregulaator on ühendatud ka LM25116 Vccx klemmiga. Toitepinge silumiseks on mikrokiibi Vccx viiguga paralleelselt ühendatud 4,7 μ F silukondensaator.

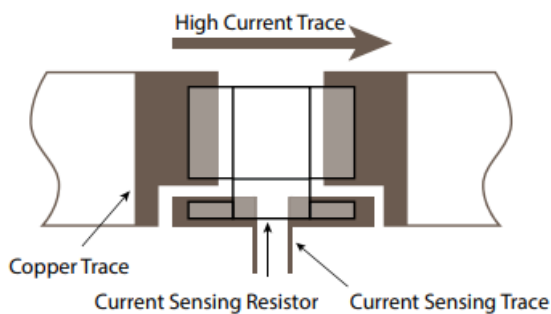
2.4.6 Lühisekaitse šunt

LM25116 kiibile on sisse ehitatud lühisekaitse funktsionaalsus. Voolu mõõtmiseks on alumise öla lülitustransistori lättega jadamisi paigutatud voolu mõõtmise šunt. Kiibi sees on lühise tuvastamise ahel realiseeritud komparaatori ja referentspingega. Kui pinge šundil ületab referentsi, rakendub lühisekaitse. Lühise tuvastus referentspinge sõltub Vccx viigu kasutusest. Kui välist toitepinget ei kasutata on referentsiks 110 mV, välise toitepinge kasutamisel aga 122 mV. Takisti väärtus on leitav valemiga (2.6) [10]. Šundi takistus peab olema väiksem kui 3,3 m Ω , seetõttu valitakse šundi takistuseks 2 m Ω .

$$R_{\text{\$unt}} \leq \frac{U_{\text{l\uehis}}}{I_v + \frac{U_v}{2 \cdot L \cdot f_{\text{l\ueil}}} \cdot \left(1 + \frac{U_v}{U_{s(\text{MAX})}}\right)} \quad (2.6)$$

- Kus: $R_{\text{\$unt}}$ – \\$undi takistus
 $U_{\text{l\uehis}}$ – l\uehisekaitse referentspinge
 I_v – maksimaalne v\ueljundvool
 U_v – v\ueljundpinge
 $f_{\text{l\ueil}}$ – l\ueilitussagedus
 $U_{s(\text{MAX})}$ – maksimaalne sisendpinge

V\uettes arvesse, et voolu m\ue\uehtmise ahelas on v\ue\rdlemisi suured voolud ning \\$undi takistus madal, on oluline kasutada Kelvini \uehendusmeetodit. Ka LM25116 andmeleht soovitab seda ning vastavad klemmid on mikrokiibil olemas [10]. Kelvini \uehendus on oluline, sest 2 m Ω \\$undi kasutamisel v\ue\ivad takistini viivad rajad ning joote\uehendus olla tunduvalt suurema takistusega. See omakorda p\uehjustab ebat\uepsust antud ahela t\ue\ue, mis ei ole soovitav. Seet\ue\utu on \\$undiks valitud spetsiaalne nelja \uehendusklemmiga takisti, kus kaks suuremat klemmi on m\ue\uehtetava voolu jaoks ja kaks v\ueiksemat klemmi on voolu m\ue\uehtmise jaoks [16]. T\ue\uepilise neljaklemmilise \\$undi p\uehim\ue\ue on n\ueha Joonis 2.6. Valitud takisti erip\ue\ueks on ka selle *revers* t\ue\uepi korpus, mille \uehendusklemmid asuvad erinevalt standardsest SMD takistist hoopis selle pikemal k\ue\uejel. See tagab tr\uekkplaadi \uehendustel madalama takistuse ning parema soojuse juhtivuse takistilt vasefooliumisse.



Joonis 2.6 Neljaklemmilise \\$undi p\uehim\ue\ue [16]

2.4.7 Sujuvk\ueivituse kondensaator

Sujuvk\ueivituse kondensaatori eesm\ue\uegiks on tagada probleemivaba muunduri t\ue\ue\ueiimi siirdumine. Muunduri sissel\ue\ueitamisel on v\ue\uejundkondensaatorid t\uehjad. Kuna v\ue\uejundkondensaatorid on 300 μF mahutavusega, siis kondensaatorite esialgsel t\ue\ueislaadimisel rakendub l\uehisekaitse. Selle tagaj\ue\uejel on muunduri t\ue\ue katkendlik,

väljundpinge hüplik ning halvemal juhul muundur ei käivitu. Antud olukorra vältimiseks on LM25116 mikroskeemil sujuvkäivituse funktsioon, mille ajaliskestvust saab reguleerida kondensaatoriga C_{ss} . Kondensaatorit C_{ss} laetakse täis $10 \mu A$ püsivooluallikaga. Kondensaator on ühendatud väljundpinge tagasisideahela diferentsiaalvõimendiga. Lineaarne pingekasv diferentsiaalvõimendi sisendil tagab ka lineaarse pingekasvu väljundis, vältides lühisekaitse rakendumist [10]. Sujuvkäivituse viide valitakse valemiga. Teades viidet, saab arvutada kondensaatori mahutavuse valemiga (2.7). Antud muunduri minimaalne sujuvkäivituse viide on $170 \mu s$.

$$t_{ss} > \frac{U_v \cdot C_{väljund}}{I_{lühis} - I_v} \quad (2.7)$$

Kus: t_{ss} – sujuvkäivituse viide
 U_v – väljundpinge
 $C_{väljund}$ – väljundkondensaatorite mahutavus
 $I_{lühis}$ – lühisekaitse rakendumise vool
 I_v – maksimaalne väljundvool

Sujuvkäivituse viite tekitamiseks vajaliku kondensaatori mahutavus on leitav valemiga (2.8). Valitud viide peab olema pikem, kui arvutatud aeg t_{ss} . Vormeli elektrisüsteemi ühendatud muundur peab käivitamise hetkel täis laadima ka enda väljundisse ühendatud muundurite sisendmahutavuse, milleks on 3 mF . Sellisel juhul on minimaalne viide $1,8 \text{ ms}$. Kahekordse varuteguriga on viiteajaks valitud $3,6 \text{ ms}$. Antud viite saavutamiseks on vajalik 30 nF mahutavusega kondensaator. Sujuvkäivituse kondensaatoriks on valitud 30 nF lähim standardväärtus, milleks on 33 nF ja saavutatav viite aeg on 4 ms .

$$C_{ss} = \frac{t_{ss} \cdot 10 \mu A}{1,215 V} \quad (2.8)$$

Kus: C_{ss} – sujuvkäivituse kondensaator
 t_{ss} – sujuvkäivituse viide

2.4.8 Alapingekaitse

LM25116 loogika sisaldab ka alapingekaitset. Alapingekaitse on lihtne meetod kaitsmaks muunduri ettearvamatud tööd sisendparameetrite juures, kus see ei ole ette nähtud töötama. Alapingekaitse referents pingeline on $1,215 \text{ V}$. Kui pingeline alapingekaitse klemmil on antud referents pingest madalam, siis mikrokiip siirdub *standby* režiimi. *Standby* režiimist välja tulek eeldab alapingekaitse klemmil referentsist kõrgemat pinget, arvestades seejuures ka $0,1 \text{ V}$ hüstereesiga. Alapingekaitse rakendumise

pingeks on valitud 24 V, sest muunduri minimaalne disainitud tööpinge on 28 V. Alapinge kaitse rakendumise pinge valikul peab arvestama ka sisendpinge pulsatsiooniga ja varuteguriga, et vältida kaitsemehhanismi soovimatut rakendumist. LM25116 andmelehes seatakse pingejaguri ülemise õla takistile tingimus, et selle takistus peab olema 500 korda suurem maksimaalsest sisendpingest, ehk antu juhul suurem kui 19 kΩ. Väiksema mõõtevoolu saavutamiseks on valitud takisti eelevalt arvutatust ligikaudu kaks korda suurema takistusega. Vormeli takistite laost on valitud ülemise õla takistiks E48 tüüpi takisti takistusega 40,2 kΩ. Antud juhul peab alumise õla takisti takistuseks olema 2,1 kΩ. Valitud on E48 lähim väärtus, milleks on 2,15 kΩ.

$$R_{UV1} = 1,215 \cdot \left(\frac{R_{UV2}}{U_{s(min)} + (5 \mu A \cdot R_{UV2}) - 1,215} \right) \quad (2.9)$$

Kus: R_{UV1} – pingejaguri alumise õla takisti

$U_{s(min)}$ – minimaalne sisendpinge

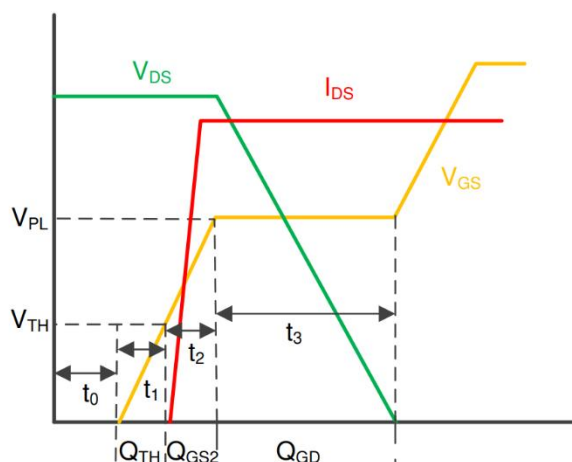
R_{UV2} – pingejaguri ülemise õla takisti

Alapingekaitse klemmidele on implementeeritud ka teine funktsionaalsus. Lühisekaitse ahela rakendumisel lülitatakse alapingekaitse viik maandusesse [10]. Seda funktsionaalsust on antud disainis kasutatud lühise indikaatori implementatsiooniks. Madala pingelävega MOSFET transistori pais on ühendatud alapingekaitse klemmidele. Muunduri tavalise töö juures on pinge alapingekaitse klemmil 1,523 – 2,067 V ning transistor on avatud. Takistist R13 tulev vool on lülitatud läbi transistori maandusesse ning indikaator LED ei põle. Lühisekaitse rakendumisel pinge alapingekaitse klemmil kukub 200 mV suurusjärku ning transistor sulgub. Takistist R13 tulev vool läbib LEDi ning indikaator süttib, andes märku veast.

2.4.9 Lülitustransistorid

Buck muunduri suurimad soojuskadod on lülitustransistoritel. Seejuures on ülemise ja alumise õla transistorite kaod erinevad. Ülemise õla transistori kadudeks on: lülituskadu ja juhtimiskadu. Alumise õla transistori kadudeks on: kadu parasiitdiodil ja juhtimiskadu. Alumise õla transistoril lülituskadu ei esine, sest parasiitdiod avaneb enne transistorit. Kadude magnituuti mõjutavad transistori parameeter R_{ds} , siiretevahelised parasiitmahutavused ja transistori avanemise ning sulgumise kiirus. Seetõttu on sobivate transistorite hoolikas valimine eriti oluline. Valiku teeb keeruliseks transistori parameetrite suur hulk. Juhtimiskao moodustavad transistorit läbiv vool ja R_{ds} . Juhtimiskadu on arvutatav ülemise lülitusõla transistorile valemiga (2.10) ja alumisele

lülitusõla transistorile valemiga (2.11) . Ülemise õla transistori lülituskadu on arvatav valemiga (2.12). Valemist selgub, et lülituskaole avaldavad mõju lülitussagedus ja transistori paisu laeng. Kõrgema lülitussageduse juures on oluline valida väiksema paisu laenguga transistor, et saavutada madalamad lülituskaod. Seetõttu on ülemise lülitusõla transistori juures kõige olulisem parameeter paisu laeng. Alumise õla transistori olulisim parameeter on aga R_{DS} , sest sellel paisu mahutavusega seotud kadusid ei esine [17].



Joonis 2.7 Transistori avanemisel lülituskadusid illustreeriv joonis [17]

$$P = R_{DS}(1 + \delta) \cdot I_v^2 \cdot D \cdot \left(1 + \frac{1}{12} \left(\frac{\Delta I_{pp}}{I_v}\right)^2\right) \quad (2.10)$$

Kus: R_{DS} - neelu ja läte vaheline takistus
 δ - R_{DS} temperatuuri sõltuvuse koefitsient
 I_v - väljundvool
 D - täitetegur
 ΔI_{pp} - voolu pulsatsioon induktoril

$$P = R_{DS}(1 + \delta) \cdot I_v^2 \cdot (1 - D) \cdot \left(1 + \frac{1}{12} \left(\frac{\Delta I_{pp}}{I_v}\right)^2\right) \quad (2.11)$$

$$P = \frac{U_s}{2} \left(I_v - \frac{\Delta I_{pp}}{2}\right) \cdot f_{iil} \cdot t_r + \frac{U_s}{2} \left(I_v + \frac{\Delta I_{pp}}{2}\right) \cdot f_{iil} \cdot t_{off} \quad (2.12)$$

Kus: f_{sw} - lülitussagedus
 t_r - transistori avanemise aeg
 t_{off} - transistori sulgumise aeg

Transistori valikul peab arvestama ka transistoreid juhtiva draiveri parameetritega. Olulisemaks parameetriks siinkohal on paisu täis- ja tühjakslaadimise maksimaalne vool, mis on sageli erinev. Transistori paisu laengu suurus ja draiveri maksimaalne vool määravad maksimaalse võimaliku lülitussageduse. Mittesobiva draiveri kasutamisel muutuvad transistori sisse- ja väljalülitamise viited liiga pikaks, põhjustades irratsionaalselt suuri lülituskadusid.

