



Artur Lindegren

TUDENGIVOREMELI FEST 23 ALALISPINGEMUUNDUR

LÕPUTÖÖ

Tehnikainstituut
Robotitehnika õppekava

Tallinn 2023

Autori deklaratsioon ja lihtlitsents

Mina, Artur Lindegren, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendajad Heljut Kalda ja Hans Anniste.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Artur Lindegren

sünnikuupäev: 22.10.1997

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Tudengivormeli FEST 23 alalispingemuundur

1. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
2. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas, allkirjastatud digitaalselt

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	4
1 MADALPINGE SÜSTEEMI ÜLESEHITUS.....	5
1.1 Süsteemi kirjeldus.....	5
1.2 Muutused võrreldes eelmise hooajaga.....	6
1.3 Ülesande püstitus.....	7
2 FEST 23 ALALISPINGEMUUNDURI PROJEKTEERIMINE	8
2.1 FEST 22 analüüs.....	8
2.2 Erinevate lahenduste uurimine	8
2.3 Teoreetilised arvutused ning nende hindamine	11
3 PROJEKTEERIMINE JA TESTIMINE	16
3.1 Trükkplaadi disain, komponentide paigutus.....	16
3.2 Tootmine ja testimine	18
3.3 Tulemuste analüüs ja hindamine	20
4 MAJANDUSLIK OSA	31
4.1 Ettevalmistavad tegevused	31
4.2 Tootearendus	31
4.3 Ostutoote ja isearendatud toote maksumuse võrdlus.....	32
KOKKUVÕTE.....	33
SUMMARY	34
VIIDATUD ALLIKAD.....	35
LISAD	38
Lisa 1. MCU skeem.....	39
Lisa 2. Sujuvkäivitusahela skeem	40
Lisa 3. Jõuahela trükkplaadi skeem.....	41

SISSEJUHATUS

Lõputöö käsitleb tudengivormeli võistlussarja vormelile projekteeritavat kaht alalispingemuundurit. Tudengivormeli võistlussarja eesmärk on ehitada aasta jooksul valmis võistlusvalmis vormel, mis aitab tudengitel praktiseerida projekteerimise ning tootmisoskusi [1]. Alalispingemuundur disainitakse vormelautole FEST 23 (*Formula Estonia*). Muunduri disainimine toimub ettevõttes MTÜ Tudengi Vormel [2].

Vormelauto ehitamisel arvestatakse FSG (*Formula Student Germany*) reegleid, mis määrab piirangud ja nõudmised vormeli ehitamisel [3]. Aastast 2013 on ehitatud EV (*electric vehicle*) klassi tüüpi vormeleid, mis töötavad elektrimootorite baasil. Sel hooajal ehitatakse esimest korda vormelauto, mis suudab võistelda nii EV kui ka DV (*driverless vehicle*) klassis. Otsus ehitada kaks klassi kokku tuleneb võistlussarja muudatustest. Seetõttu on meeskonnal võimalus võistlustel rohkem punkte koguda [3]. Kahe klassi kokkuehitamisel muutub ka vormeli madalpingesüsteem. Isejuhtiva süsteemi integreerimisega lisandub juurde erinevaid juhtimis- ja turvaahelaid, mis tõstab oluliselt madalpingesüsteemi tarbimist.

Lõputöö eesmärgiks on disainida vastavalt tudengivormeli FEST 23 uuenenud sisenditele kaks erineva võimsusega alalispingemuundurit. Seoses isejuhtiva süsteemi integreerimisega ning jahutuskomponentide tarbimise suurenemisega on vaja senisest suurema võimsusega muundureid. Samuti uurib autor, kuidas muuta alalispingemuundurit efektiivsemaks võrreldes eelmise hooaja muunduriga, parandab eelmise hooaja disainist tingitud vigu ning arendab välja plaadile juurde mikrokontrolleri, mille eesmärk on koguda infot jahutuse kohta ning selle läbi kontrollida jahutusventilaatorit.

Esimeses peatükis kirjeldab autor FEST 22 ning FEST 23 madalpingesüsteemide ülesehitust. Teises peatükis analüüsitakse eelmise hooaja FEST 22 alalispingemuundurit ning uuritakse erinevaid lahendusi, mis lahendaks eelmise hooaja probleeme. Lisaks arvutatakse välja muundurite arvutuslikud efektiivsused ning soojuskaod. Kolmandas peatükis kirjeldab autor projekteerimise, tootmise ning testimise protsesse. Viimases peatükis arvutab autor projekteerimiseks kulunud aja ning võrdleb ostutoote ning isearendatud toote hinda.

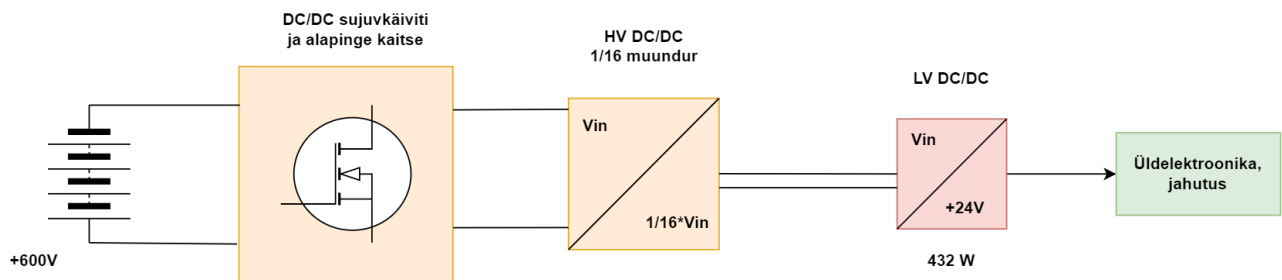
1 MADALPINGE SÜSTEEMI ÜLESEHITUS

1.1 Süsteemi kirjeldus

Võistlussarja reeglistik jagab elektroonika süsteemid kahte klassi: madalpingesüsteemid ja kõrgepinge süsteemid. Madalpingesüsteem on defineeritud järgmiselt: süsteemid, mis alalisvoolu puhul ei ületa 60 V ja vahelduvvoolu puhul väiksem kui 50 V RMS (*root mean square*) [3].

Tudengivormeli alalispingemuunduri süsteemi ülesehitus on kaheastmeline. Esimeses astmes kasutatakse ettevõtte Vicor poolt toodetud alalispingemuundurit BCM4414xG0F4440yzz, mis muudab akupakist tuleva kõrgepinge madalpingeks ning tagab kõrgepinge ja madalpinge süsteemi vahel galvaanilise eralduse. Muunduri väljundpinge on tühijooksul 1/16 sisendpingest [4].

Teise astmena kasutakse tudengivormeli poolt isearendatud *buck* tüüpi pingeregulaatorit. Muundur on ülesehitatud LM25116 *buck* muunduri kontrolleri põhjal, mille eelis on tema paindlikkus ja efektiivsus. Kontrolloriga on võimalik disainida erineva väljundvõimsusega ja sagedusega muundureid vastavalt sisendandmetele. Muunduri väljundpingeks on +24 V, sest suuremate tarbijate (mootorite kontrolleri, jahutusventilaatorid, veepump) nimipinge on +24 V [5]. Eelmisel hooajal oli madalpingesüsteemi väljundvõimsus 362 W, mistõttu otsustati disainida 432 W pingemuundur [6]. Muunduril on jäetud ka 70 W varu, et vajadusel saaks süsteemi mõne komponendi juurde integreerida. Eelmise hooaja FEST 22 toiteskeemi kujutab Joonis 1.



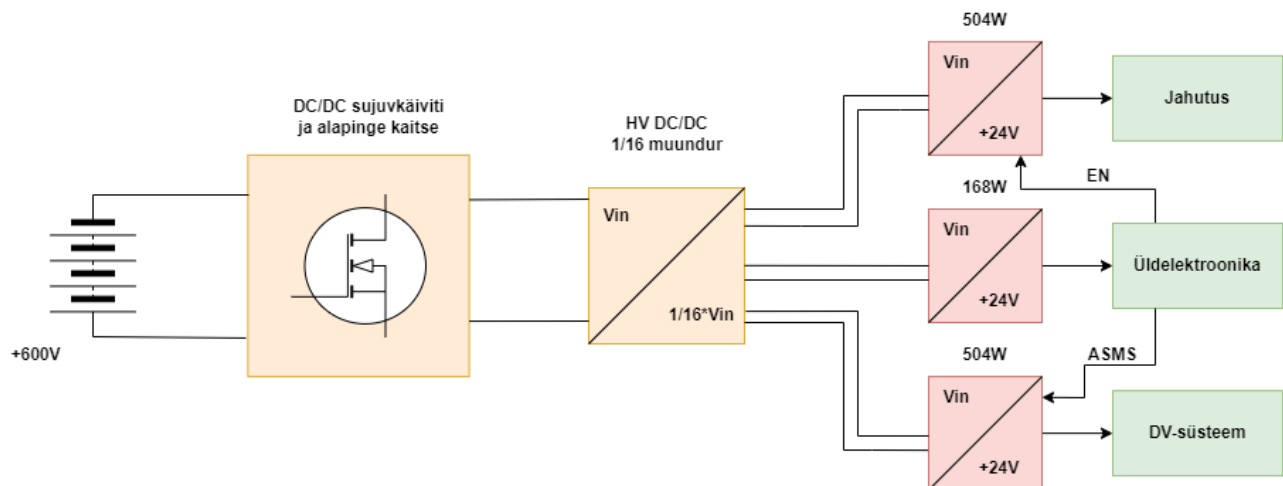
Joonis 1. FEST 22 toiteskeem

1.2 Muutused võrreldes eelmise hooajaga

Sel hooajal otsustati, et ehitatakse tudengivormel, mis on võimeline võistlema nii EV kui ka DV kategoorias. Samuti kasutatakse võimsamaid jahutusventilaatoreid ning veepumpa, mis tähendab, et tuleb disainida võimsam alalispingemuundur, kui FEST 22 muundur. Kui FEST 22 süsteemi nimivõimsus oli 362 W, siis FEST 23 nimivõimsus ulatub 879 W-ni.

Vormeli madalpinge süsteemi nimipinge on valitud +24 V ka sel aastal, sest kõige suuremad tarbijad (jahutusventilaatorid, kontrollid, veepump, DV arvuti, DV roolisüsteemi kontrollid ja mootor) töötavad sellise nimipingega.

Süsteemi disainimisel tuleb arvesse võtta ka fakti, et igal võistlusel DV-süsteemi ei kasutata, mistõttu on oluline, et süsteem oleks moodulehitusega. Akupakis peab samuti olema muundur, mis suudaks laadimise ajal toita laadimiseks vajalikke seadmeid. Samuti peab olema see võimalikult kompaktne, et akupaki elektroonika sektsiooni ära mahuks. Seetõttu tuli otsus disainida kaks eraldi muundurit: üks muundur, mis paikneb akupakis ja toidab loogika- ja turvaahelaid nii akupakis kui väljaspool akupaki, ning teine muundur, mis toidaks jahutusventilaatoreid ning veepumpa. Viimast muundurit sobib kasutada ka isejuhtiva süsteemi puhul. FEST 23 toitesüsteemi skeem on Joonis 2.