Transistori valikuks on koostatud tabel, mis sisaldab kokkuvõtvat ülevaadet transistori parameetritest. Tabelis esitatud paisu laeng on leitud 10 V paisu pinge juures, R_{ds} on leitud 10 V paisu pinge juures ja 25 °C töötemperatuuril. Lisaks sellele on tabelis välja toodu ka neelu ja lätte vahelise pinge taluvus, paisu pingelävi ning kristallist korpusesse termiline takistus. Neelu ja lätte vahelise pingetaluvuse poolest sobivad kõik tabelis olevad transistorid. Transistori andmetest selgub, et väiksema R_{ds} takistuse korral peab leppima suurema paisu laenguga, mis omakorda tõstab lülituskadusid. Sobiva transistori valik on tehtud kasutades lihtsustatud FOM meetodit. FOM meetodis korrutatakse paisu laeng R_{ds} takistusega. Mida väiksem on antud korrutise tulem, seda sobivam on transistor [18]. Antud meetod on suuresti lihtsustatud ning tegelik oluliste parameetrite hulk on palju suurem, muutes transistori valiku protsess keeruliseks. FOM põhjal valiti lülitustransistoriks CSD18540Q5B.

Tabel 2.5 Lähteandmed lülitustransistori valikuks

Transistor	Q_g [nC]	R_{ds} [mΩ]	FOM	U_{ds} [V]	$U_{gs(th)}$ [V]	R_{jc} [°C/W]
CSD18540Q5B	53	2,2	116,6	60	2,3	0,8
ISC030N10NM6	69	3	207	100	3,3	0,72
IAUS300N08S5N012T	231	1,2	277,2	80	3,8	0,4
BSB056N10NN3 G	74	5,6	414,4	100	3,5	1
NVMFSC1D6N06CL	91	1,5	136,5	60	2	0,9

Kasutades ülemises lülitusõlas ühte transistorit hajub sellel ligikaudu 2,5 W. Kasutades kahte samasugust transistorit paralleelselt hajub mõlemal transistoril 1,7 W. Sellest tulenevalt paigutatakse muunduri ülemisse lülitusõlga kaks paralleelset transistorit. Kahe transistori kasutamisel on üksikul transistoril hajuv soojus väiksem. Lisaks on jahutamiseks kasutatavat pindala ühe transistori võrra rohkem. Seeläbi on saavutatav madalam termiline takistus. Tänu sellele saavutatakse transistori kristalli madalam töötemperatuur. Arvestades, et lülitusõla alumisel transistoril transistori lülitamisest tulenev kadu on tühine ning põhiline kadu tuleneb juhtimiskaost, on lülitusõla alumise transistorina kasutusel üks CSD18540Q5B.

Ülemises lülitusõlas on kasutusel kaks paralleelset transistorit. Sellest tulenevalt on ka paisu laeng kaks korda suurem ning on oluline kontrollida transistori avanemise ja sulgumise viidet. Transistori avanemise viide on arvatav valemiga (2.13) ja sulgumise viide valemiga (2.14). Liiga pika viite korral tekivad transistoril suured soojuskaod [17]. Valitud transistorite avanemise aeg on 15 ns ja sulgumise aeg 24 ns.

$$t_r = \left(\frac{Q_{gs2}}{U_{dr} - 0,5 \cdot (U_{pl} + U_{gs(th)})} + \frac{Q_{gd}}{U_{dr} - U_{pl}} \right) \cdot (R_g + R_{drive}) \quad (2.13)$$

Kus: t_r – transistori avanemisel lineaarrežiimi kestvus

Q_{gs2} – paisu ja lätte vaheline laeng

Q_{gd} – paisu ja neelu vaheline laeng

U_{dr} – paisu lülituspinge

U_{pl} – paisu platoo pinge

$U_{gs(th)}$ – paisu pingelävi

R_g – transistori paisu takisti

R_{drive} – draiveri väljundtakistus

$$t_f = \left(\frac{Q_{gs2}}{U_{dr} - 0,5 \cdot (U_{pl} + U_{gs(th)})} + \frac{Q_{gd}}{U_{pl}} \right) \cdot (R_g + R_{drive}) \quad (2.14)$$

Kus: t_f – transistori sulgumisel lineaarrežiimi kestvus

2.4.10 Väljundpinge jagur ja tagasiside kompensatsioon

LM25116 väljundpinge tagasiside referentsiks on 1,215 V. Seetõttu peab vastavalt soovitud väljundpingele arvutama välja pingejaguri takistite takistused valemiga (2.15) [10]. Väljundpingejaguri õla alumiseks takistik on valitud tudengivormeli laost E48 tüüpi 11 k Ω takisti. 24 V väljundpinge saavutamiseks peab olema antud juhul õla ülemine takisti 206 k Ω . Õla ülemiseks takistik on valitud E48 lähim väärtus, milleks on 205 k Ω ja saavutatav väljundpinge 23,86 V.

$$\frac{R_{FB2}}{R_{FB1}} = \frac{U_v}{1,215 V} - 1 \rightarrow R_{FB2} = \left(\frac{U_v}{1,215 V} - 1 \right) \cdot R_{FB1} \quad (2.15)$$

Kus: R_{FB2} – väljundpingejaguri õla ülemine takisti

R_{FB1} – väljundpingejaguri õla alumine takisti

U_v - väljundpinge

Kuna *buck* muunduri induktorist ja väljundkondensaatorist moodustuva LC filtri võimendustegur on funktsioon sagedusest, vajab muundur stabiilseks tööks tagasisideahelas kompensatsiooni [19]. LM25116 tagasisideahelas on kasutatud tüüp – II kompensatsiooni skeemi. Tulenevalt kompensaaatori komponentide arvutamise keerukusest, on kompensatsiooni ahela väärtused leitud, kasutades tarkvara webench.

2.4.11 Sisendterminalid

Kõrgepinge muunduri väljundis on kasutusel kruviterminalid. Lisaks sellele asuvad kõrgepinge muundur ja madalpinge muundur akupaki elektroonikasektsioonis kõrvuti. Kõrgepinge muunduri ja madalpinge muunduri ühenduste eeldatav vahemaa on 25 mm. Seetõttu on muundurite ühendamiseks kasutusel vasest *busbarid*. Sellest tulenevalt on ka madalpingemuunduri sisendklemmid kruviterminalid. Ühenduste juures on oluline jälgida ka terminali maksimaalset lubatud voolutugevust. Würth kruviterminalil on see 50 A [20]. Muunduri suurim sisendvool esineb maksimaalsel koormusel minimaalse sisendpinge juures. Arvestades lühiajalist 480 W väljundvõimsust ja 95 % efektiivsust on sisendvõimsus 505 W. 505 W sisendvõimsuse korral on sisendvool 18 A. Seega antud terminal sobib.

2.4.12 Väljundpistik

Juhtmestusmeeskonna nõudmiseks madalpingemuundurile on kaheksaklemmiline väljundpistik, mille neljal klemmil on 24 V pinge ning ülejäänud neli klemmi on ühendatud GND'ga. Koormusvool klemmide vahel jaguneb peaaegu võrdselt. Standartsuse eesmärgil on tudengivormelis kasutusel ainult kindlad pistikute mudelid. Madalpingesüsteemi toiteahelates on peaaegu eranditult kasutusel tootja MOLEX microfit 3.0 seeria. Microfit 3.0 tootevalikus leidub kaheksaklemmiline horisontaalne pistik tootekoodiga 43045-0813. Antud pistiku ühe klemmi maksimaalseks lubatud voolutugevuseks on 8A [21]. Arvestades võrdset voolude jaotumist klemmidel on keskmine koormus 362 W võimsuse juures 3,8 A ja maksimaalse väljundvõimsuse juures 432 W 4,5 A . Lühiajalise 480 W väljundvõimsuse juures on antud juhul klemmi vool 5 A. Seega antud pistik sobib.

2.4.13 Indikaatorid

Muunduri normaalse töö kiireks hindamiseks on muundurile paigutatud neli indikaatorit: sisendpinge indikaator, väljundpinge indikaator, jahutussüsteemi toitepinge indikaator ja lühisekaitse indikaator. Kuna indikaatorite olulisus ei ole vormeli sõitmisvõime kohalt primaarne, on oluline, et indikaatorite mõju süsteemi disainis oleks minimaalne. Seda peamiselt voolu tarbimiselt. Tavalise LED indikaatori maksimaalseks töövooluks on 20 mA ning piisava heleduse saavutamiseks on kasutusel 5 – 10 mA. Vormelis, kus mõne süsteemi tarbitav vool on 10 mA ei ole selline indikaatori valik aktsepteeritav. Seetõttu on kasutusel LED indikaatorid, mille maksimaalne töövool on 5 mA ning katseliselt on valideeritud, et piisav indikaatori heledus on saavutatud 200 µA juures [22]. LED ette voolu piirav takisti on leitud kasutades valemit [6]:

$$R = \frac{U_t - U_{LED}}{I_{LED}} \quad (2.16)$$

Kus: R – voolu piirav takisti

U_t – LED toitepinge

U_{LED} – LED päripinge

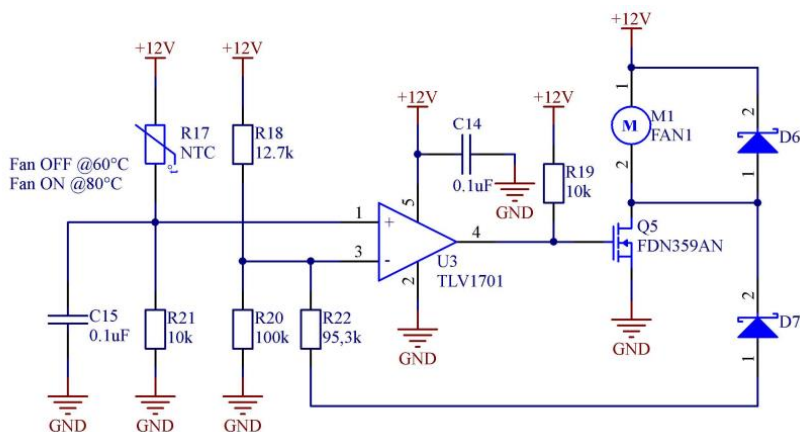
I_{LED} – LED vool

2.4.14 Aktiivjahutuse termolüliti

Võttes arvesse projekteeritava muunduri väljundvõimsust 432 W ja soovitatavat efektiivsust 95% tuleb soojuskaoks 22,7 W. On selge, et muunduri väikeste mõõtmete juures on soojuse hajutamiseks vaja sundõhuvoolu, mis tekitatakse ventilaatoriga. Soojuskadu muunduril ei ole aga konstantne ning sõltub peamiselt sisendpingest ja väljundvoolust. Seetõttu ei pruugi madalate väljundvõimsuste juures sundjahutust vaja minna. Ventilaatori temperatuuripõhine juhtimine tõstab ka muunduri efektiivsust, sest nii on madalatel koormustel muunduri kadu ventilaatori poolt tarbitava võimsuse võrra väiksem.

Ventilaatori juhtimiseks kasutatav skeem on Joonis 2.8. Temperatuuri mõõtmiseks kasutatakse NTC tüüpi takistit R_{17} , mis on liimitud kõige kuumema transistori korpuse külge. NTC R_{17} ja takisti R_{12} moodustavad pingejaguri, mille väljundpinge temperatuuri tõustes kasvab. Häirete filtreerimiseks on takistiga R_{21} paralleelselt ka kondensaator C_{15} mahutavusega 100 nF. Ventilaatori lülitamiseks kasutatakse komparaatorit TLV1701, mis võrdleb temperatuuri mõõitava ahela väljundpinget referentspingega. Referentspinge määravad takistid R_{18} ja R_{20} . Selleks, et vältida olukorda, kus ventilaatorit lühikeste intervallidega sisse ja välja lülitatakse, on referentspinge pingejagurile lisatud R_{22} ja D_7

näol hüstereesi ahel. Tänu sellele saab ventilaatori sisse- ja väljalülitamise temperatuuri takistite valikuga erinevalt seadistada. Kuna komparaatori väljundvool on võrreldes ventilaatori poolt tarbitavaga väike, ei ole see võimeline otse ventilaatorit juhtima. Seetõttu on ventilaatori juhtimiseks kasutatud transistorit Q₅, mille paisu juhib komparaator. Ventilaatori induktiivsusest tulenevate pingepiikide summutamiseks on ventilaatoriga paralleelselt ühendatud diod D₆.



Joonis 2.8 Jahutusventilaatori termolüliti skeem

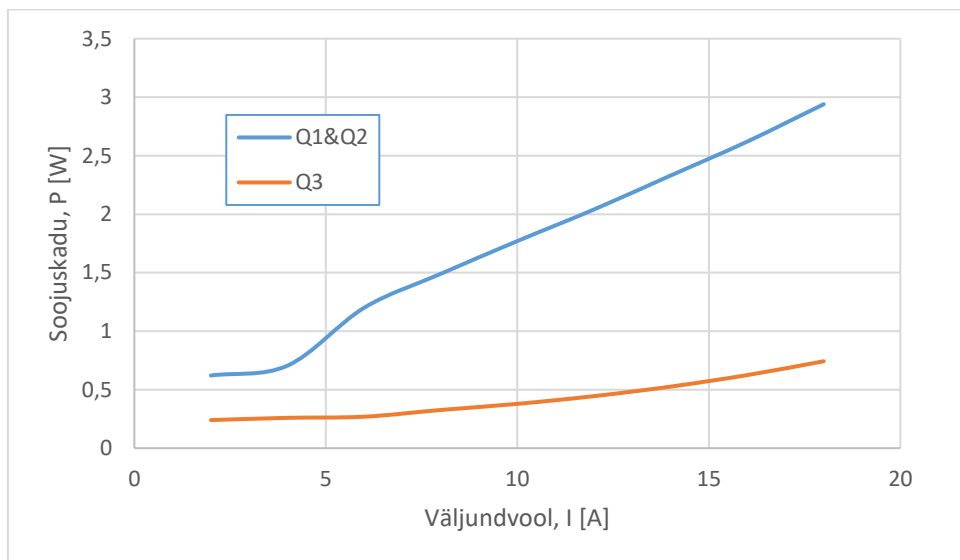
2.5 Simuleerimine ja tulemuste hindamine

Efektiivsuse ja muunduri mõõtude eesmärges silmas pidades on oluline hinnata erinevatel komponentidel hajuvaid soojusvõimsusi. Webench tarkvara arvutab soojuskaod: transistoritel, mikrokiibil, induktoril, sisend- ja väljundkondensaatoritel. Lisaks sellele võimaldab webench simuleerida muunduri väljundpinge reaktsiooni järsule koormuse muutusele [9]. Webench tarkvaral on ka piiranguid, mistõttu on muunduri efektiivsuse hindamisel kasutatud ka teisi töövahendeid.

2.5.1 Kaod transistoritel ja kondensaatoritel

Kaod ülemise ja alumise lülitusõla transistoritel, sisend- ja väljundkondensaatoritel on arvatud kasutades tarkvara webench. Tarkvara webench kasutusel on mitmeid põhjuseid. Webench tarkvaras on võimalik koostada antud muunduri skeem, valides mikroskeemiks LM25116 ning seejärel sisestades mikroskeemi ümber olevate komponentide väärtused vastavalt eespool arutatule. Webench kasutuse peamiseks põhjuseks on transistori lülituskadude arvutamise keerukus. Võib eeldada, et webench kasutab kadude arvutamisel täpseid transistorite mudeleid ning tulemused on tõetruumad, kui käsitsi arvutades on saavutatav. Ülemise ja alumise lülitusõla transistorite summaarne kadu on Joonis 2.9. Transistorite soojuskaod on eraldi välja

toodud, sest need on olulised parameetrid, mida trükkplaadi disaini protsessis arvesse võtta. Lisaks sellele on soojushajuvused olulised ka jahutussüsteemi arvutuste jaoks.



Joonis 2.9 Soojuskaod transistoritel [9]

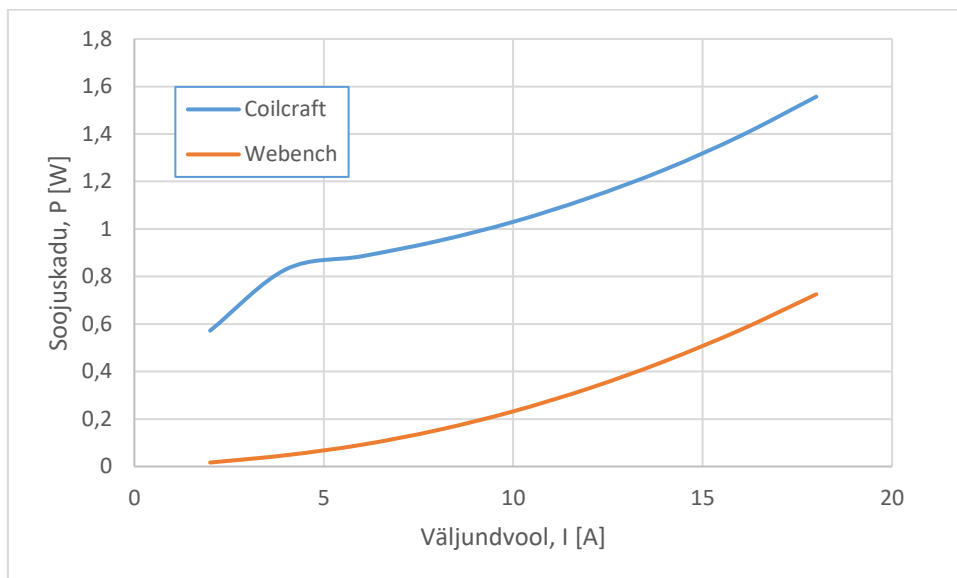
2.5.2 Kaod mikrokiibil

Webench tarkvara ei võimalda simuleerida muunduri skeemi tööd välise toiteallikaga. Arvestades, et välisel toitel on mikrokiibi efektiivsusele suur mõju, on mikrokiibi soojuskaod hindamiseks kasutatud LM25116 disainivahendite hulgas olevat LM25116_quickstart arvutuslehte. Sisendparameetriteks on samad parameetrid, mis webench tarkvaras. Väliseks toitepingeks on sisestatud 12 V. Arvutustabeli hinnangul on kogu töörežiimi ulatuses soojuskadu mikrokiibil võrdlemisi sarnane. Maksimaalne ja minimaalne soojuskadu erineb vaid 16 mW võrra. Seetõttu on efektiivsuse arvutuses kogu töörežiimi ulatuses võetud mikrokiibi soojuskaoks selle aritmeetiline keskmine 525 mW.

2.5.3 Kaod induktoril

Webench tarkvara induktori mudel sisaldab induktiivsuse parameetrit ja DCR parameetrit. Seetõttu on alust arvata, et webench induktori simulatsioon ei arvesta induktori südamikukadusid. Tootja Coilcraft induktori simulaator võimaldab simuleerida induktori erinevaid parameetreid, sealhulgas ka vase- ja südamikukadusid. Tulenevalt antud kahtlusest on webench poolt arvutatud induktori kadusid võrreldud Coilcraft simulaatori poolt arvutatud kadudega. Võrdlus on näha Joonis 2.10. Jooniselt selgub, et

Coilcraft simulaatori poolt arvatud kaod on võrreldes webench kadudega suuremad, erinedes 2 A koormuse juures 34 korda ja 18 A koormuse juures 2 korda. Sellest tulenevalt arvestatakse edasistes arvutustes Coilcraft simulaatorist pärinevate induktori kadudega.



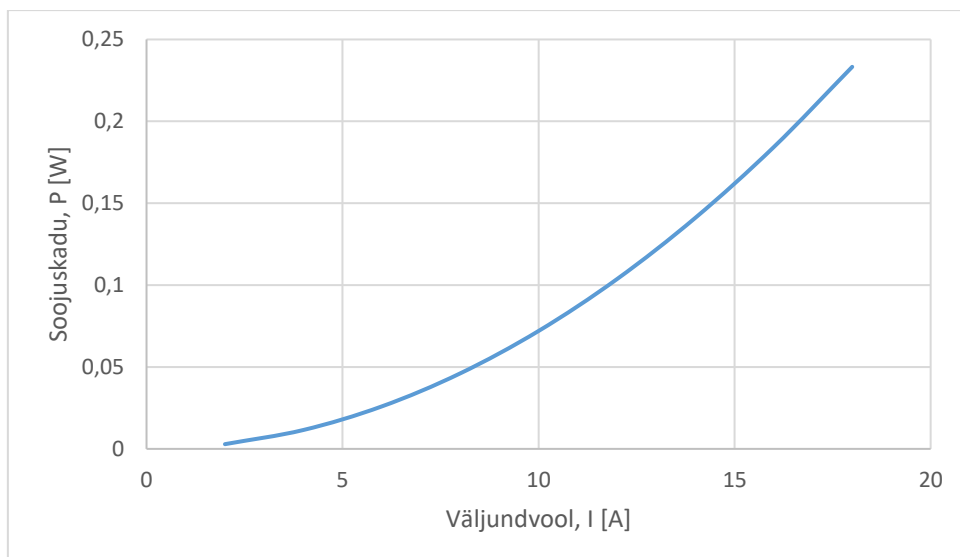
Joonis 2.10 Induktori soojuskadude võrdlus

2.5.4 Kaod šunt takistil

Webench tarkvara kadusid šundil ei arvuta. Võttes arvesse muunduri suurt väljundvoolu ja kõrget nõutud efektiivsust on oluline arvestada ka šundi soojuskaoga. Lisaks sellele mõjutab soojushajuvus šundil ka trükkplaadi disainis vastuvõetavaid otsuseid. Šunti läbiv vool on võrdne alumise öla lülitustransistori vooluga. Seetõttu on šundil hajuv soojusvõimsus leitav kasutades vastava transistori juhtivuskao valemit, kus transistori parameeter R_{ds} tuleb asendada šundi takistusega [10]. Antud valemiga leitud soojuskadu on näha Joonis 2.11. 18 A väljundkoormuse juures on soojuskadu šundil 0,23 W. Soojuskadu on võrdlemisi väike, kuid võimalikult reaalse kadude arvutamise eesmärgil võetakse ka seda arvesse.

$$P = R \cdot (1 - D) \cdot I_v^2 \quad (2.17)$$

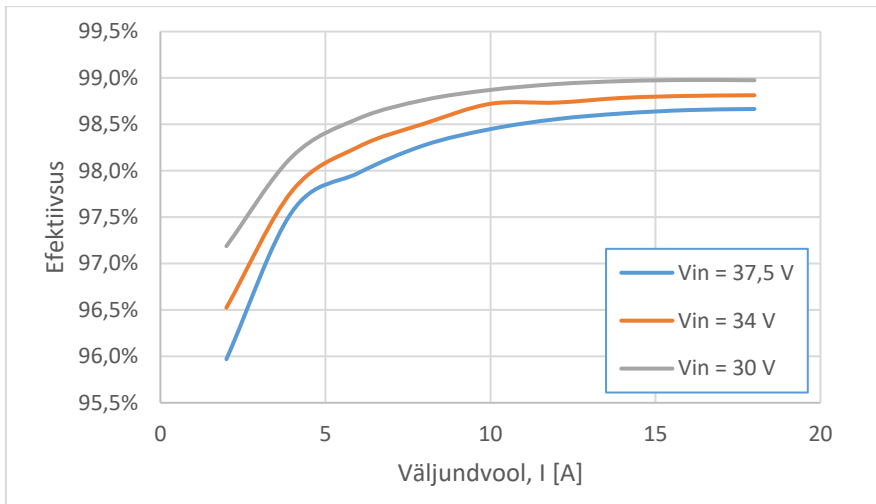
Kus: R – šundi takistus



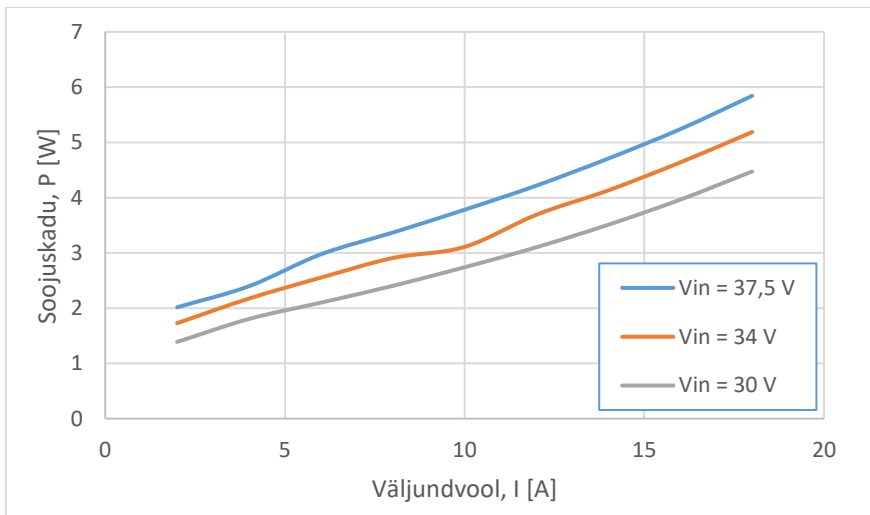
Joonis 2.11 Soojuskadu šunt takistil

2.5.5 Muunduri arvutuslik efektiivsus

Eelnevates lõikudes kirjeldatud andmete põhjal saab leida muunduri teoreetilise efektiivsuse. Teoreetiline efektiivsus on leitud kasutades erinevaid simulaatoreid ja disainivahendeid, sealhulgas tarkvara webench, Coilcraft induktori simulaator, LM25116 disaini arvutustabel ja šundi kao arvutusi. Arvutusliku efektiivsuse graafiku põhjal saab hinnata, kas komponentide valikud on kooskõlas efektiivsuse eesmärgiga või peab mõne komponendi valikut veelgi optimeerima. Muunduri teoreetiline efektiivsus on Joonis 2.12. Teoreetiline summaarne soojuskadu on Joonis 2.13. Joonistel olev efektiivsus on üllatavalt kõrge ning kaod madalad. See tuleneb tõenäoliselt sellest, et transistori kadude arvutamine on lihtsustatud ning arvutatud lülituskaod on reaalsest madalamad. Lisaks sellele ei ole arvesse võetud transistori R_{ds} takistuse sõltuvust temperatuurist. Võib eeldada, et reaalsed muunduri kaod on vähemalt 1,5 – 2 korda kõrgemad arvutatud kadudest. Ka teguri 1,5 – 2 korda kõrgemate kadude juures ületatakse soovitud efektiivsuse väärtus, seega edasised iteratsioonid komponentidega ei ole vajalikud.



Joonis 2.12 FES22 muunduri arvutuslik efektiivsus



Joonis 2.13 FES22 muunduri arvutuslik soojuskadu

3 TRÜKKPLAADI DISAIN

Antud muunduri trükkplaadi disainis peab arvesse võtma järgmisi asjaolusid:

- Suur väljundvool 18 A, plaadi siseselt pulsatsiooni tõttu > 22 A
- Kõrge töösagedus 263 kHz
- Trükkplaadi väiksed mõõtmed
- Komponentidel hajuv soojus
- Transistorite jahutamine
- *Buck* eripära „*hot loop*“
- Lülitustransistorite lühikesed ühendused
- Paralleelne transistorite ühendus

3.1 Voolukontuuride optimeerimine

Buck muunduri skeemis moodustub viis olulist kontuuri. Kontuurid on näha Joonis 3.1. Kontuuride realiseerimine trükkplaadi disainis mõjutab suuresti kogu muunduri töövõimet. Kontuuride juures on oluline, et need oleksid võimalikult lühikesed, madala induktiivsuse ja takistusega, kõik kontuuridega seotud ühendused võiks asuda samal trükkplaadi kihil. Teise ja kolmanda kontuuri kehv disain võib põhjustada transistorite paisudel ostsilleerimist. See põhjustab omakorda muunduri efektiivsuse langust. Kõrgete pingepiikide korral võib transistor hävineda. Üheks oluliseimaks kontuuriks on esimene kontuur, ehk „*hot loop*“. Nende kontuuride halb disain põhjustab interferentsi, ostsilleerimist ning maanduse hüplemist trükkplaadil. Selle tagajärjeks on suurenenud elektromagneetiline müra, muunduri efektiivsuse lang ja ebastabiilne töö [23]. FEST22 muunduri voolukontuuride realiseerimine on näha Joonis 3.2. Transistori paisuga seotud kontuure nr 2 ja nr 3 FEST22 trükkplaadil eraldi välja toodud ei ole. Kontuur nr 1 on FEST22 muunduri joonisel punase värviga. Antud kontuur on mõtteline ning koosneb kontuuride nr 4 ja nr 5 vooludest. Kontuur nr 4 kujutab hetke, kui lülitusõla ülemised transistorid on avatud, FEST22 joonisel roheline kontuur. Kontuur nr 5 kujutab hetke kui lülitusõla alumine transistor on avatud, FEST22 joonisel kollane kontuur.