Joonis 2. FEST 23 toitesüsteemi skeem

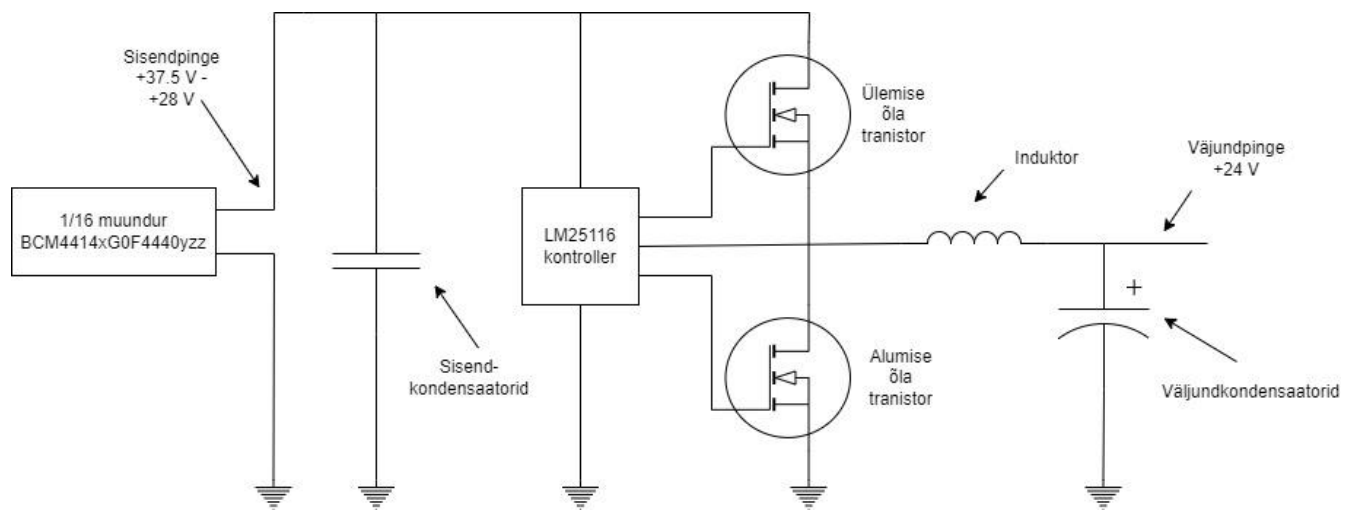
1.3 Ülesande püstitus

DV süsteemi rakendamisel ning suurenenud jahutuskomponentide võimsuse suurenemise tõttu arendab autor kaks erineva võimsusega alalispingemuundurit, et toita süsteemi, mille maksimum võimsus DV süsteemi puhul on 879 W ning EV süsteemi puhul 650 W. Samuti uurib autor võimalusi, kuidas parandada eelmise hooaja muunduri murekohti ning kuidas muundurit efektiivsemaks muuta. Lisaks sellele disainib autor muundurile kinnituva mooduli, et koguda kriitiliste komponentide temperatuuride andmeid.

2 FEST 23 ALALISPINGEMUUNDURI PROJEKTEERIMINE

2.1 FEST 22 analüüs

FEST 22 alalispingemuunduril esines erinevaid probleeme. Üheks probleemiks oli induktori südamikuga ja mähise kõrge temperatuur, mille tõttu on induktori küllastusvool väiksem kui madalamal temperatuuril. Muunduri alumise lülitusõla transistori põhiprobleemiks oli diodi kõrge ümberlülitus laeng, mis on alumises õlas üks suurimaid soojuskao tekitaja. Ülemises õlas domineeris lülituskadu. Kõrged lülituskadod olid tingitud transistori paisu kõrgest sisendmahtuvusest [6]. Samuti esines muunduril sageli probleem ventilaatorite käivitamisega. Neljal jahutusventilaatoril olid suure mahtuvusega pingesilumiskondensaatorid, mida alalispingemuundur ei suutnud sageli täis laadida, mis põhjustas häiringuid auto käivitamisel. Lihtsustatud skeem FEST 22 alalispingemuunduri jõuosa kujutab Joonis 3.



Joonis 3. FEST 22 alalispingemuunduri jõuosa lihtsustatud skeem

2.2 Erinevate lahenduste uurimine

Induktori südamikuga kõrget temperatuuri saaks madalamaks tuua parema jahutuse disainiga ja/või efektiivsema induktori valikuga. Kui eelmisel hooajal jahutati ventilaatoriga ainult radiaatorit, siis sel hooajal tuleks disainida jahutus nii, et suudaks jahutada ka induktori südamikku. Arvestada tuleb ka

faktiga, et valida tuleb ka uus induktor, sest võimsuse suurenemisega, ei ole eelmise hooaja induktor võimeline oma ülesannet täitma.

Jahutuse poole pealt aitaks kaasa ka veel paksema vasekihi kasutamine. See aitab vähendada termilist takistust. Erinevad trükkplaadi tootjad pakuvad võimalust kasutada paksemat vasekihti [7]. Lisaks soovib autor koguda rohkem infot jahutuse kohta. Seetõttu tuleb arendada välja süsteem, mis suudaks kuvada jahutuse infot järgmiste komponentide kohta: induktor, lülitustranistorid, kontrollid. Seetõttu on plaadile vaja lisada juurde MCU (*microcontroller unit*), mis suudab komponentide peale asetatud termistoride infot töödelda ja kuvada ning läbi selle juhtida jahutusventilaatorit. Seega peab MCU valiku puhul arvestama järgmiste sisenditega: vähemalt 5 analoogsignaali sisendit, pulsilaiusmodulatsioon, CAN (*Controller Area Network*) funktsiooni olemasolu, võimalikult väikse korpusega. Valikuks osutus STM32F042K6T6 MCU [8]. MCU skeem on olemas ka lisa (Lisa 1).

Alumise lülitusõla transistori diodi kõrget ümberlülituse laengu kadusid saaks vähendada, kui valida transistor, millel on väiksem diodi ümberlülituse laeng. Teine võimalus on katsetada välist diodi, millel on samuti väiksem diodi ümberlülituse laeng. Välise diodi valiku puhul peab arvestama, et lävipinge peab olema väiksem kui transistori sisemisel diodil, et välimine diod hakkaks enne juhtima, kui sisemine diod. Samuti uurib autor GaN (*gallium nitride*) tehnoloogial põhinevaid transistorid. GaN-transistori eeliseks ülemises õlas on madal paisulaeng ning alumises õlas sisemise diodi puudumine. Seetõttu sisemise diodi kaod alumises õlas puuduvad [9]. Katsetama hakatakse ettevõtte GaN Systems transistorid tootekoodiga GS61008T [10]. Andmelehest selgub, et kui tahta katsetada GaN-transistorid, tuleb tema jaoks teha eraldi plaat, sest transistori korpus erineb räni transistoride omadest. Seetõttu tehakse eraldi versioon 168W muundurist, et võrrelda lahendust räni baasil tehtud muunduriga.

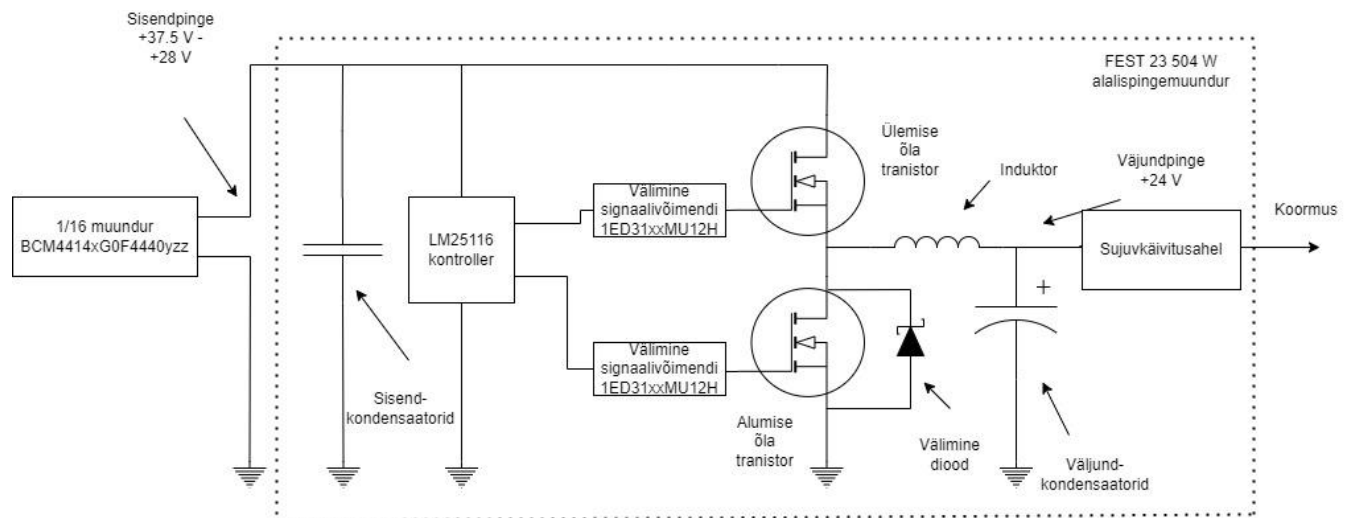
Ülemise õla lülituskadusid saaks vähendada, kui kasutada väljaspool LM25116 kontrollid signaali võimendit, mis suudaks kiiremini paisulaengut täis ja tühjaks laadida. Katsetatakse ettevõtte Infineon signaali võimendit 1ED31xxMU12H, mis võimaldab suurema väljundvoolu tõttu transistorid kiiremini laadida ning tühjaks laadida [11]. Disainimisel peab arvestama, et võimendi toiteks peab olema isoleeritud +12 V.

Ventilaatorite käivitamisprobleemile saab lähenda kahel erineval viisil: tõsta väljundmahtuvust või disainida muundurile juurde sujuvkäivitusahel. Mahtuvuse tõstmiseks on välja vahetada väljundkondensaatorid suurema mahtuvuse vastu. Sujuvkäivituse jaoks on vaja disainida plaadi peale

eraldi ahel. Autor kasutab ettevõtte Analog Devices võimendit LTC7004EMSE#PBF, mille üks aplikatsioonidest võimaldab tekitada sujuvkäivituse [12]. Sujuvkäiviti skeem on olemas lisas (Lisa 2).