3.2 Komponentide paigutus

3.2.1 Üldised kitsendused komponentide paigutusele

Jahutussüsteemi disain seab trükkplaadi disainile mitmeid kitsendusi, määrates ära üldise signaalide ja komponentide struktuuri trükkplaadi kihtidel. Soojuse juhtimine transistoritelt toimub läbi nende neelu kontakti. Seetõttu peavad transistorid asuma trükkplaadi alumisel poolel ja jahutusradiaator transistorite kohal trükkplaadi pealmisel kihil. Soojuse juhtimise eesmärgil on teatud polügoonid kõigil neljal trükkplaadi kihil sama kuju ja paigutusega. Sellest tulenevalt on trükkplaadi kihtide paigutus järgmine:

1. Kiht – polügoonid, üksikud rajad
2. Kiht – polügoonid
3. Kiht – polügoonid, üksikud rajad
4. Kiht – peamine radade kiht, polügoonid

3.2.2 Peamiste komponentide paigutus

Muunduri mõõte silmas pidades on sisendterminalide vahele paigutatud sisendkondensaatorid. Kaks kõrvuti asuvat kondensaatorit on ligilähedaselt sama pikad kui sisendterminal. Seetõttu on kaks ülejäänud sisendkondensaatorit paigaldatud trükkplaadi teisele poolele. Voolu ühtlaseks jaotamiseks kondensaatorite vahelt on kondensaatorite sisendterminalide ümber *via*'d.

Pluss terminali kõrval asuvad kaks ülemise lülitusõla transistorit. Tänu sellele on voolu teekond sisendterminalilt ja sisendkondensaatoritelt transistorini minimaalne. Transistorid asuvad üksteise kõrval ja on ühendatud suure polügooniga. Täpselt samade mõõtmetega ja kujuga polügoon on ka trükkplaadi ülejäänud kolmel kihil. Kihtide omavaheliseks ühendamiseks on kasutatud meetodit „*via stitching*“, transistorite ühendusele on manuaalselt lisatud tihedama sammuga *via*'d. Sellel on kolm suurt eesmärki: tekitada madala takistuse ja induktiivsusega ühendus sisendterminali, sisendkondensaatorite ja transistorite vahel, juhtida võimalikult madala termilise takistusega transistoril eralduv soojus trükkplaadi teisel pool asuvale radiaatorile ning tekitada võimalikult suur termiline mass. Kuna ülemises õlas olevad transistorid on ühendatud paralleelselt, on oluline, et nende temperatuurid oleksid võimalikult sarnased ning termiline sidestus hea, et tagada võimalikult võrdne voolu jaotumine.

Ülemise lülitusõla transistorite lätted on ühendatud alumise õla transistori neeluga. Sellese ühendusse kuulub ka induktori üks klemmidest. Kuna antud ühendusse kuulub alumise õla transistori neel, mis on ühtlasi tema soojust juhtivaks osaks, siis on antud ühendus realiseeritud polügoonina. Täpselt samade mõõtude ja kujuga polügoon asub

kõigil neljal trükkplaadi kihil. Kõik neli kihti on omavahel ühendatud kasutades „*via stitching*” meetodit, lisaks sellele on transistori ühendusele paigutatud 1 mm sammuga *via*’d eelmises lõigus ära toodud elektrilistel ja termodünaamilistel põhjustel.

Kolme lülitustransistori paigutus on selline, et transistorid ja polügoonid kuhu, nad kinnituvad, jääksid täpselt radiaatori alla. Selle eesmärgiks on võimalikult madala termilise takistuse saavutamine. Sooja juhivad nii *via*’d, trükkplaadi foolium, kui ka trükkplaadi materjal ise. Seejuures on transistorite all paiknevad *via*’d täidetud joodisega, et parandada soojusjuhtivust.

Šunt takistist paremale on paigutatud muundurit juhtiv mikroskeem. Tänu sellisele paigutusele on saavutatav minimaalne raja pikkus järgmiste oluliste komponentideni: šundi mõõtesignaaliid, alumise õla lülitustransistori pais, ülemise õla lülitustransistorite paisud ja *bootstrap* kondensaator. Mikrokiibi alla on paigutatud reas erinevad süsteemi tööd toetavad passiivkomponendid: tagasiside kompensatsioon, tagasiside pingejagur, lülitussagedust selekteeriv takisti jne. Mikrokiibi jahutamiseks mõeldud ühendus on *via*’de abil seotud kõigi nelja trükkplaadi kihiga, et soojust paremini GND polügoonide vahel hajutada.

Väljundkondensaatoritest ja muundurit juhtivast mikrokiibist üleval asub induktor. Antud paigutusega jääb induktori üks ühendusklemm täpselt „*switching node*” polügooni sisse, ning teine väljundpolügooni sisse. Siinkohal peab arvesse võtma, et osa induktori vase kaost hajub „*switching node*” polügooni, mõjutades alumise lülitustransistori temperatuuri. Induktori teine ühendusklemm on ühendatud väljundkondensaatoritega.

Väljundpolügoon asub pealmisel ja alumisel kihil. Sellisel disainil on mitmeid eesmärke. Arvestades, et trükkplaadi sisemised kihid on maandused, tekib plaatkondensaatori efekt, kus trükkplaadi kihtides ja dielektrikust endast moodustub väiksemahuline kondensaator. See filtreerib välja kõrgsageduslikud lülitushäired. Teiseks tagab see madala takistusega elektrilise ühenduse väljundkondensaatoritega ja sulavkaitsetega. Sulavkaitsmete ja pistiku ühenduse vahele on igale trükkplaadi kihile paigutatud rada, et saavutada ühenduse madal takistus. Sulavkaitsme mõlemale kontaktile on paigutatud *via*, mis kaitset paigaldades täituvad joodisega. Selle eesmärgiks on parem voolu jaotumine trükkplaadi kihtide vahel.

Pistikust ülevale ja induktorist paremale jääb nurk, kuhu mahuvad hästi ära nii jahutussüsteemi toiteallikas kui ka ventilaatorit juhtiv loogika. Sealt on võimalik lühikese rajaga viia 12 V toitepinge muunduri mikrokiibini. Lisaks sellele saab sealt hästi

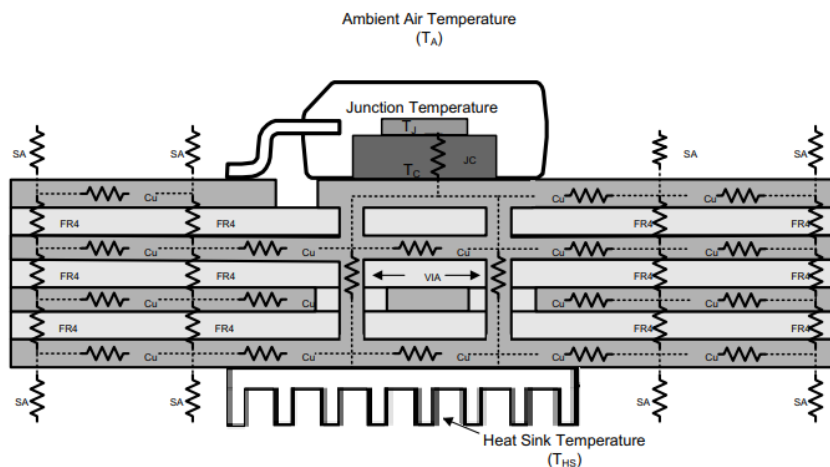
mööda plaadi äärt vedada transistori temperatuuri mõõtvat NTC signaali rajad, ilma suuremate mõjutusteta ülejäänud trükkplaadi disainile. Toiteallika kasutuseks on jäetud trükkplaadile kolme võimalust. Esimene võimalus on kasutada eraldiseisvat toiteallikat, mis töötab muunduri sisendpingega. Teiseks võimaluseks on eraldiseisev muundur, mis saab toitepinge muunduri väljundist. Vastavalt eraldiseisva toiteallika valikule monteeritakse trükkplaadile takisti R23 või R24. Kui muunduri mikroskeemi ei soovita eraldiseisva toiteallikaga kasutada, jäetakse trükkplaadile takisti R15 monteerimata, kuid takisti R12 monteeritakse. Välise toiteallika kasutamisel peab takisti R15 monteerima ja takisti R12 kohale monteeritakse kondensaator.

3.2.3 Jahutuse arvutused

Jahutuse arvutuses on tehtud mitmeid lihtsustusi. Arvesse on võetud vaid radiaatori jahutavat toimet. Trükkplaadi enda pealmiste kihtide soojuskiirgavust ei ole arvutustes arvesse võetud, kuid realsel muunduril seda toimet eeldatakse. Induktori puhul ei ole arvestatud induktori korpuse termilist takistust keskkonda, kuid realsel muunduril mõjutavad selle temperatuuri nii korpusest keskkonda eralduv soojus, kui ka induktori mähise jahutamine läbi selle klemmide. Trükkplaadi alumiselt kihilt pealmisesse kihti soojuse juhtimine toimub *viadega*. Madalaim termiline takistus on saavutatav otse soojust eraldava ühenduse sisse paigaldatavad *via*'d. Lisaks sellele täituvad komponendi ühenduses asuvad *via*'d jootes joodisega, mistõttu väheneb termiline takistus veelgi. Lisaks sellele on soojust eraldavate komponentide polügoonid „*via stitching*“ meetodiga tihedalt *viadega* kaetud, et veelgi termilist takistust vähendada. Kuna komponendist eemal asuvate *viade* termilist takistust mõjutab ka sinna viiva vasefooliumi paksus ja laius ning antud ühendus on kõigil neljal trükkplaadi kihil, moodustub ühendusest keeruline maatriks, mida eraldi ei arvutata, kuid arvestatakse, et realses lahenduse mängib see rolli. Seega on reaalset muundurit ja arvutusi võrreldes komponentide temperatuurid tõenäoliselt madalamad. Lisaks sellele ei ole arvesse võetud ka süsteemi termilist inertsit, mis realsel muunduril põhjustab viite kuumenemisel ja jahtumisel.

Arvutused tehakse vormelil olukorras, kus soojuskadu on kõige suurem, ehk 18 A väljundkoormuse ja 37,5 V sisendpinge juures. Transistorite Q1 ja Q2 summaarseks soojuskaoks võetakse 2,94 W ning Q3 kaoks 0,74 W. Induktori vase kadu on antud olukorras 0,74 W. Induktori vase kao juures eeldatakse, selle võrdset jaotumist kahe ühendusklemmi vahel, ehk 0,37 W klemmi kohta. Keskkonna temperatuuriks on valitud 60 °C, mis on akupaki maksimaalne võimalik temperatuur. Maksimaalseks lubatavaks kristalli temperatuuriks on valitud 90 °C, ehk lubatud on 30 °C temperatuuri tõus. Joonis

3.3 on jahutussüsteemi põhimõtteline skeem. Skeemi põhjal saab koostada kristallist radiaatorisse termilise takistuse valemi (3.1) [24].



Joonis 3.3 Soojuse juhtimine komponendilt läbi trükkplaadi radiaatorisse [25]

$$\left(\theta_{JC} + \frac{\theta_{via} \parallel \theta_{joodis}}{n} + \theta_{mask} + \theta_{radiaator} \right) \cdot P = (T_a - T_j) \quad (3.1)$$

Kus: θ_{JC} – termiline takistus transistori kristallist korpuse ühendusklemmini

θ_{via} – via termiline takistus

θ_{joodis} – via avas oleva joodise termiline takistus

n – via 'de koguarv

θ_{mask} – trükkplaadi jootemaski termiline takistus

$\theta_{radiaator}$ – radiaatori termiline takistus

P - soojusvõimsus

T_a – keskkonna temperatuur

T_j – kristalli temperatuur

Teades jootemaski ja jootetina termilise takistuse koefitsienti, saab arvutada nende termilise takistuse valemiga (3.2). Tabel 3.1 on vastavate arvutuste lähteandmed ja tulemused. Tabel 3.2 on välja toodud lülitustransistorite soojuse juhtimiseks kasutatavate elementide summaarsed termilised takistused ja sellest tulenev kristalli temperatuuri tõus.

$$\theta = \frac{L}{k \cdot A} \quad (3.2)$$

Kus: θ – termiline takistus
 L – materjali paksus
 k – termilise juhtivuse koefitsient
 A – materjali pindala

Tabel 3.1 Trükkplaadil esinevad termilised takistused

	A, [mm²]	L, [mm]	k, [mK/W]	θ, [°C/W]
Q1 ja Q2 polügoon	432,46	0,015	0,2	0,17
Q3 polügoon	262,31	0,015	0,2	0,29
via (0,3 mm ava)	-	-	-	153,90
joodis via avas (via ava 0,3 mm)	0,07	1,6	50	452,71

Tabel 3.2 Lülitustransistoritega seotud summaarsed termilised takistused

Transistorid	Soojus, P [W]	n	$\frac{\theta_{via} \parallel \theta_{solder}}{n}$, [°C/W]	θ_{Jc} , [°C/W]	θ_{mask} , [°C/W]	T_{Jr} , [°C]
Q1 ja Q2	2,94	55	2,09	0,4	0,17	7,82
Q3	0,74	25	4,59	0,8	0,29	4,20

Soojuse liikumisel läbi trükkplaadi tõuseb transistori kristalli temperatuur 7,82 °C võrra. Arvestades eesmärgiks seatud maksimaalset 30 °C temperatuuri tõusu, saab leida maksimaalse lubatud radiaatori termilise takistuse. Lubatud temperatuur radiaatoril on 22,18 °C. Radiaatori poolt hajutatav kogu soojusvõimsus on 4,39 W. Seega radiaatori termiline takistus on leitav valemiga (3.3). Sobiva radiaatori termiline takistus peab olema vähemalt 5,05 °C/W.

Transistorite ja induktori jahutamiseks on valitud radiaator ATS-54300R-C1-R0. Radiaatori mõõtmed on 30 x 30 x 19,5 mm. Tänu radiaatori kujule ja kleebitavale termopadjale on selle paigaldamine trükkplaadile lihtne [26]. Lisaks sellele on ka 30 x 30 mm mõõtudega jahutusventilaatorite valik hea. Tabel 3.333 selgub, et 3,3 °C/W termilise takistuse saavutamiseks peab olema õhukiirus 400 LFM. Ventilaatorite õhu vooluhulk on antud tavaliselt CFM ühikutes. Kasutades valemit (3.3) saab leida vajaliku ventilaatori õhu vooluhulga, milleks on 3,87 CFM. Jahutusventilaatoriks on valitud 12 V pingel juures töötav CUI ventilaator CFM-3010B-1130-373, mille õhu vooluhulgaks on 4,1 CFM [27]. Ehkki arvutuste järgi sobiks radiaator, mille termiline takistus on 5,05 °C/W, on valitud 3,3 °C/W radiaator arvestades arvutuslikest kadudest suuremaid kadusid.

Tabel 3.3 Radiaatori termiline takistus vastavalt õhu kiirusele

Thermal Performance

AIR VELOCITY		@200 LFM 1.0 M/S	@300 LFM 1.5 M/S	@400 LFM 2.0 M/S	@500 LFM 2.5 M/S	@600 LFM 3.0 M/S	@700 LFM 3.5 M/S	@800 LFM 4.0 M/S
THERMAL RESISTANCE	Unducted Flow	4.8 °C/W	3.9 °C/W	3.3 °C/W	3 °C/W	2.7 °C/W	2.6 °C/W	2.4 °C/W
	Ducted Flow	3.1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

$$LFM = \frac{CFM}{A} \rightarrow CFM = LFM \cdot A \quad (3.3)$$

Kus: *LFM* – õhu kiirus

CFM – õhu vooluhulk

A – pindala

4 Alalispingemuunduri ehitamine ja katsetamine

4.1 Alalispingemuunduri ehitamine

Alalispingemuunduri trükkplaat on tellitud firmast JLC PCB. Trükkplaadi jootmine toimub käsitsi. Arvestades, et trükkplaadil on jahutamise eesmärgil suured polügoonid, peab kasutama mitmeid erinevaid jootmistehnikaid. Esmalt eelsoojendatakse trükkplaat kuuma õhuga ning täidetakse jootekolvi abil komponente jahutavad *via*'d tinaga. Seejärel joodetakse sisendterminalid, sisendkondensaatorid ja induktor. Pärast seda kaetakse lülitustransistorite ja mikrokiibi ühendused tina ja räbustiga ning asetatakse vastavad komponendi oma kohtadele. Sellele järgneb jootmine kuuma õhuga. Kõik ülejäänud komponendid joodetakse trükkplaadile jootekolviga.

Joodetud trükkplaadil kontrollitakse radiaatori poolisel kihil *viade* tasapinda. *Viadest*, millest tina välja ulatub, eemaldatakse üleliigne joodis tinasuka abil. Seda seetõttu, et radiaatori kontaktpind trükkplaadiga peab olema võimalikult tasane ja ühtlane. Seejärel pestakse trükkplaat räbustist puhtaks, kasutades esmalt räbusti eemaldusvahendit ja seejärel isopropüüli. Antud samm on oluline, sest räbusti jäägid võivad kahjustada trükkplaati ning moonutada tundlikes analoogahelates signaale.

Pärast trükkplaadi puhastamist toimub selle esimene testimine. Esimesel testil trükkplaadi küljes radiaatorit veel ei ole. Seda seetõttu, et kui radiaator on kleebitud trükkplaadi pinnale ning testimisel ilmneb vigu, mis nõuavad jootmist, on viimane praktiliselt võimatu. Trükkplaadile kleebitud radiaatori eemaldamine on keeruline ning muudab radiaatori liimitava termopadja kasutuskõlbmatuks. Esimene katse toimub madala võimsusega toiteploki. Toiteploki seadistatakse ka voolu piiraja, et vältida muunduri rikke korral suuri kahjustusi.



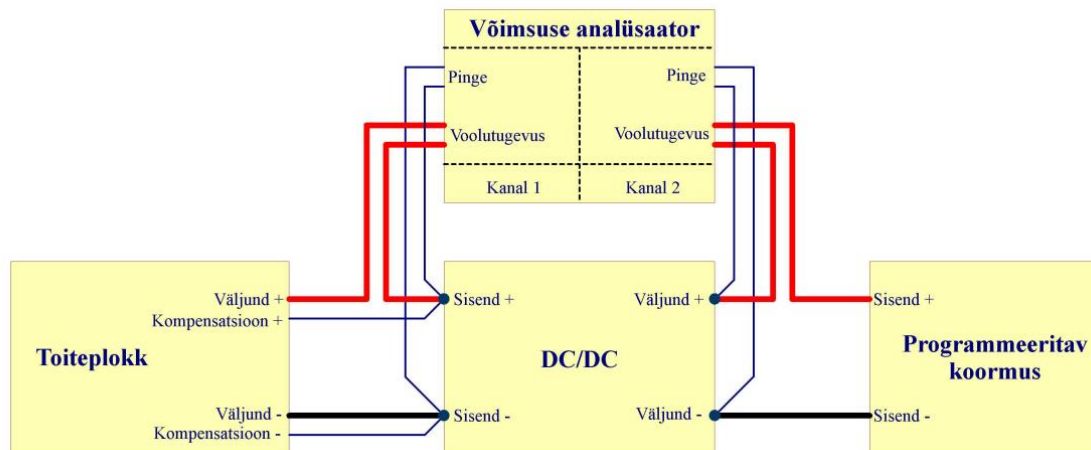
Joonis 4.1 Joodetud FEST22 alalispingemuundur

4.2 Alalispingemuunduri efektiivsuse mõõtmine

Muunduri efektiivsuse mõõtmised on teostatud TTÜ jõuelektroonika laboris. Efektiivsuse mõõtmiseks on kasutatud kolme seadet, mille andmed on Tabel 4.1. Mõõtmiseks kasutatav seadmete ühendusskeem on Joonis 4.2. Võttes arvesse laboriseadmete küljes olevaid pikkasid juhtmeid ning katses esinevaid suuri voole on oluline arvesse võtta juhtmetel ja ühendustel tekkivaid pingelange. Seetõttu on toiteploki konstantse väljundpinge saavutamiseks kasutusel Kelvini ühendus, mille abil toiteplokk kompenseerib automaatselt toitejuhtmetel tekkiva pingelangu. Ka võimsuse analüsaatori pinge mõõtmise sisendid on muunduri külge ühendatud kasutades Kelvini põhimõtet. Tänu sellele ei ole mõõtetulemuste hulgas lisaks muunduri kadudele ka juhtmete ja ühenduste kadusid.

Tabel 4.1 Efektiivsuse testil kasutatavad seadmed

Seade	Tootja	Mudel
Toiteplokk	EA-PSI	9080-60
Programmeeritav koormus	Chroma	63204
Võimsuse analüsaator	YOKOGAWA	WT1800

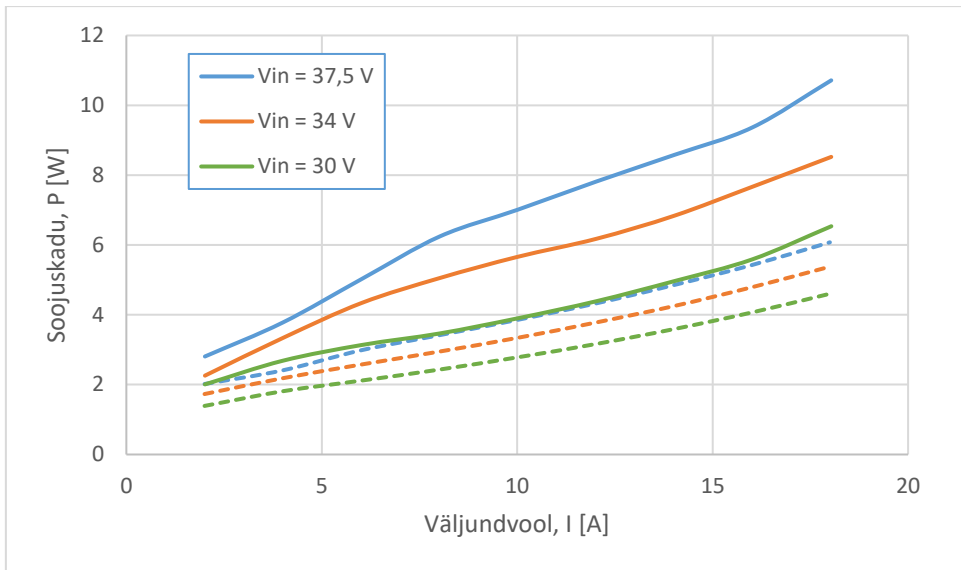


Joonis 4.2 Seadmete ühendusskeem efektiivsuse mõõtmisel

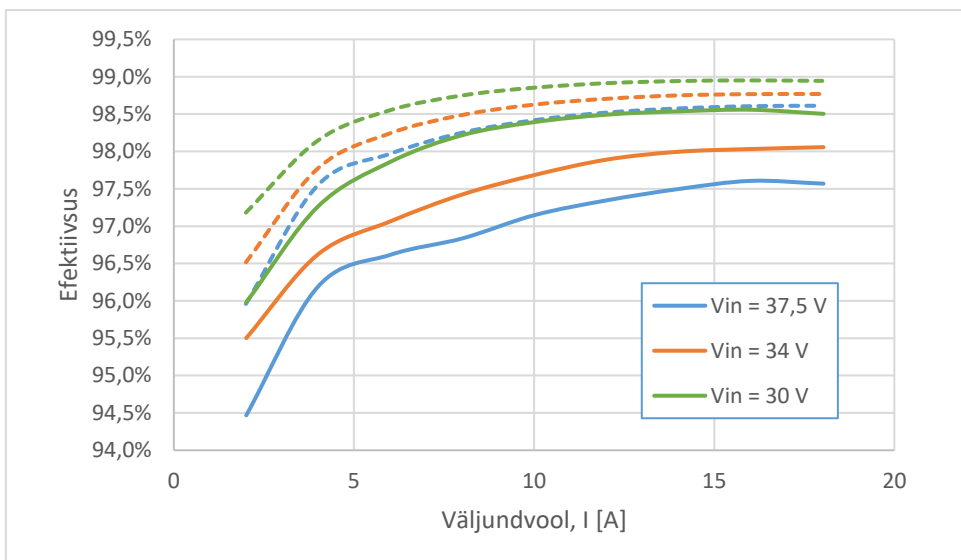
Kadude ja Efektiivsuse mõõtmine toimub kolme erineva sisendpinge juures, milleks on 30 V, 34 V ja 37,5 V. Antud pinged on valitud lähtuvalt vormelis esinevatest pingetest, kus 37,5 V on muunduri maksimaalne võimalik sisendpinge, 30 V on minimaalne võimalik sisendpinge ning 34 V on ligilähedaselt maksimaalse ja minimaalse pinge keskmine. Voolu mõõtmine toimub üheksa sammuna alustades 2 A ja lõpetades 18 A, tõstes iga sammuga voolu 2 A võrra. Iga koormusastme juures hoitakse muundurit üks

minut, et efektiivsuses kajastuks ka komponentide soojenemisest tulenev parameetrite muutumine. Muunduri sisend- ja väljundparameetreid logitakse iga viie sekundi järel. Kadude hulka ei ole arvestatud ventilaatori kadu, sest ventilaator ei rakendu iga koormusastme juures. Ventilaatori täpne rakendumise punkt sõltub muunduri väljundvoolust, sisendpingest ja keskkonna temperatuurist. Seetõttu ei kajastu ventilaatori kadu muunduri kadude graafikul, kuid muundurit kasutades peab arvesse võtma, et ventilaatori rakendumisel kasvab sisendvõimsus 1,25 W võrra. Muundur peab taluma ka lühiajaliselt 480 W väljundvõimsust. Seetõttu koormatakse eelmainitud kolme sisendpinge juures muunduri väljundit 20 A vooluga kümneks sekundiks.

Joonis 4.33 on välja toodud mõõdetud muunduri kaod ja arvutuslikud kaod. Joonis 4.44 on välja toodud mõõdetud muunduri efektiivsused ja arvutuslikud efektiivsused. Kõigi kolme sisendpinge juures on arvutuslikud ja mõõdetud kaod erinevad. Suurim erinevus esineb 37,5 V sisendpinge juures, kus keskmine mõõtetulemuste ja arvutuste erinevus on 52 % ja suurim erinevus on 59 %. 34 V sisendpinge juures on keskmine tulemuste erinevus 46 % ja 30 V sisendpinge juures 35 %. Võrdlemisi suur erinevus mõõtetulemuste ja arvutustulemuste vahel on põhjendatav mitmete asjaoludega. Väljatransistori kuumenedes selle R_{ds} kasvab. Tulemuste põhjal võib eeldada, et webench seda arvutustes arvesse ei võta, mis on ka arusaadav, sest transistori temperatuur sõltub suure osas trükkplaadi ja jahutussüsteemi füüsilisest disainist. Ka lülituskadude täpne arvutamine on keeruline ning sõltub mitmetest erinevatest parameetritest, sealhulgas transistori parameetritest, draiveri parameetritest ja füüsilisest trükkplaadi disainist. Alumise lülitusõla transistori lülituskadod sõltuvad peamiselt sellega paralleelselt asuva diodi parameetritest. Kadusid diodil põhjustavad nii selle päripingelang, kui ka diodi ümberlülitus laeng. Kehvade diodi parameetrite korral võivad kaod diodil olla domineerivad.