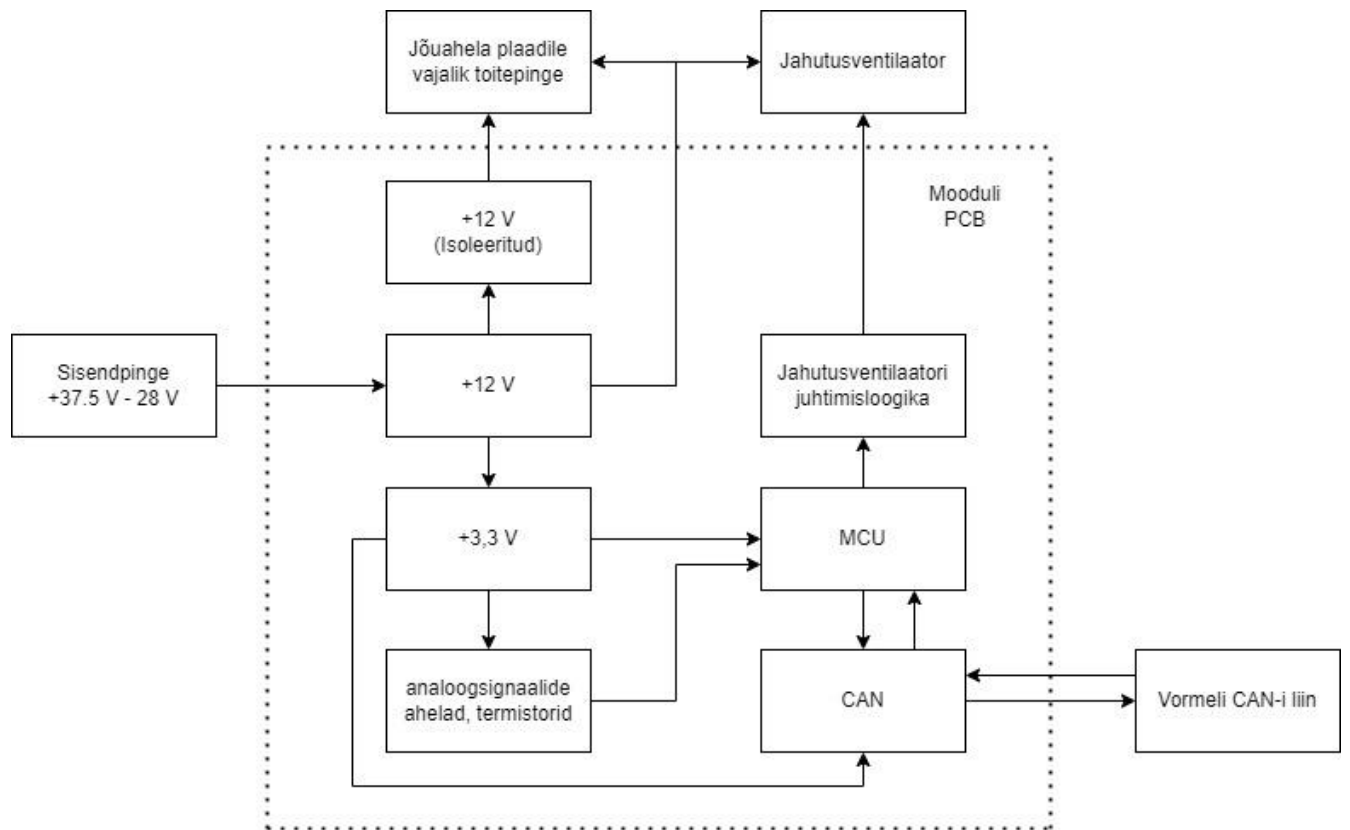
Sageduse tõstmise puhul tuleb arvestada lülituskadude suurenemisega. Seetõttu tuleks uurida palju reaalselt on võimalik induktori ja kondensaatorite suurust vähendada, et lülituskaod suureneksid minimaalselt.

Arvestades eelmise aasta infot, FEST 23 hooaja sisendeid ning arendusi, on mõistlik 504 W muunduril jõuahelad ning mikrokontrolleri ahelad eraldi plaatidena disainida, et hoida süsteemi ruumala võimalikult väiksena. Jõuahela trükkplaadile paigutatakse järgmised komponendid ja ahelad: lülitustransistorid, induktor, kontrolleri, sujuvkäivitusahel, välimine diod. Jõuahela trükkplaadi lihtsustatud skeem on Joonis 4. Jõuahela skeem on toodud välja ka lisas (Lisa 3).



Joonis 4. 504 W jõuahela trükkplaadi lihtsustatud skeem

Mooduli PCB-le paigutatakse järgmised ahelad: signaali võimendite toitemuundurid, MCU toiteahel, CAN-i ahel, analoogsignaali ahelad ja jahutusventilaatori juhtimisahel. Plaat saab toite endale jõuahela plaadilt (+37.5 V), mis muundatakse järgmistele pingetele: +12 V, +12 V (isoleeritud), +3,3 V. Mooduli plaadi lihtsustatud skeem on Joonis 5.



Joonis 5. Mooduli trükkplaadi lihtsustatud skeem

168 W muunduril jääb topoloogia samaks, mis FEST 22. Väiksema võimsuse tõttu muutuvad komponendid ning pindala.

2.3 Teoreetilised arvutused ning nende hindamine

504 W muunduri projekteerimisel tuleb arvestada järgmiste lähteandmetega:

- maksimaalne väljundvool 21 A;
- sisendpinge +28 V – +37.5 V;
- väljundpinge +24 V;
- maksimaalne võimsus 504 W;
- töötemperatuur 60 °C.

168 W muunduri puhul sisend-ja väljundpinge jäävad samaks. Maksimaalseks vooluks on valitud 7 A ning väljundvõimsuseks 168 W.

Järgmisena tuleb ära otsustada lülitussagedus. Lülitussagedusest sõltub induktori ruumala. Seetõttu tuleb valida võimalikult väikse soojuskaoga ja väikse ruumalaga induktor. Samuti tuleb meeles pidada, et tõstes lülitussagedust, me tõstame ka soojuskadusid transistoridel. Optimaalse sageduse valiku puhul kasutab autor Coilcrafti tööriista, mis näitab vastavalt lähteandmetele kõige sobilikumaid induktoreid [13].

Eelmise hooaja muunduri lülitussageduseks valiti 247 kHz. Väljundvoolu suurenemise tõttu ei ole võimalik kasutada eelmise hooaja induktorit, sest induktor satuks praeguse väljundvoolu puhul küllastusse. 504 W muunduri osas võrdleb autor kolme erinevat lülitussagedust lähtuvalt induktori parameetritest. Sagedused on järgmised: 200 kHz, 250 kHz, 300 kHz.

Tabel 1. 504 W muunduri lülitussageduse valik lähtuvalt induktori parameetritest

Nr	lülitussagedus [kHz]	L [uH]	ΔI [%]	DCR [m Ω]	P [W]	V [cm ³]	Induktor
1	200	2,0	102%	1,4	1,73	4,14	SER2011-202
2		6,8	31%	1,7	1,74	11,97	SER2915L-682
3	250	6,8	25%	1,7	1,48	11,97	SER2915L-682
4		2,0	82%	1,4	1,51	4,14	SER2011-202
5	300	2,0	68%	1,4	1,35	4,14	SER2011-202
6		6,8	21%	1,7	1,32	11,97	SER2915L-682

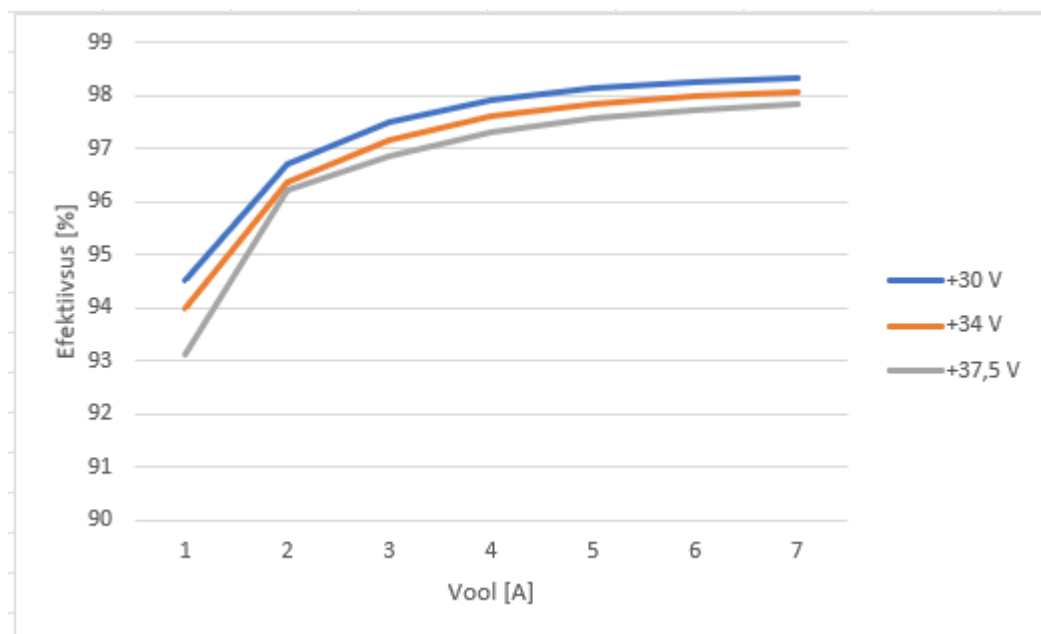
Tabelist 1 võib näha, võimsuskadu erineb 200 kHz ja 300 kHz vahel 0,38 W – 0,42 W. SER2011-202 puhul on näha kõrget voolupulsatsiooni, mis mõjutab väljundkondensaatorite suurust [14]. Seetõttu on otsus kasutada SER2915L-682 tüüpi induktorit [15].

168 W muunduri puhul on Webenchi tööriista kaudu saadud optimaalseks töösageduseks 516.71 kHz [16]. 168 W muunduri puhul on oluline tema kompaktsus. Seetõttu võrreldakse võimalikult väikse ruumalaga induktoreid. Valituks osutus SER1360-472 induktor, sest on kompaktsem ning on avatud südamikuga, mistõttu jahtub induktor kiiremini [17]. Sobilike induktorite võrdlus on Tabel 2.

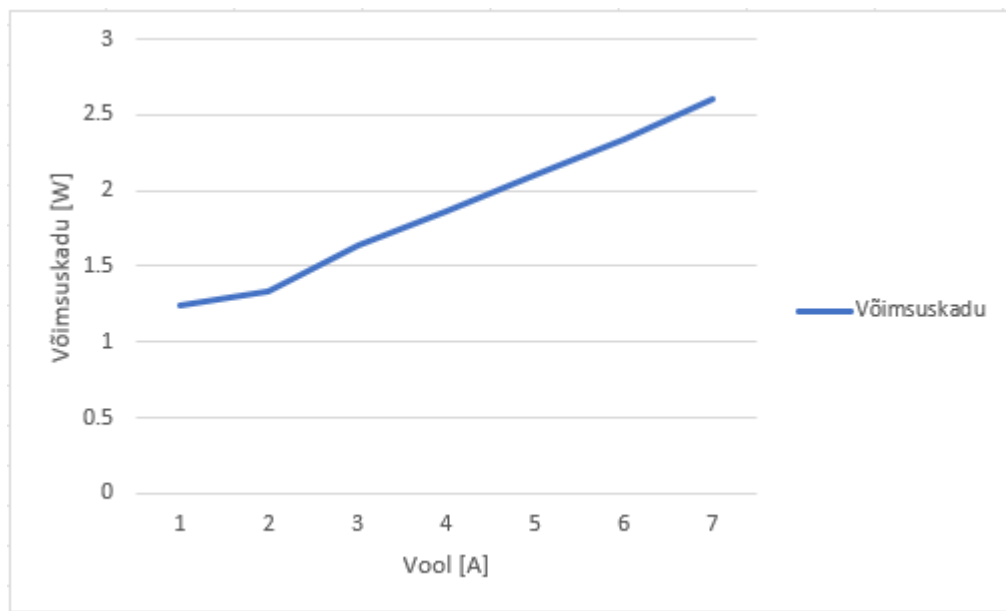
Tabel 2. 168 W muunduri induktorite võrdlus

Nr	lülitussagedus [kHz]	L [uH]	ΔI [%]	DCR [m Ω]	P [W]	V [cm ³]	Induktor
1	516,71	4,7	52%	6,2	0,751	0,97	SER1360-472
2		8,2	30%	6,8	0,683	2,52	ZC1818-AE

Teoreetilise efektiivsuse ning soojuskadude arvutamisel on arvestatud sünkroonse *buck* muunduri valemeid [18]. Samuti on kasutatud osade kadude leidmiseks tarkvara Webench ning Coilcraft. Ülemises ning alumises õlas kasutatakse Infineoni ISC0702NLS tüüpi transistoreid [19]. 168 W muunduri arvutuslik efektiivsus ning soojuskadu on Joonis 6 ning Joonis 7. Maksimaalse sisendpinge (+37,5V) ja voolu juures (7 A) on arvutuslik efektiivsus 97,84 %. Soojuskadu maksimaalse voolu juures on 2,6 W.

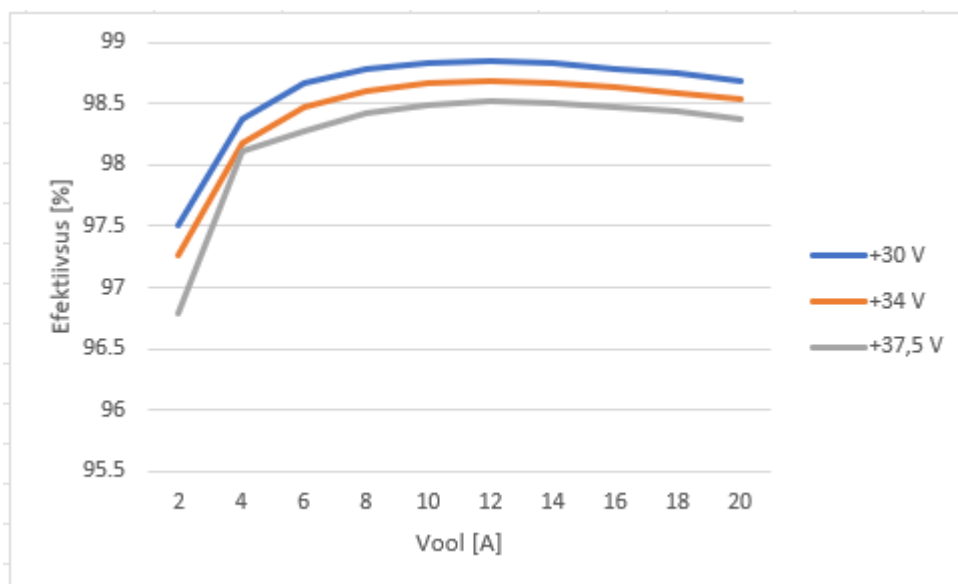


Joonis 6. Arvutuslik efektiivsus (168 W)

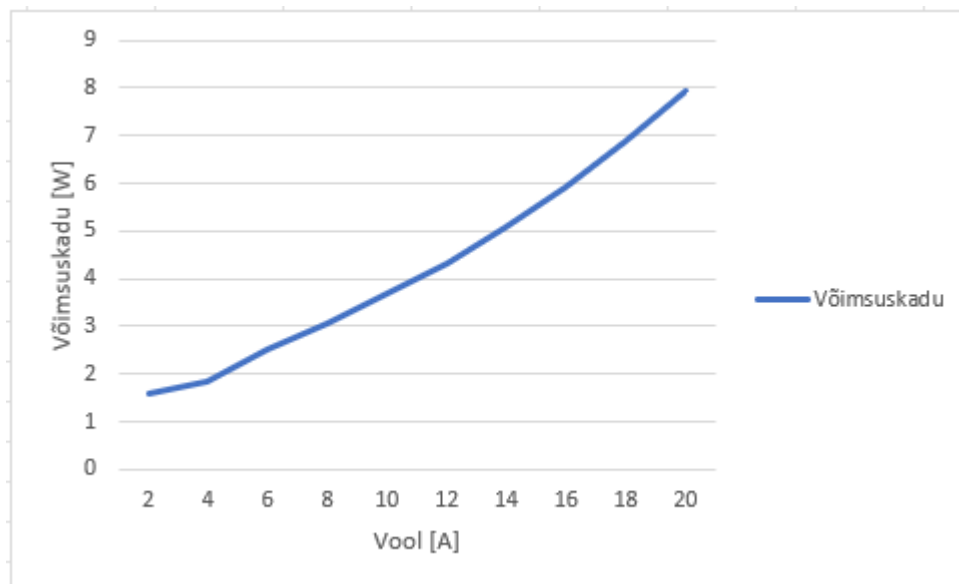


Joonis 7. Arvutuslik võimsuskadu +37,5 V sisendpinge juures (168 W)

Joonis 8 ning Joonis 9 on 504 W muunduri arvutuslik efektiivsus ning soojuskadu. Maksimaalse sisendpinge (+37,5V) ja voolu juures (20 A) on arvutuslik efektiivsus 98,34 %. Soojuskadu maksimaalse voolu juures on 7,9 W.



Joonis 8. Arvutuslik efektiivsus (504 W)

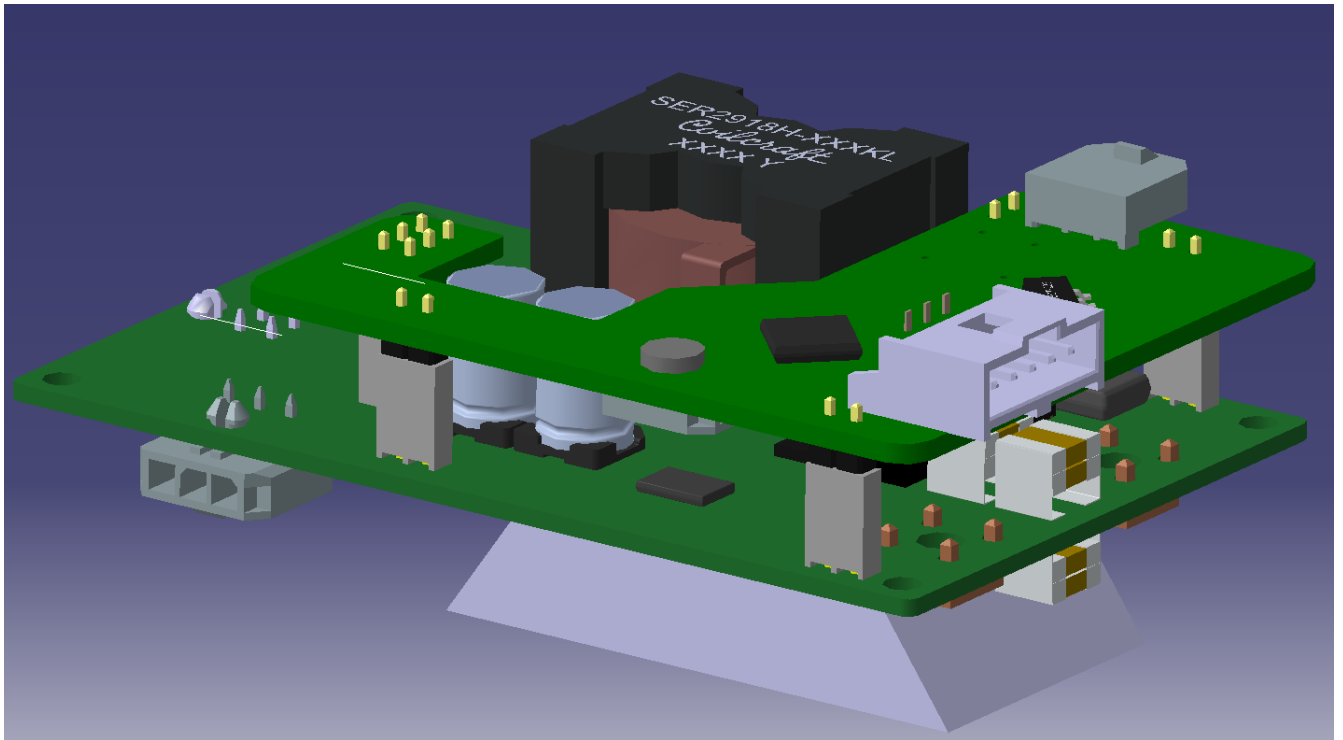


Joonis 9. Arvutuslik soojuskadu +37,5 V sisendpinge juures (504 W)

3 PROJEKTEERIMINE JA TESTIMINE

3.1 Trükkplaadi disain, komponentide paigutus

504 W alalispingemuundur koosneb kahest trükkplaadist, mis annab võimaluse süsteemi kompaktsemaks teha. Alumisel trükkplaadil paiknevad jõuosa komponendid ning sujuvkäivitusahel. Ülemisel trükkplaadil on osa komponente, mis on abiks muundamisel ning mikrokontroller ja jahutusventilaatori juhtimisahel. Muundurit tervikuna kujutab Joonis 10.



Joonis 10. 504 W muundur tervikuna

Jõuosa trükkplaadil on eelmise aastaga võrreldes rohkem signaale, mistõttu tuleb trükkplaat kuuekihiline.

Kihtide paigutus on järgmine:

- 1) 1. Kiht – polügoonid, sujuvkäivitusahel;
- 2) 2. Kiht - polügoonid, loogika toide;
- 3) 3. Kiht – polügoonid, loogika;
- 4) 4. Kiht – polügoonid, loogika;
- 5) 5. Kiht – polügoonid;

6) 6. Kiht – polügoonid, peamine radade kiht.

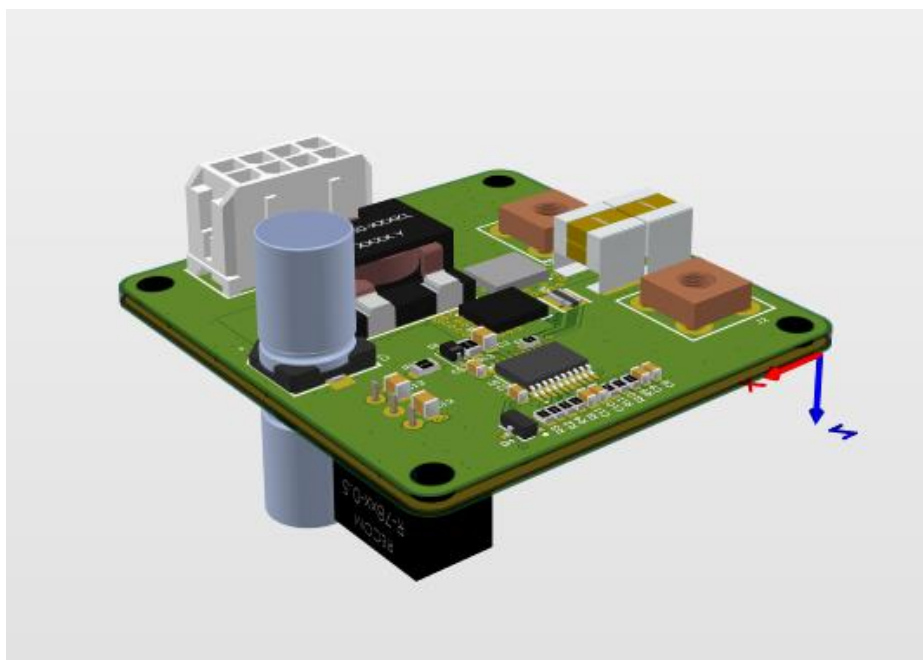
Ülemisel mooduli plaadil piisab neljast kihist, seetõttu kihtide jaotus on järgmine:

- 1) 1. Kiht – polügoonid, signaalide rajad;
- 2) 2. Kiht – polügoonid, toite rajad;
- 3) 3. Kiht – polügoonid;
- 4) 4. Kiht – polügoonid, signaalide rajad.