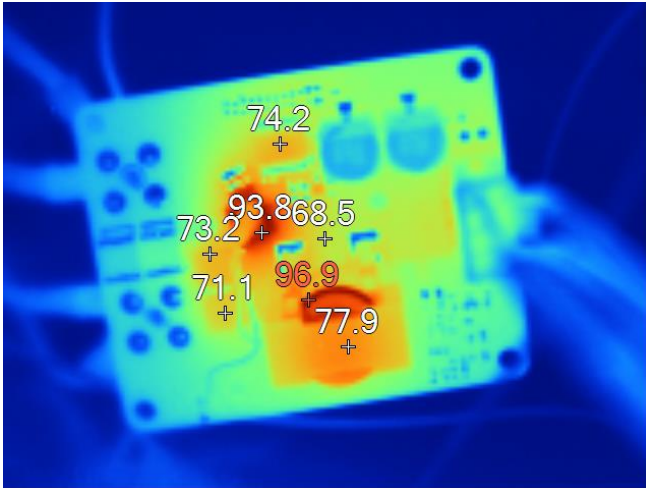
Joonis 4.3 Arvutuslike ja mõõdetud soojuskadude võrdlus. Katkendjoonega on arvutuslikud, pidevjoonega on mõõtetulemused.



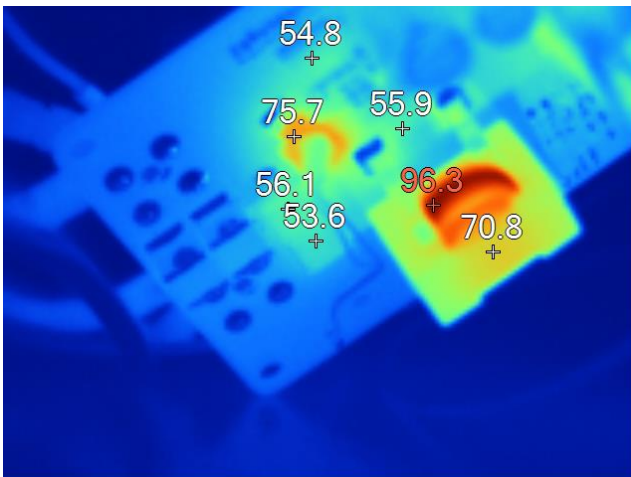
Joonis 4.4 Arvutuslike ja mõõdetud efektiivsuste võrdlus. Katkendjoonega on arvutuslikud, pidevjoonega on mõõtetulemused.

Selleks, et hinnata skeemi komponentidel olevate kadude reaalselt magnituudi ning komponentide töötemperatuure, on trükkplaati vaadeldud termokaameraga. Termokaamera kasutamisel on oluline silmas pidada, et antud mõõtevahendi mõõteviga on võrdlemisi suur, ulatudes mitmete kraadideni. Sellest tulenevalt ei ole saadud temperatuurid absoluutsed väärtused, vaid võrreldavad vastavate piltide vahel, millel kõigil on sama mõõteviga. Vaatlemine toimub olukorras, kus on kõige suuremad kaod, et tuvastada komponentide kõrgeimad temperatuurid. Vaatlemis hetkel on muunduri sisendpinge 37,5 V ning väljundvool 18 A. Trükkplaadist tehakse kaks pilti. Esimene pilt

tehakse hetkel, kui termolüliti käivitab jahutusventilaatori, mis on näha Joonis 4.5. Teine pilt tehakse vahetult pärast jahutusventilaatori seiskumist, mis on näha Joonis 4.6. Kaameraga vaadeldakse trükkplaadi alumist poolt, sest seal asuvad kõik põhilised komponendid. Mõõdetavate komponentide loetelu ja mõõdetud temperatuurid vastavates olukordades on kokkuvõtvalt välja toodud Tabel 4.2.



Joonis 4.5 Komponentide temperatuurid jahutusventilaatori käivitumisel



Joonis 4.6 Komponentide temperatuurid vahetult pärast ventilaatori seiskumist

Tabel 4.2 Põhiliste komponentide temperatuurid jahutusventilaatori käivitamisel ja seiskamisel

Mõõdetavad detailid	T, [°C]	
	Ventilaatori käivitumise hetkel	Ventilaatori seiskumise hetkel
Q1	71,7	53,6
Q2	73,2	56,1
Q3	93,8	75,7
LM25116	74,2	54,8
Induktori südamik	77,9	70,8
Induktori mähis	96,9	96,3
Polügoon	68,5	55,9

Tulemustest selgub, et transistorite Q1 ja Q2, mikrokiibi LM25116 ning polügooni temperatuurid on ootuspärased, olles jahutusventilaatori töö lõpus ligikaudu 30 °C ruumi temperatuurist kõrgemad. Induktori ning transistori Q3 temperatuurid on aga eeldatavast kõrgemad. Arvutuste põhjal on soojuskadu transistoril Q3 0,74 W. Mõõdetud temperatuuri põhjal võib aga öelda, et reaalne kadu on kordades suurem. Tõenäoliselt on eeldatavast suurema soojuskao põhjuseks transistori korpuses asuv parasiitdiodid, mille päripingelang ning ümberlülitus laeng põhjustavad lisa kadusid. Probleemi lahendamiseks on mitmeid võimalusi. Transistor Q3 tuleks asendada transistoriga, mille diodi parameetrid on CSD18540Q5B parameetritest paremad. Teiseks võimaluseks on ühendada Q3 paralleelselt eraldiseisev diod, mis avaneb enne transistori korpuses olevat diodi ning mille parameetrid on paremad. Kolmandaks võimaluseks on optimeerida jahutussüsteemi, et saavutada läbi jahutamise transistori madalam töötemperatuur.

Termokaamera mõõtetulemustest selgus, et kõige kõrgema temperatuuriga komponent on induktor L1. Ventilaatori käivitumise hetkel on südamiku temperatuur 77,9 °C ja mähise kuumima punkti temperatuur 96,9 °C. Seejuures jahutussüsteem induktori temperatuuri oluliselt ei mõjuta, sest otsene jahutav toime induktorile puudub. Induktori õhkjahutuse efekti katsetamiseks paigutati juba kasutusel oleva ventilaator otse induktori peale puhuma. See langetas induktori südamiku temperatuuri 28 °C ning mähise kuumima punkti temperatuuri 24 °C. Seega tuleks induktor paigaldada trükkplaadi pealmisele poolele jahutusradiaatori ette, et ventilaatorist puhutav õhk ka induktorit jahutaks.

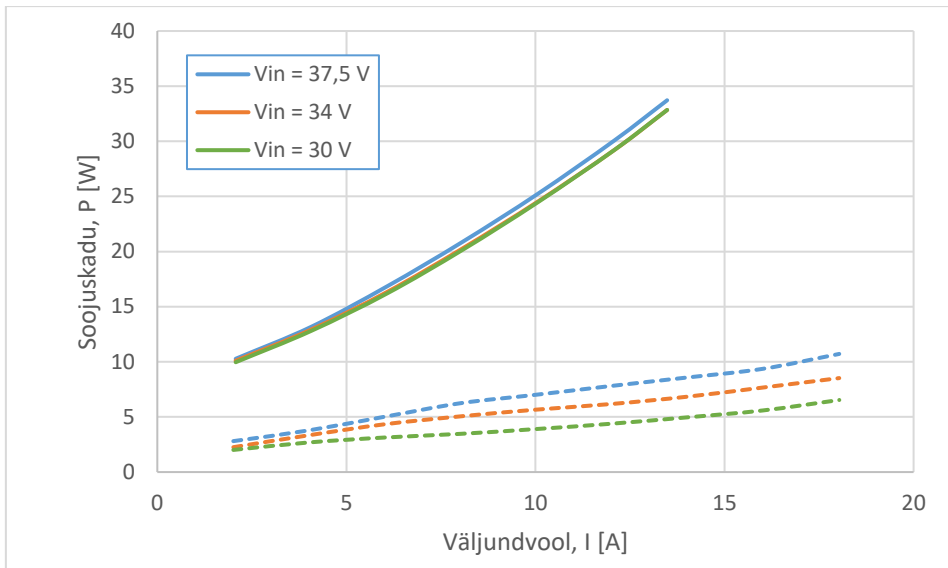
4.3 FEST22 alalispingemuunduri võrdlus FEST21 muunduriga

FEST21 ja FEST22 alalispingemuundurite peamiste parameetrite kokkuvõte on Tabel 4.3. Tabelist selgub, et FEST22 muundur täidab kõiki sellele seatud eesmäärke, seejuures on saavutatud näitajad eesmärkidest paremad. FEST22 muundur on võrreldes FEST21 muunduriga 2,7 korda kergem ning 3,6 korda väiksema ruumalaga. FEST22 muunduri võimsustihedus on FEST21 muundurist 2,5 korda suurem. Nimikoormuse 362 W juures saavutatav efektiivsus 37,5 V sisendpinge korral on 97,5 %, mis on püstitatud eesmärgist 2,5 % võrra kõrgem.

Tabel 4.3 FEST21 ja FEST22 alalispingemuundurite parameetrid

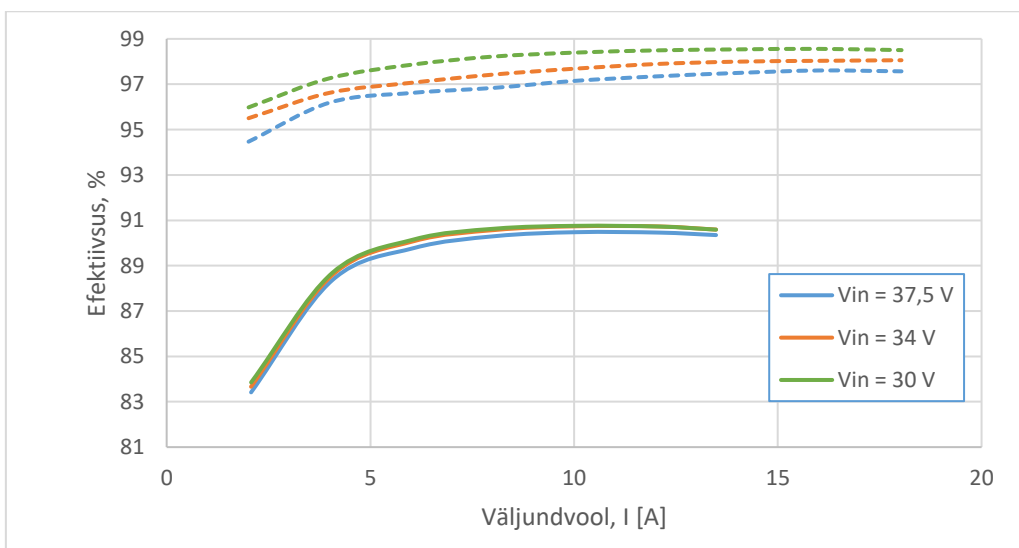
Parameeter	Muundur	
	FEST21	FEST22
Väljundvõimsus, P [W]	640	432
Ruumala, V [cm ³]	142	39
Trükkplaadi pindala, A [cm ²]	72	28
Võimsustihedus, [W/cm ³]	4	11
Mass, m [g]	164	60
Efektiivsus	90,5%	97,5%

Joonis 4.7 on näha FEST21 ühe mooduli soojuskadu ning FEST22 muunduri soojuskadu. 2 A koormuse juures on FEST22 ja FEST21 muundurite soojuskao erinevus 3,66 kordne ja FEST21 muunduri maksimaalse väljundvoolu 13,4 A juures 4 kordne. FEST21 kasutab kahte alalispingemuundurit, mille kumbagi väljundvool on 13,4 A ning moodulite summaarne väljundvool on 26,8 A. FEST22 muunduri maksimaalne väljundvool on 18 A. Tänu sellele piisab kogu vormeli elektroonika toitmiseks ainult ühest muundurist.



Joonis 4.7 FEST21 ja FEST22 alalispingemuundurite soojuskadude võrdlus. FEST21 tulemused on pidevjoonega, FEST22 tulemused on katkendjoonega.

Joonis 4.8 on on näha FEST21 ühe mooduli efektiivsus ning FEST22 muunduri efektiivsus. Jooniselt selgub, et 2 A koormuse juures on muundurite efektiivsuse keskmine erinevus 11,6 % ning 12 A koormuse juures on erinevus 7,3 %. Lisaks sellele selgub, et FEST22 muunduril on madala ning suure koormuse juures efektiivsuse erinevus väiksem kui FEST21 muunduril. Võrreldes keskmist efektiivsuse muutust 2 A koormuse ja 12 A koormuse juures, siis FEST22 muunduril on erinevus 2,7 %, kuid FEST21 muunduril on efektiivsuse muutus 7 %.



Joonis 4.8 FEST21 ja FEST22 alalispingemuundurite efektiivsuste võrdlus. FEST21 tulemused on pidevjoonena, FEST22 tulemused on katkendjoonena.

FEST21 vormeli 24 V süsteemi nominaalkoormus on 412 W. Antud koormuse juures on madalpingemuunduri võimsusekadu 44,21 W. FEST22 vormeli 24 V süsteemi nominaalkoormus on 362 W. Antud koormuse juures on 37,5 V sisendpinge korral muunduri kaod 9 W ning minimaalse 30 V sisendpinge korral 5,3 W. Võrreldes FEST21 alalispingemuunduriga on FEST22 muunduri kaod 5 – 8 korda väiksemad. Tänu FEST22 muunduri väikestele mõõtmetele on antud auto akupaki elektroonikasektsioon võrreldes FEST21 autoga 30 mm võrra lühem, lisaks sellele on elektroonika sektsiooni süsteemide paigutus võrreldes varasemaga kompaktsem. FEST22 muunduri väiksema massi arvelt on akupaki kaal 103 g võrra väiksem.