168 W alalispingemuundur koosneb ühest trükkplaadist ning temal piisab neljast kihist. Kihtide jaotus on järgmine:

- 1) 1. Kiht- polügoonid, signaalide rajad;
- 2) 2. Kiht- polügoonid, toite rajad;
- 3) 3. Kiht- polügoonid;
- 4) 4. Kiht- polügoonid, üksikud signaali rajad.

Muundur tervikuna on Joonis 11.



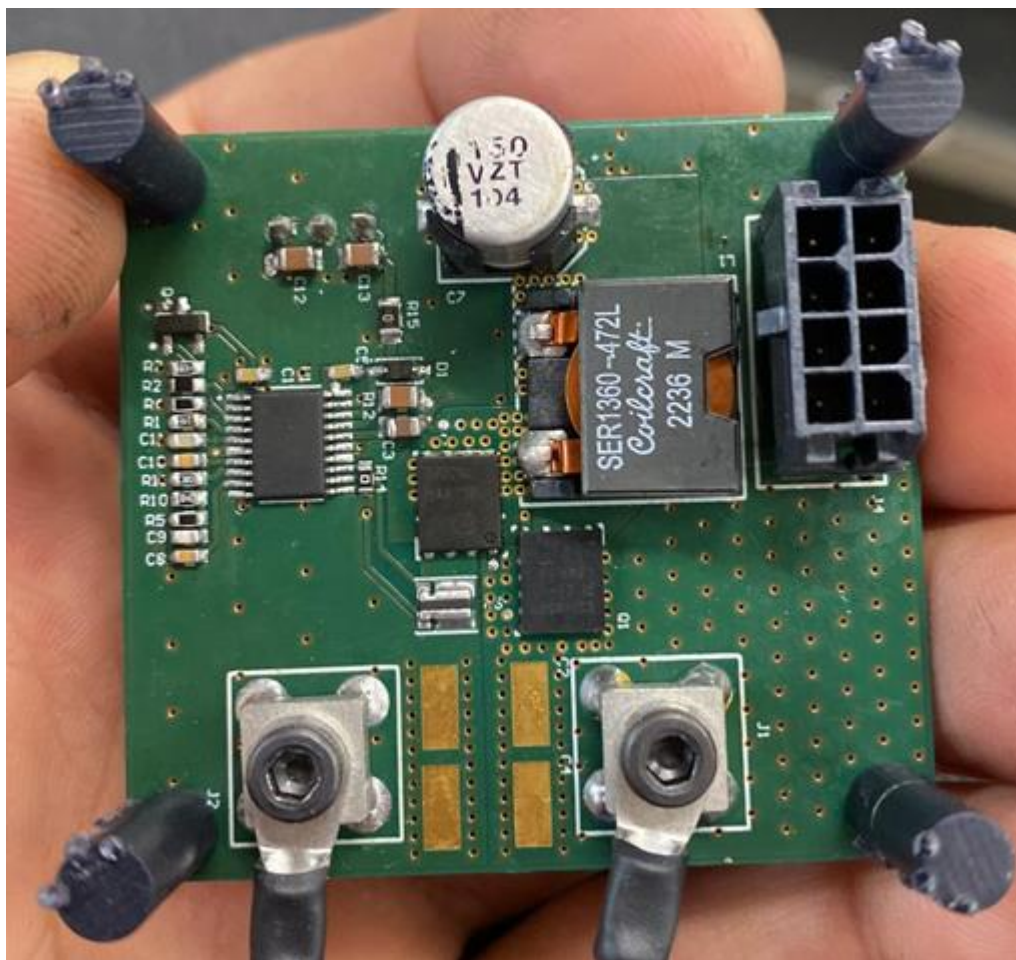
Joonis 11. 168 W muundur tervikuna

3.2 Tootmine ja testimine

Trükkplaat tellitakse ettevõttest Eurocircuits. Trükkplaadi komponendid joodetakse tudengivormeli tööruumides. 504 W muundur valmistootena on Joonis 12 ja 168 W muundur Joonis 13. Tootmise käigus selgus, et 504 W muunduril on tehtud mõned disaini vead. Alumise õla transistori puhul on vahetuses paisu ja neelu kontaktid. Seetõttu ei ole muundur võimeline saavutama oma maksimaalselt võimsust, sest transistorilt eralduv soojuskadu ei suudeta jahutada ning trükkplaadi peal parandatav lahendus ei ole pikas perspektiivis töökindel. Samuti oli aetud segamini paisu ning võimendi toitekontaktid. Antud probleemid said nii palju lahendatud, et valideerida uusi lahendusi ning mõõta efektiivsust teatud võimsuseni, kuid nõuab uue versiooni tootmist. Seetõttu disainiti ja toodeti uus versioon.



Joonis 12. 504 W muundur valmistootena

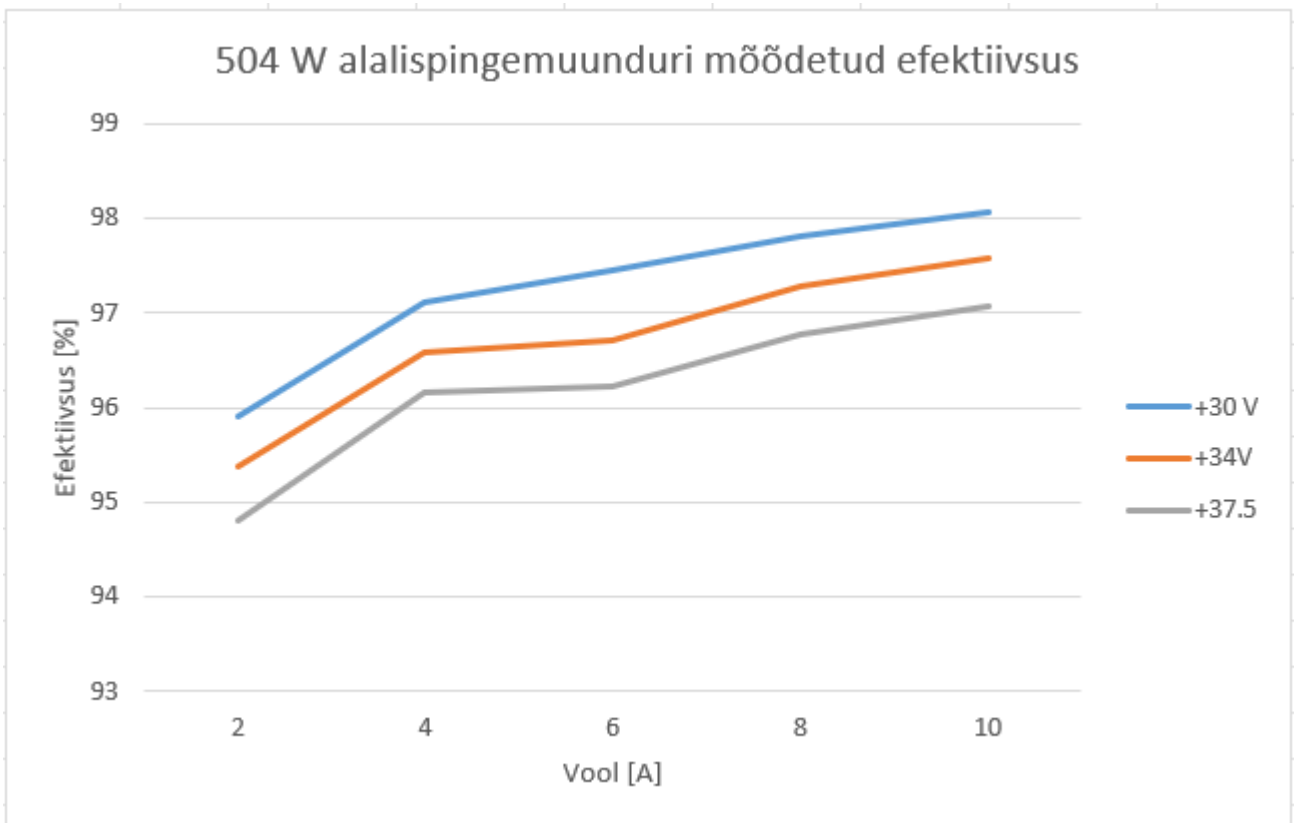


Joonis 13. 168 W muundur valmistooteena

Testimine toimus TTÜ jõuelektroonika laboris. Efektiivsuse mõõtmiseks kasutatakse samasuguseid seadmeid, ühendusskeemi, mis eelmisel hooajal [6]. Mõõtmine toimub 3 erineva sisendpinge juures: +30 V, +34 V ja +37,5 V. 504 W muunduri puhul toimub voolu mõõtmine 11 sammuna, alustades 2 A ja lõpetades 21 A. Iga sammu puhul tõstetakse voolu 2 A võrra, väljaarvatud viimane samm, kus tõstetakse voolu 1 A võrra. Tulenevalt esimese versiooni probleemidest, mõõdetakse efektiivsust maksimaalselt 10 A juures. 168 W muunduri puhul toimub voolu mõõtmine seitsme sammuna, alustades 1 A ja lõpetades 7 A. Iga sammu puhul tõstetakse voolu 1 A võrra. Iga sammu mõõdetakse 30 sekundit.