4.4 Tuleviku arendused

FEST22 alalispingemuundur täitis kõik sellele püstitatud eesmärgid. Siiski on võimalik antud muundurit veel paremaks arendada. Järgmises muunduri revisioonis tuleks induktor paigaldada jahutusradiaatori ette, et ventilaatorist puhutav õhk ka induktorit jahutaks, saavutades südamikujahutuse ja mähise madalam temperatuur. Transistor Q3 tuleks asendada transistoriga, mille diodi parameetrid on paremad või kasutada ka eraldiseisvat diodi. Ülemise lülitusõla transistorite kadude hulgas domineerivad lülituskadud. Lülituskadusid saaks optimeerida, kasutades väiksemate parasiitlaengutega transistoreid. Jahutusradiaator ja ventilaator annavad alalispingemuundurile 30 mm kõrgust. Trükkplaadi pindala saaks väiksemaks paigutades LM25116 koos passiivkomponentidega eraldiseisvale trükkplaadile, mis kinnituks peamise trükkplaadi külge vertikaalselt. Nii saaks jahutussüsteemist tuleneva kõrguse optimaalselt ära kasutada. Ka jahutussüsteemi on võimalik väiksemaks optimeerida, kasutades näiteks mitmefaasilist *buck* muundurit, kus soojuskadud jaguneks suurema hulga komponentide vahel ning jahutava toime vajaduse oleks tänu sellele väiksem.

KOKKUVÕTE

Antud lõputöö eesmärgiks oli arendada FEST22 tudengivormelile alalispingemuundur. Alalispingemuunduri arendamise eesmärgiks oli saavutada efektiivsem ning väiksemate mõõtmetega muundur, kui on varasematel aastatel kasutatud. Lõputöö koosneb neljast osast. Esimeses osas antakse ülevaade teoreetilisest taustas, teises osas projekteeritakse muundur, kolmandas osas disainitakse muundurile trükkplaat ning teostatakse jahutussüsteemi arvutused, neljandas osas toimub muunduri efektiivsuse mõõtmine ja saadud tulemuste analüüs ning võrdlus FEST21 muunduriga.

Lõputöö esimeses osas antakse ülevaade Tudengivormeli võistlussarjast ja punktisüsteemist. Lisaks sellele kirjeldatakse alalispingemuundurile rakenduvaid tehnilisi ja võistlussarja reeglitest tulenevaid piiranguid. Seejärel kirjeldatakse lühidalt FEST21 vormeli elektrisüsteemi ning alalispingemuunduri tööpõhimõtet.

Töö teises osas projekteeritakse FEST22 autole alalispingemuundur. Esmalt vaadeldakse FEST22 alalispingemuunduri töötingimusi ning seatakse selle disainile lähteparameetrid kooskõlas FEST21 alalispingemuunduriga. Seejärel valitakse muundurile sobiv topoloogia ning muundurit juhtiv mikroskeem. Mikroskeemi valikule järgneb muunduri erinevate tööparameetrite määramine ning muunduri tööd toetavate aktiiv- ja passivkomponentide valik ning arvutamine. Teise osa lõpus leitakse erinevate disainivahendite abil muunduri arvutuslik efektiivsus ning soojuskadu.

Töö kolmandas osas disainitakse FEST22 alalispingemuundurile trükkplaat. Trükkplaadi disainil lähtutakse *buck* muunduri eripäradest ning jahutussüsteemi poolt seatavatest kitsendustest. Analüüsitakse peamiste komponentide paigutust trükkplaadil ning paigutuse põhjuseid. Trükkplaadi disainiga paralleelselt teostatakse jahutussüsteemi arvutused. Arvutustes kasutatakse töö teise osa lõpus leitud soojuskadusid. Jahutussüsteemi arvutuste käigus valitakse muundurile sobiv jahutusradiaator ning ventilaator.

Töö neljandas osas kirjeldatakse FEST22 muunduri valmistamist ja testimist. Esmalt antakse ülevaade alalispingemuunduri koostamise protsessist. Seejärel mõõdetakse valmistatud muunduri efektiivsus ning võrreldakse saadud tulemusi teise peatüki arvutuslike tulemustega. Efektiivsuse mõõtmisele järgneb muunduri vaatlus termokaameraga maksimaalkoormusel ja saadud mõõtetulemuste analüüs. Seejärel võrreldakse omavahel FEST22 ja FEST21 parameetreid.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „HISTORY OF FORMULA STUDENT," IMECHE, kuupäev puudub. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.imeche.org/events/formula-student/about-formula-student/history-of-formula-student>. [Kasutatud 02 02 2022].
- [2] „Formula Student Rules 2020," FSG, 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FSRules_2020_V1.0.pdf. [Kasutatud 02 02 2022].
- [3] „60 aastat Eesti vormelautot," Formula Student Team Tallinn, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: 60 aastat Eesti vormelautot – FS Team Tallinn (formulastudent.ee). [Kasutatud 02 02 2022].
- [4] „BCM® in a VIA™ Package Bus Converter BCM4414xG0F4440yzz," Vicor, 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.mouser.ee/datasheet/2/685/ds_BCM4414xG0F4440yzz-1129834.pdf. [Kasutatud 02 02 2022].
- [5] „DCM™ DC-DC Converter Isolated DCM3623x50M26C2yzz," Vicor, 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.mouser.ee/datasheet/2/685/DCM3623x50M26C2yzz_ds-1101581.pdf. [Kasutatud 10 02 2022].
- [6] P. Scherz, Practical Electronics for Inventors, New York: McGraw-Hill Education, 2016.
- [7] A. I. Pressman, Switching Power Supply Design, New York: McGraw-Hill, 2009.
- [8] M. Brown, Power Supply Cookbook, Boston: Newens, 2001.
- [9] WEBENCH® POWER DESIGNER, TI, 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator>. [Kasutatud 10 03 2022].
- [10] „LM25116 Wide-Range Synchronous Buck Controller," TI, 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm25116.pdf?ts=1648961596219>. [Kasutatud 05 02 2022].
- [11] DC-DC Optimizer, Coilcraft, 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.coilcraft.com/en-us/tools/dc-dc-optimizer/#/search>. [Kasutatud 12 03 2022].

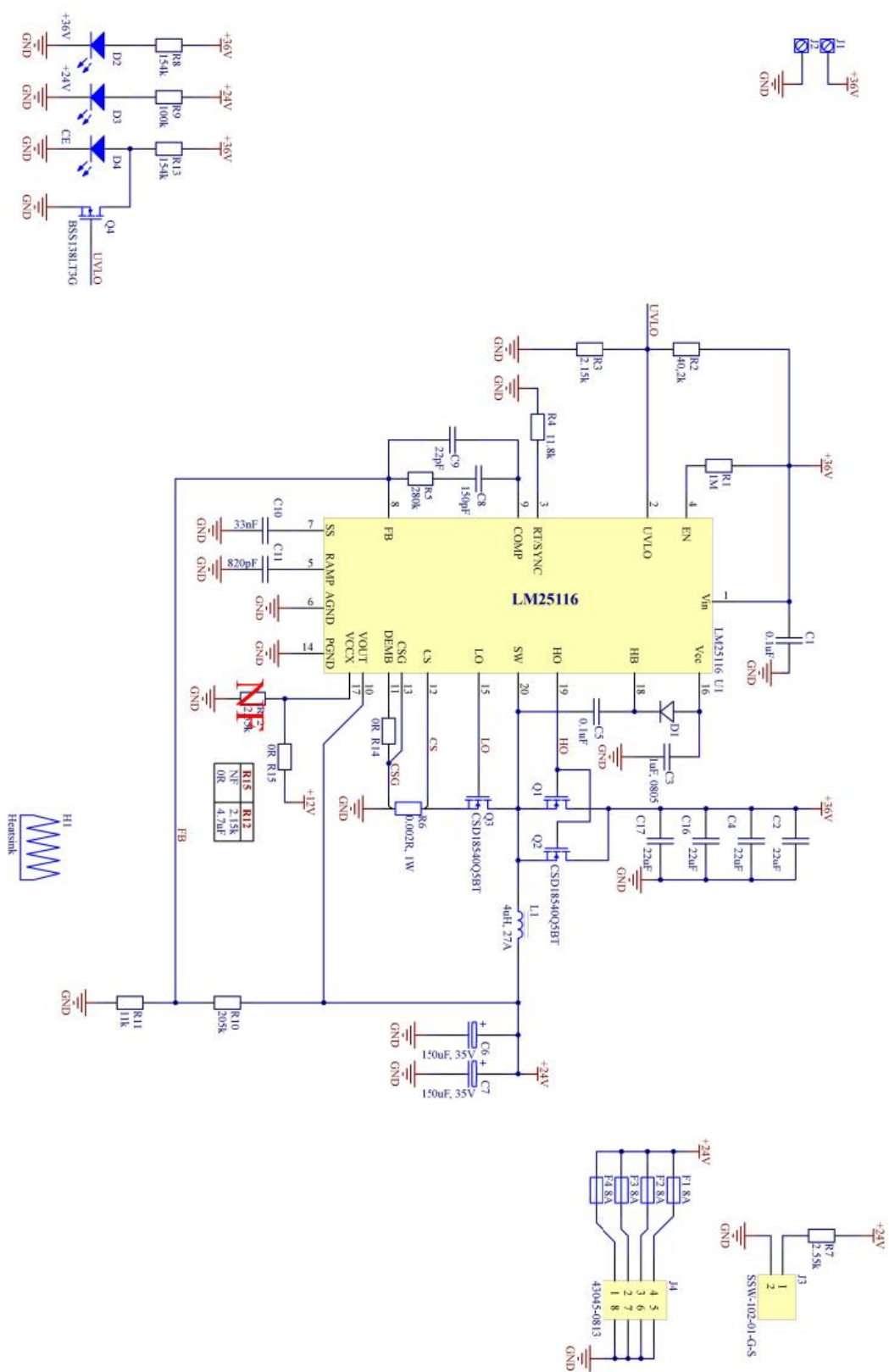
- [12] „Common Mistakes in DC/DC Converters and How to Fix Them," TI, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ti.com/seclit/ml/slup384/slup384.pdf>. [Kasutatud 20 03 2022].
- [13] „How to select input capacitors for a buck converter," TI, 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.ti.com/lit/an/slyt670/slyt670.pdf?ts=1649137584559&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.si%252F. [Kasutatud 10 03 2022].
- [14] „VCC: Capacitance Change vs Voltage in Ceramic Capacitors," KEMET, kuupäev puudub. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.digikey.com/Site/Global/Layouts/DownloadPdf.ashx?pdfUrl=863968494F2E4E13BBEA65B55A358443>. [Kasutatud 15 03 2022].
- [15] K-SIM 3.0.7 Capacitor Simulation, KEMET, 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ksim3.kemet.com/capacitor-simulation>. [Kasutatud 10 03 2022].
- [16] „Using Current Sense Resistors for Accurate Current Measurement," Bourns, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.bourns.com/docs/technical-documents/technical-library/current-sense-pulse-power-high-power-resistors/application-notes/bourns_n1702_current_sense_accurate_measurement_appnote.pdf. [Kasutatud 12 03 2022].
- [17] „An Accurate Approach for Calculating the Efficiency of a Synchronous Buck Converter Using the MOSFET Plateau Voltage," TI, 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.ti.com/lit/an/slvaeq9/slvaeq9.pdf?ts=1649166105481&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Kasutatud 10 03 2022].
- [18] G. Lakkas, „MOSFET power losses and how they affect power-supply efficiency," 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.ti.com/lit/an/slyt664/slyt664.pdf?ts=1649430801874&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Kasutatud 10 03 2022].
- [19] „Loop Stability Analysis of Voltage Mode Buck Regulator With Different Output Capacitor Types – Continuous and Discontinuous Modes," TI, 2008. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.ti.com/lit/an/slva301/slva301.pdf?ts=1649595769894&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Kasutatud 12 03 2022].
- [20] „746 500 73R," WÜRTH ELEKTRONIK, 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.farnell.com/cad/2267224.pdf>. [Kasutatud 05 03 2022].

- [21] „43045-0813", MOLEX, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<https://www.farnell.com/datasheets/2696410.pdf>. [Kasutatud 05 03 2022].
- [22] „LT Q39G", OSRAM, 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-5178036/LT%20Q39G_EN.pdf. [Kasutatud 01 03 2022].
- [23] „Reduce buck-converter EMI and voltage stress by minimizing inductive parasitics," TI, 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
https://www.ti.com/lit/an/slyt682/slyt682.pdf?ts=1649279337579&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Kasutatud 20 03 2022].
- [24] „Optimizing PCB Thermal Performance for XLamp® LEDs," CREE LED, 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://cree-led.com/media/documents/XLamp_PCB_Thermal.pdf. [Kasutatud 19 03 2022].
- [25] „AN-2020 Thermal Design By Insight, Not Hindsight," TI, 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
https://www.ti.com/lit/an/snva419c/snva419c.pdf?ts=1649612784897&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Kasutatud 22 03 2022].
- [26] „BGA Heat Sink - High Performance Straight Fin w/Thermal Tape," ATS, 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/596/TS-54300R-C1-R0-1487795.pdf>. [Kasutatud 24 03 2022].
- [27] „CFM-30B Series Datasheet - Axial Fans," CUI DEVICES, 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.mouser.ee/datasheet/2/670/cfm_30b-1842515.pdf. [Kasutatud 24 03 2022].