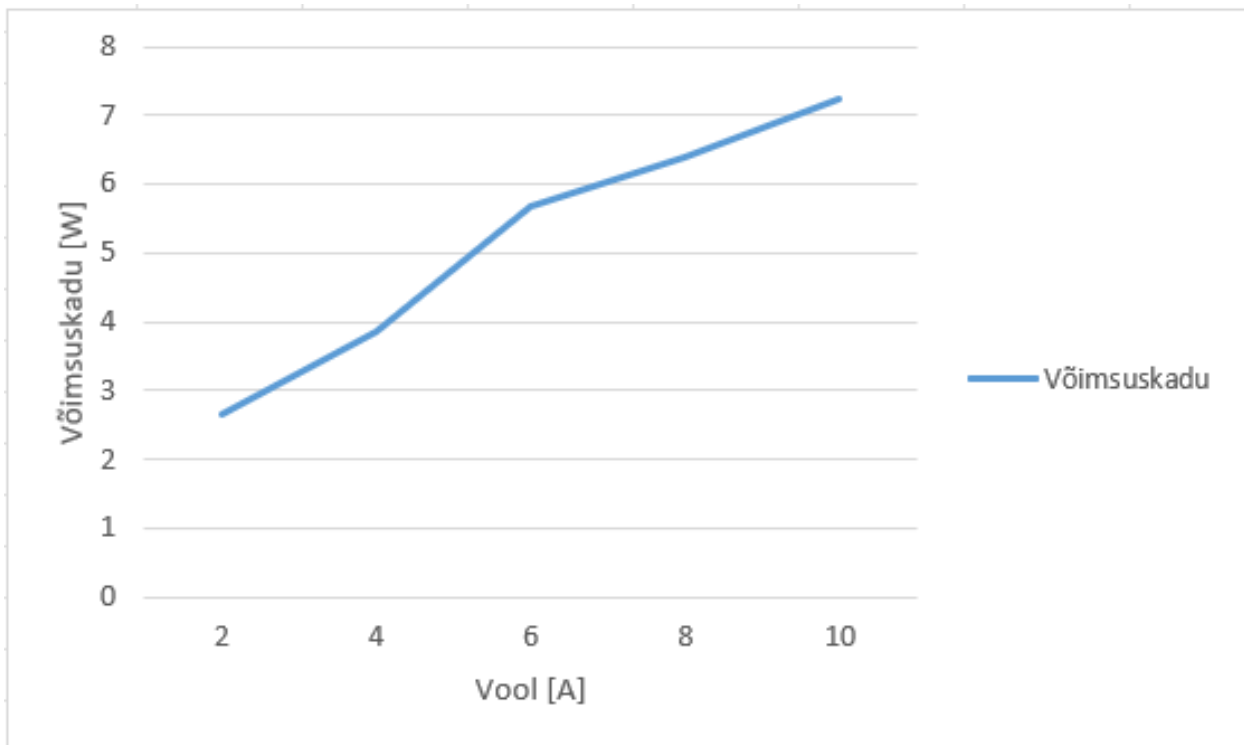
3.3 Tulemuste analüüs ja hindamine

Joonis 14 on 504 W (esimene versioon) muunduri mõõdetud efektiivsus. Efektiivsus +37,5 V sisendpinge ning 10 A juures on 97,07%. See on 0,43% võrra väiksem kui eelmise aasta muundur [6]. Põhjuseks ilmselt alumise õla transistori vale kontaktide paigutus.



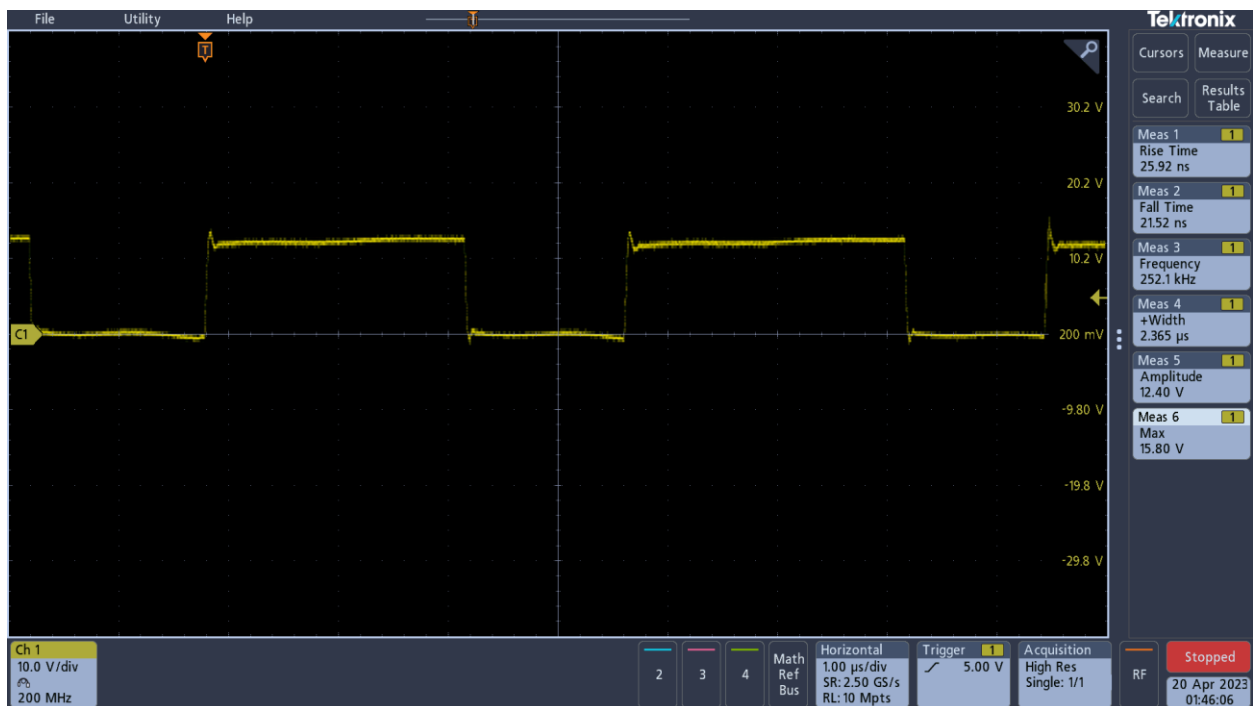
Joonis 14. 504 W (esimene versioon) alalispingemuunduri mõõdetud efektiivsus.

Joonis 15 kujutab 504 W muunduri mõõdetud võimsuskadu. 10 A juures on võimsuskadu 7,24 W (Joonis 15). Eelmise aasta muunduri võimsuskadu 10 A juures oli 7,01 W [6]. Seega 0,23 W võrra rohkem soojuskadu võrreldes eelmise aasta muunduriga.



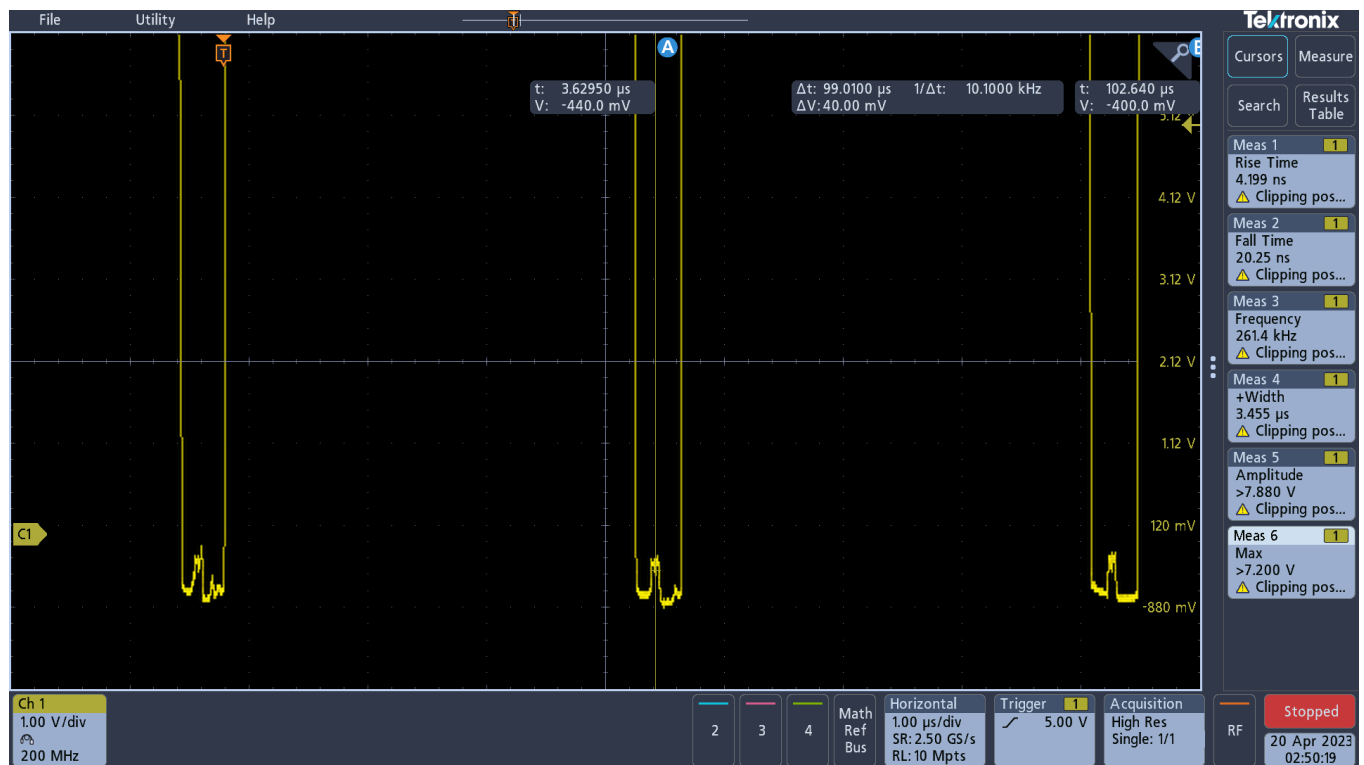
Joonis 15. 504 W (esimene versioon) muunduri mõõdetud võimsuskadu

504 W muunduri peal katsetati ka paisu võimendit, et kiirendada transistoride sisendkondensaatorite täis-ja tühjakslaadimist. Joonis 16 näitab transistoride sisendkondensaatorite mõõdetud täis-ja tühjakslaadimis aega. Täislaadimiseks kulub 25,92 ns ning tühjakslaadimise aeg 21,52 ns. Eelmisel aasta mõõdetud tulemused olid järgmised: täislaadimine 76 ns ning tühjakslaadimine 42 ns. Seega täislaadimise kiirus vähenes 2,93 korda ning tühjakslaadimine 1,95 korda. Jooniselt on veel näha pulsatsioon täislaadimishetkel, mis mõnel mõõtetulemusel lähenes +20 V-le. ISC0702NLS transistori lubatud maksimum paisupinge on +20 V, mistõttu on mõistlik järgmises versioonis paisu ette paigutada Zeneri diod mis summutab lülitusest tekkinud ülepinge.



Joonis 16. Transistoride sisendkondensaatorite täis-ja tühjakslaadimise mõõtetulemused.

Välise diodi mõõtetulemused on välja toodud joonisel (Joonis 17), kus on näha, et 1/3 ajast juhib väline diod ning 2/3 transistori sisemine diod. 8-10 A juures võttis täielikult juhtimise üle transistori sisemine diod. Seega võib järeldada, et antud valdkonnas tuleb tulevikus teadmisi täiendada, et antud lahendus töötaks ka suurema voolu juures.

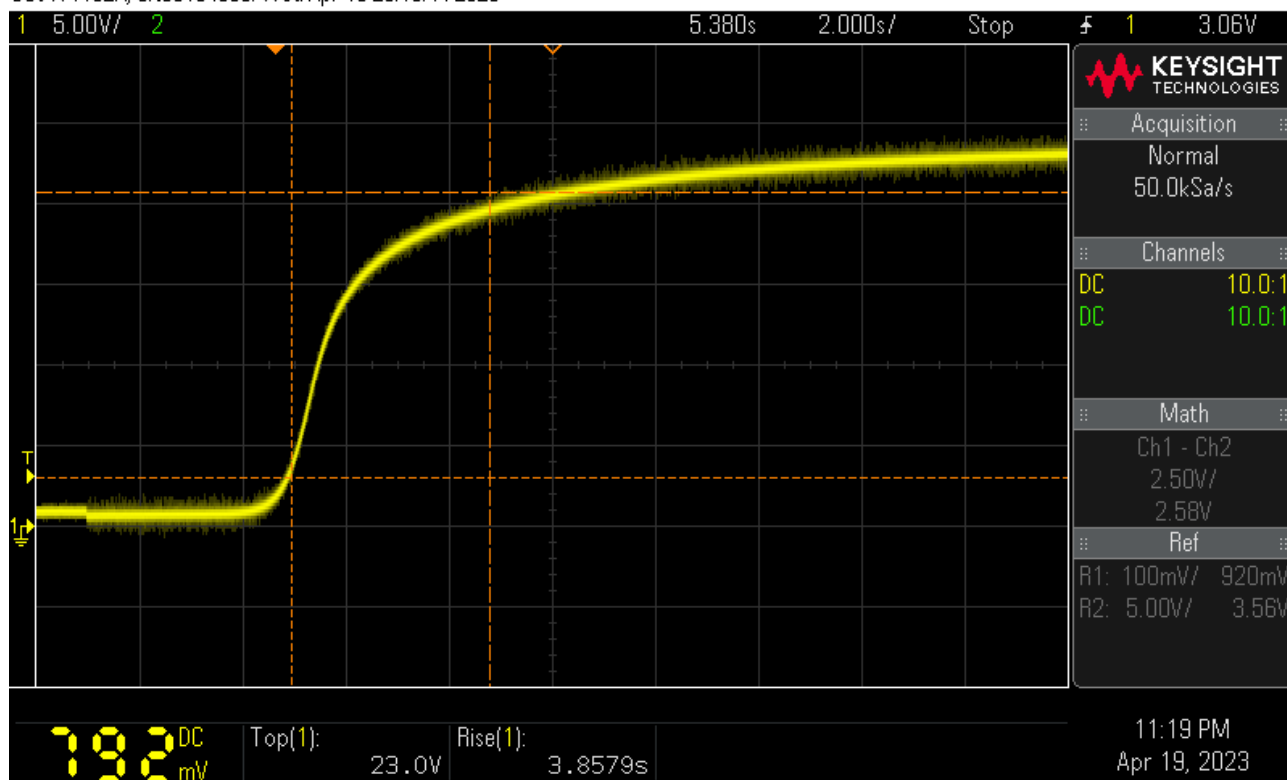


Joonis 17. Mõõtetulemused välise diodiga

Sujuvkäiviti ahela testimine toimus järgnevalt: autos olevat mahtuvust simuleeris 4000 μF kondensaator.

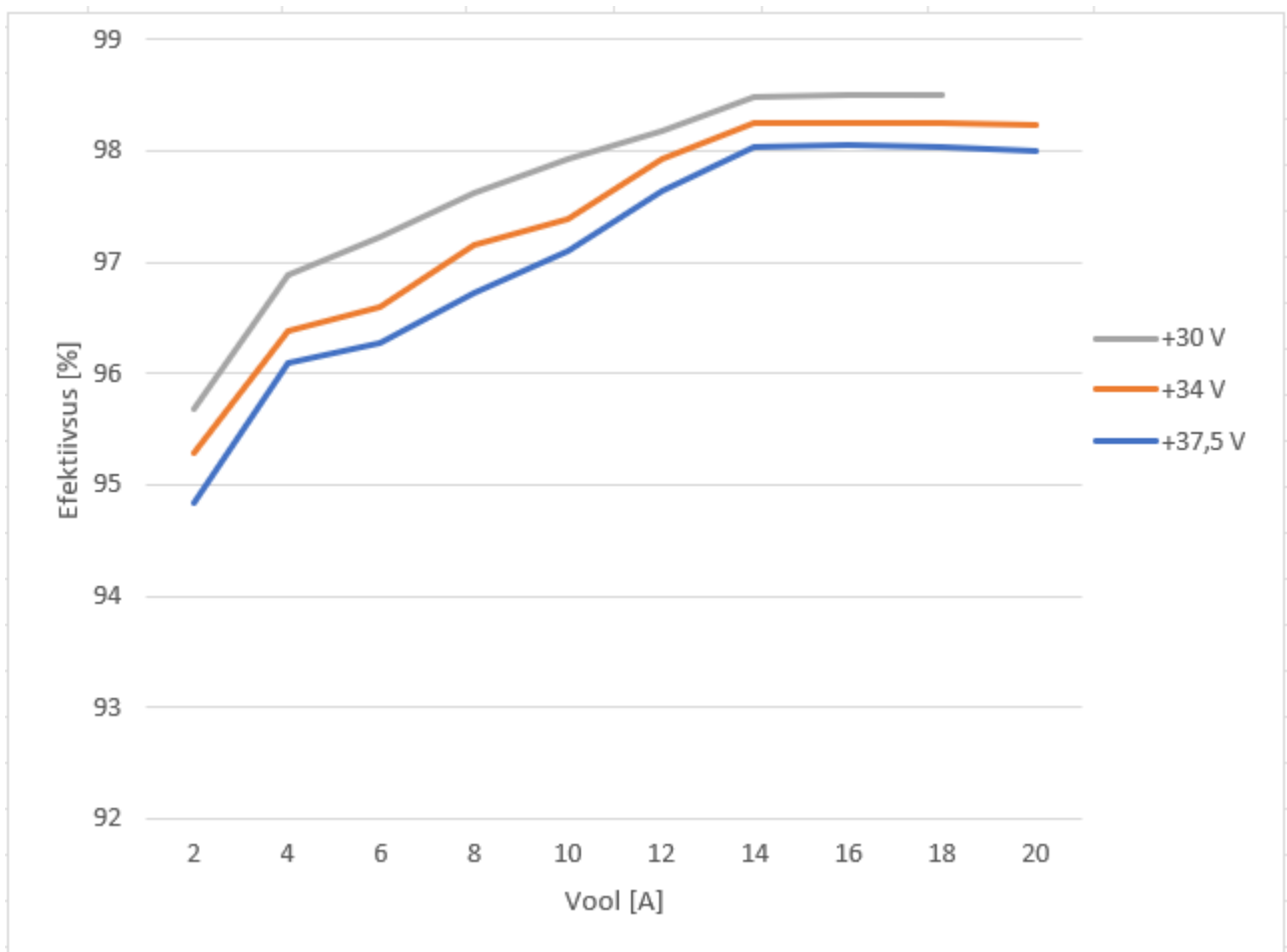
Sujuvat käivitust näitab Joonis 18. Jooniselt on näha, et pinge tõuseb sujuvalt.

DSO-X 1102A, CN59154350: Wed Apr 19 23:19:44 2023



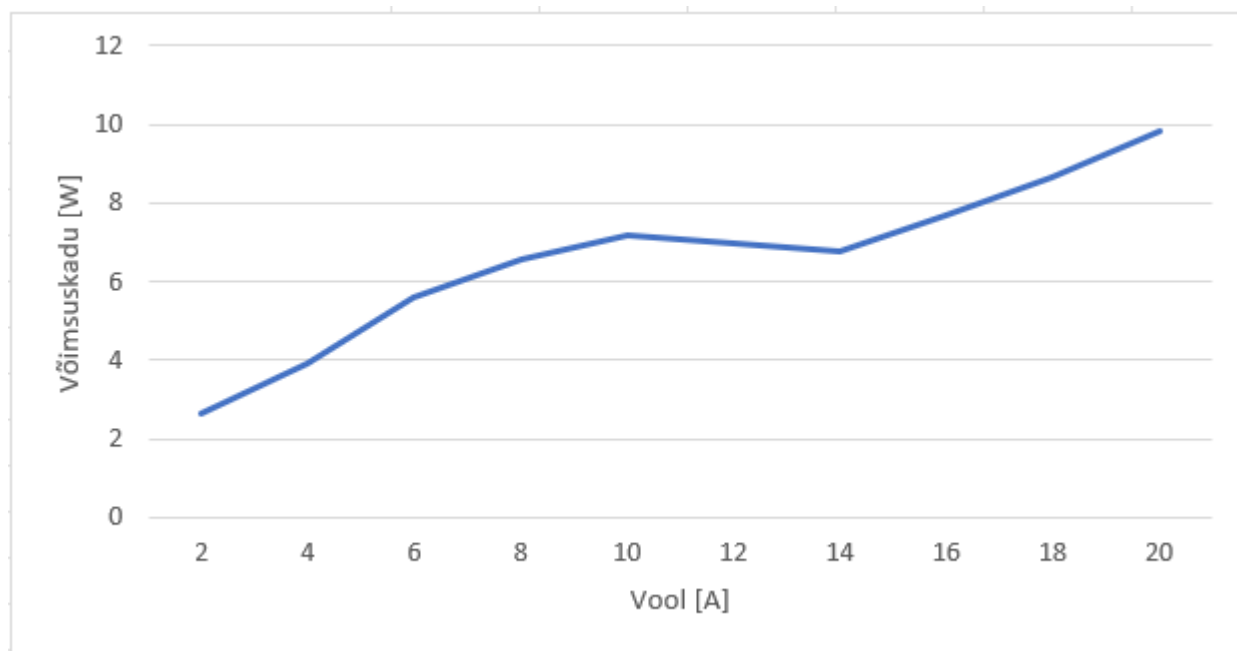
Joonis 18. Mahtuvuse simuleerimine sujuvkäiviti ahela testimiseks

Uuel versioonil korrigeeriti alumise õla transistori kontaktide paigutus ning mõlemate lülitustransistori ette paigutati Zener diod, et kaitsta transistoreid ülepinge eest. Seejärel alustati mõõtmistega. Joonis 19 annab ülevaate 504 W muunduri uue versiooni efektiivsuse mõõtetulemustest. Muutuste tõttu oli võimalik koormata muundurit kuni 20 A. 21 A juures muundur väljus töörežiimist. Seega jääb muunduri maksimum võimsuseks 492 W. +30 V sisendpinge puhul jääb võimsuseks 432 W. Põhjused, miks muundur ei suuda saavutada 504 W, ei oska autor kommenteerida ning see nõuab lisamõõtmisi, et põhjused välja selgitada, kuid ilmselt on probleem seotud induktori küllastusega. Muunduri efektiivsus +37,5 V ning 20 A juures on 98,00 %. See on 0,34 % võrra väiksem kui arvutuslik efektiivsus. FEST 22 muunduril +37,5 V sisendpinge ning 18 A juures on efektiivsus 97,50 %. FEST 23 puhul on efektiivsus samade tingimuste juures 98,04 %. Seega FEST 23 504 W muundur on 0,54 % efektiivsem.