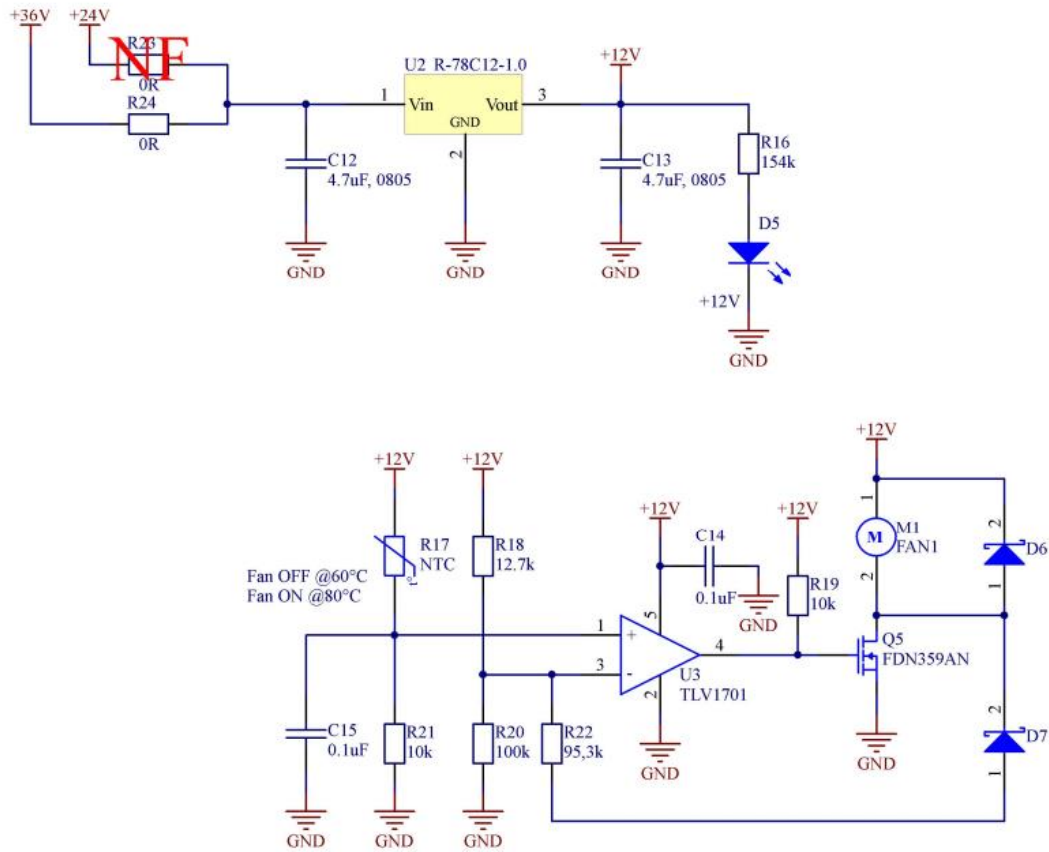
Lisa 1: Alalispingemuunduri FEST22 24 V ahela tarbijad

FEST22 24 V ahela tarbijad	
Süsteem	Tarbitav võimsus , W
TSAL	4,6
AMS	1,7
ECU	1,1
RMS	1
Dash	1,4
GSS arvuti	10
Beacon	0,5
BSPD	0,5
IMD	1,2
Inverter	47,6
Sensorika	1
Indikaatorid	1
Telemetria	3
Raadioside	1
IMU	1
Datalogger	1,2
Pidurituli	1
GSS valgustus	2,9
Akupaki ventilaator 1	65
Akupaki ventilaator 2	65
Radiaatori ventilaator 1	65
Radiaatori ventilaator 2	65
Veepump	20
Kokku	362

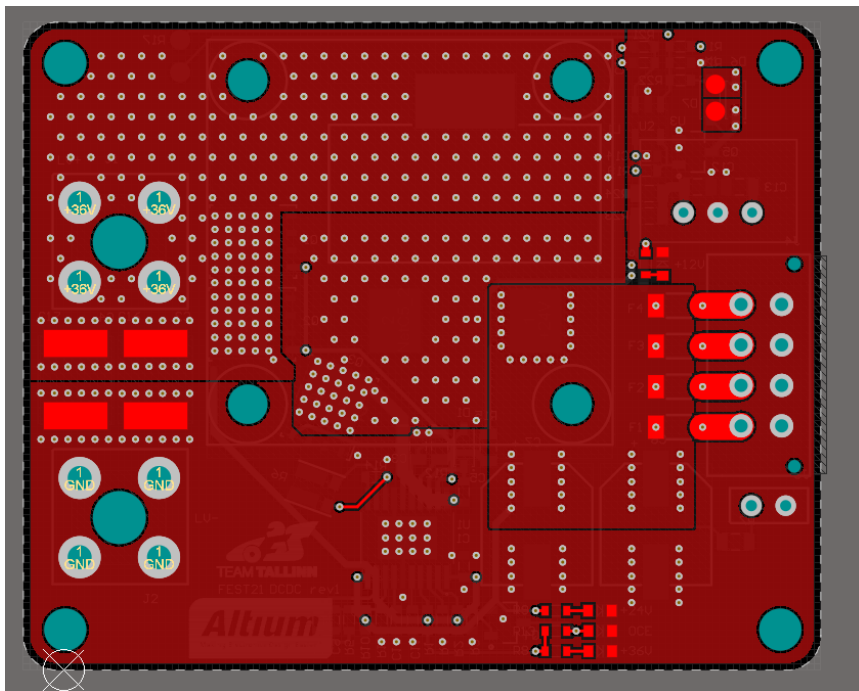
Lisa 2: Alalispingemuunduri FEST22 skeem



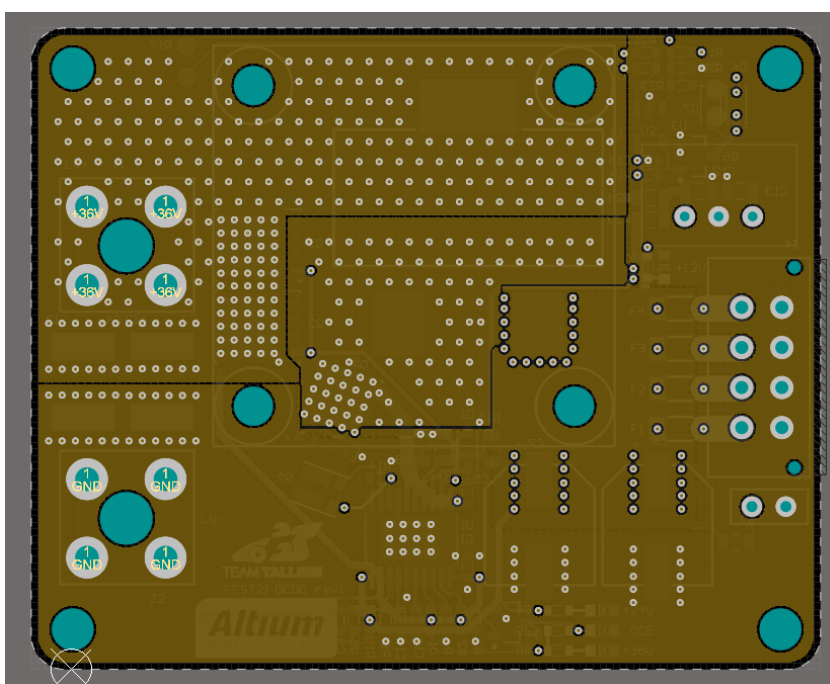
Lisa 3: Alalispingemuunduri FEST22 jahutusventilaatori termolüliti skeem



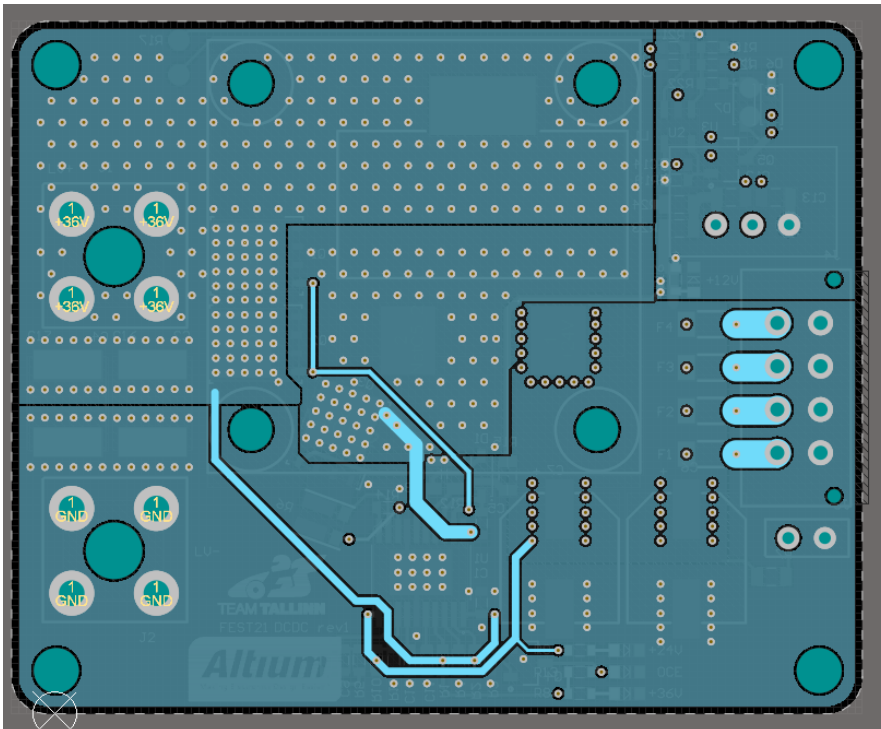
Lisa 4: FEST22 alalispingemuunduri trükkplaadi pealmine kiht



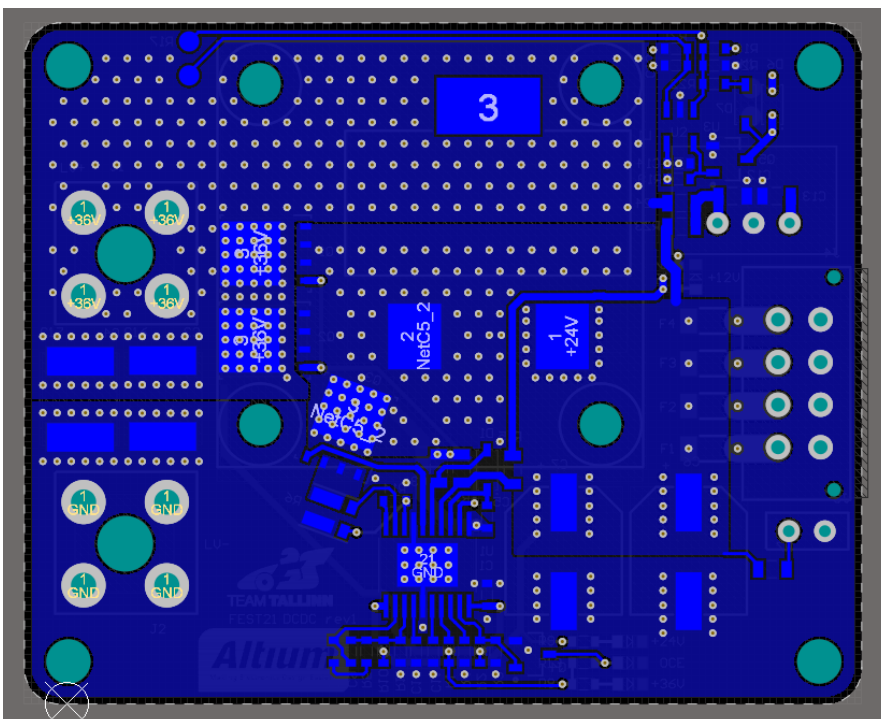
Lisa 5: FEST22 alalispingemuunduri trükkplaadi esimene kiht



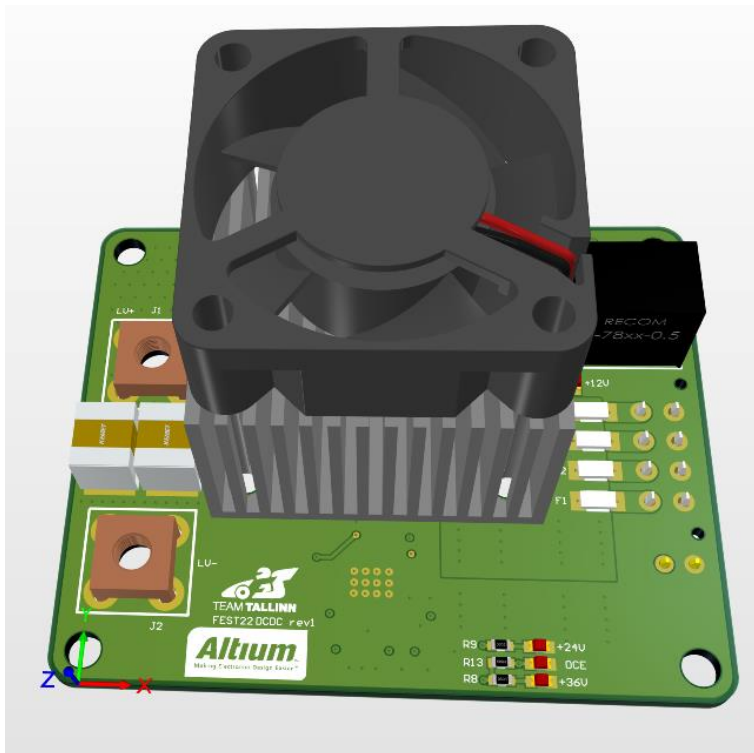
Lisa 6: FEST22 alalispingemuunduri trükkplaadi teine kiht



Lisa 7: FEST22 alalispingemuunduri trükkplaadi alumine kiht



Lisa 8: FEST22 alalispingemuunduri 3D mudeli pealtpoolt vaade



Lisa 9: FEST22 alalispingemuunduri 3D mudeli altpoolt vaade