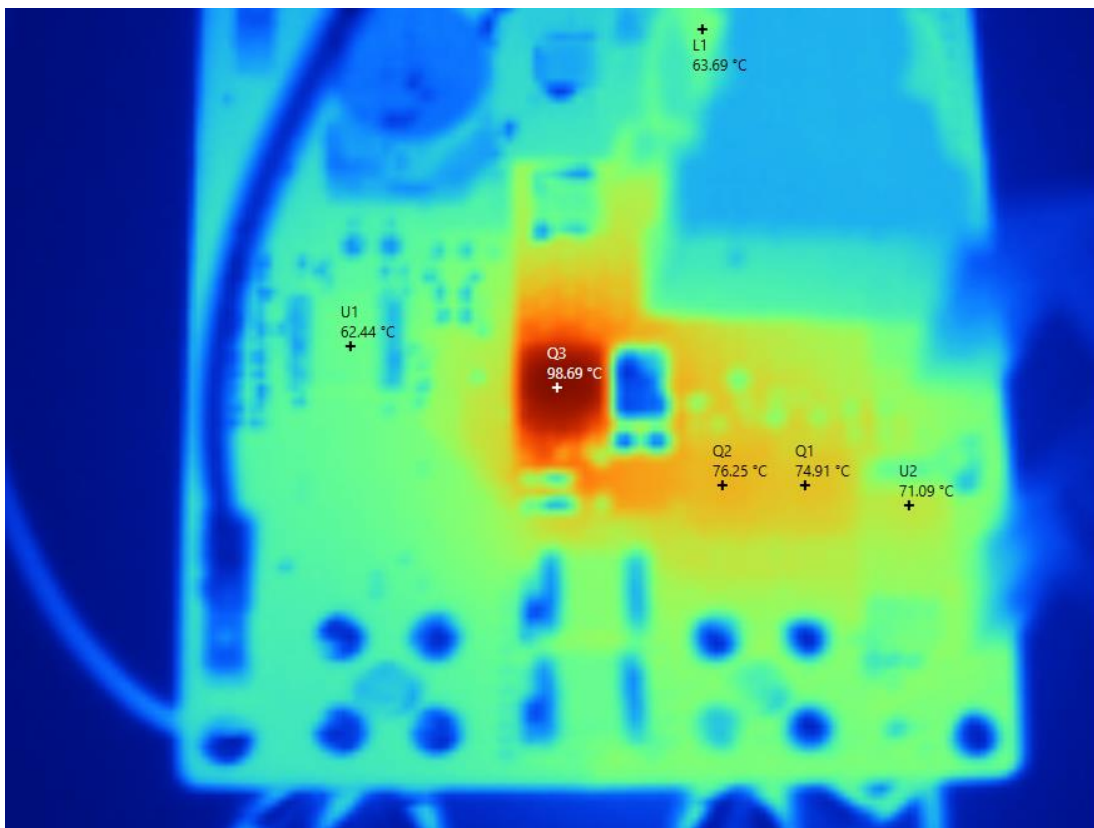
Joonis 19. 504 W (uus versioon) mõõdetud efektiivsus

504 W muunduri uue versiooni võimsuskadusid +37,5 V sisendpinge juures kujutab Joonis 20. Maksimaalne võimsuskadu 20 A juures on 9,83 W. 10 – 14 A juures on jooniselt näha, kus võimsuskadu väheneb ning seejärel hakkab jälle kasvama. FEST 22 võimsuskadu 18 A juures on 10,71 W ning FEST 23-l 8,67 W. Seetõttu on FEST 23 võimsuskaod võrreldes FEST 22 muunduriga väiksemad 2,04 W võrra.



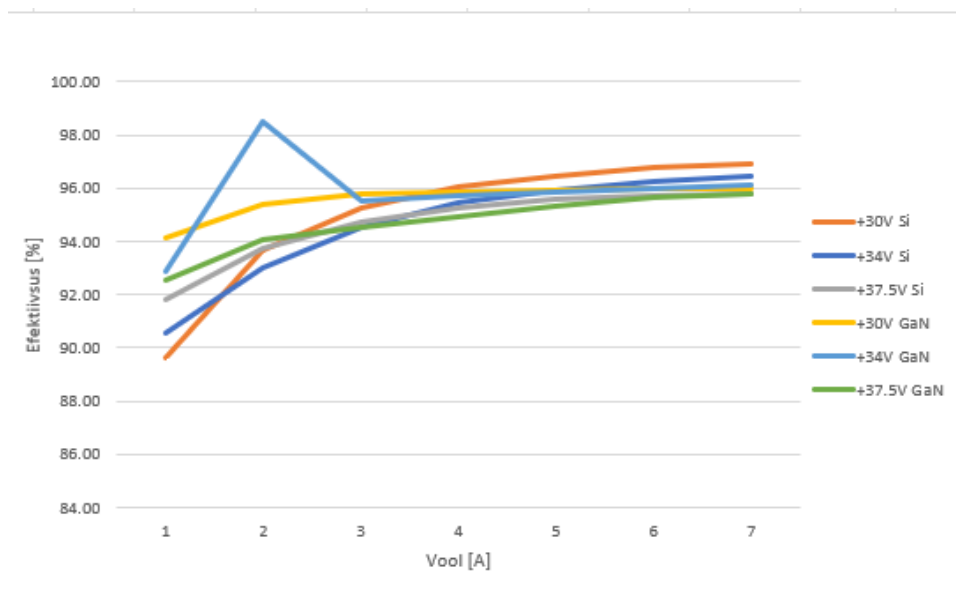
Joonis 20. 504 W (uus versioon) mõõdetud võimsuskadu +37,5 V sisendpinge puhul.

504 W (uus versioon) muunduri termopilti 492 W juures kujutab Joonis 21. Jooniselt on näha alumise lülitusõla transistori temperatuuri erinevust võrreldes teiste oluliste komponentidega. Kui FEST 22 kõige soojem komponent oli induktor, siis FEST 23-l on alumise lülitusõla transistor.



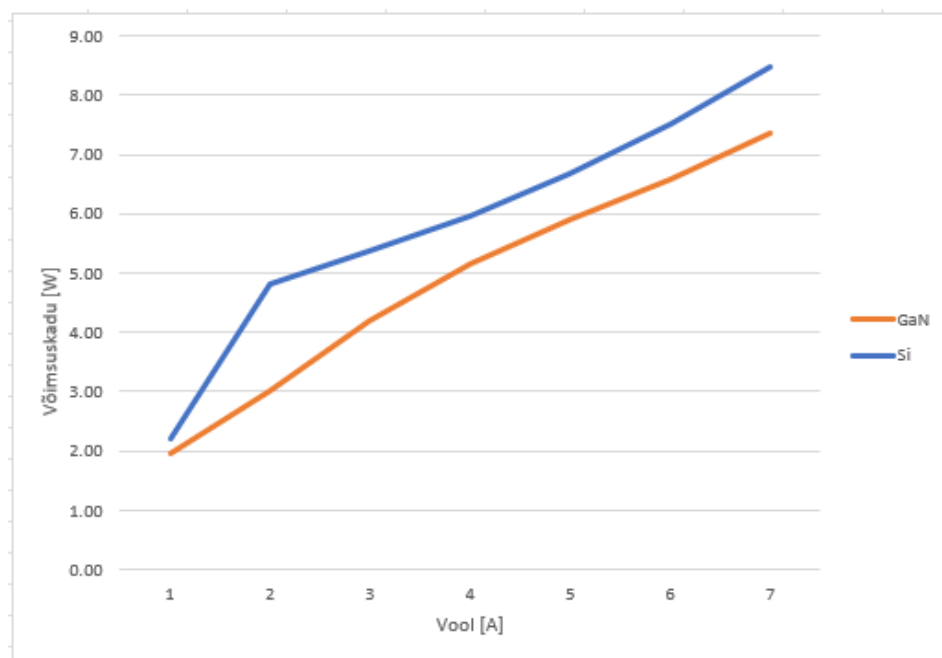
Joonis 21. 504 W(uus versioon) muunduri termopilt 492 W juures.

Joonis 22 on välja toodud 168 W muunduri Si- ja GaN-transistoride mõõdetud efektiivsuse võrdlus. Jooniselt on näha, et 1 - 2 A juures on efektiivsus parem GaN-transistori puhul, kuid väljundvoolu suurenedes tulemused ühtlustuvad. +34 V sisendpinge ning 2 A koormuse korral esineb GaN-transistori juures hetk, kus efektiivsus ulatub üle 98 %. Antud nähtust peab autor mõõteveaks ning lähtub tulemustest, mis on ühtlasemad. Efektiivsus +37,5 V sisendpinge ning 7 A koormuse juures ränitransistoril on 95,72 %.



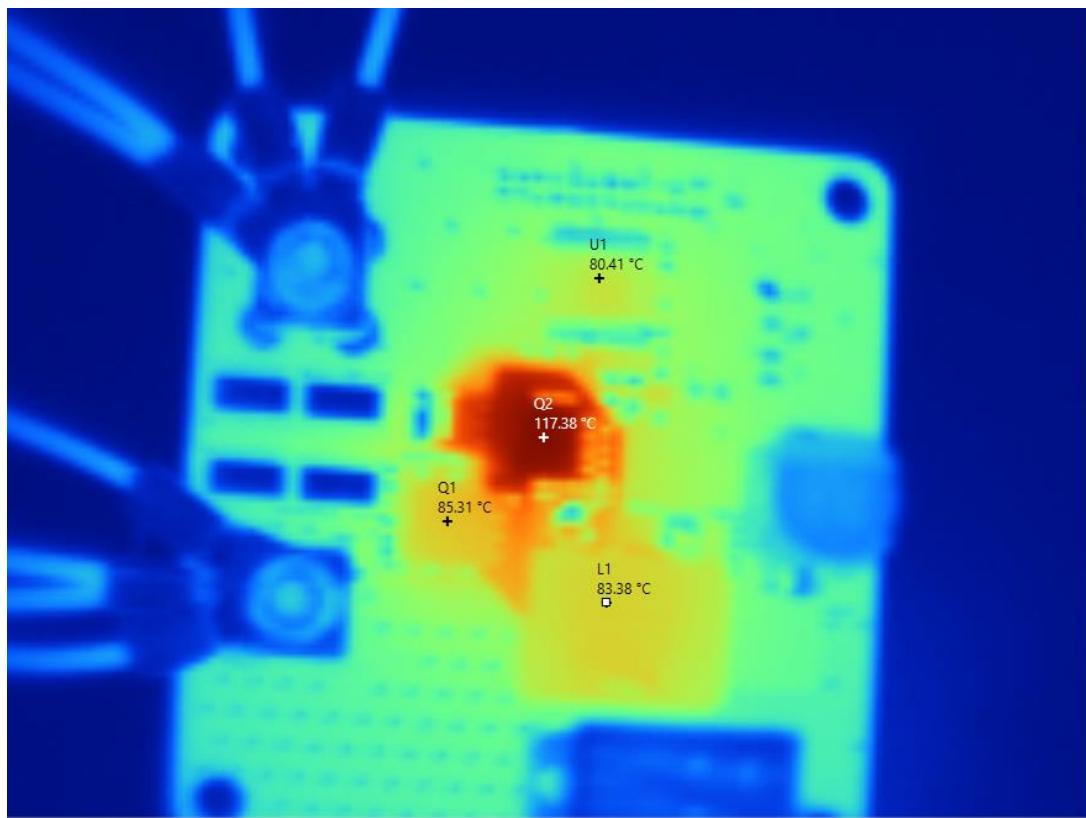
Joonis 22. 168 W muunduri Si- ja GaN-transistorite mõõdetud efektiivsuse võrdlus

Joonis 23 on välja toodud mõõdetud võimsuskao võrdlus Si- ja GaN-transistoride vahel maksimaalse sisendpinge juures. Jooniselt on selgelt näha, et GaN-transistorid eraldavad vähem soojust. Keskmiselt 1 W vähem kui Si tüüpi transistorid.

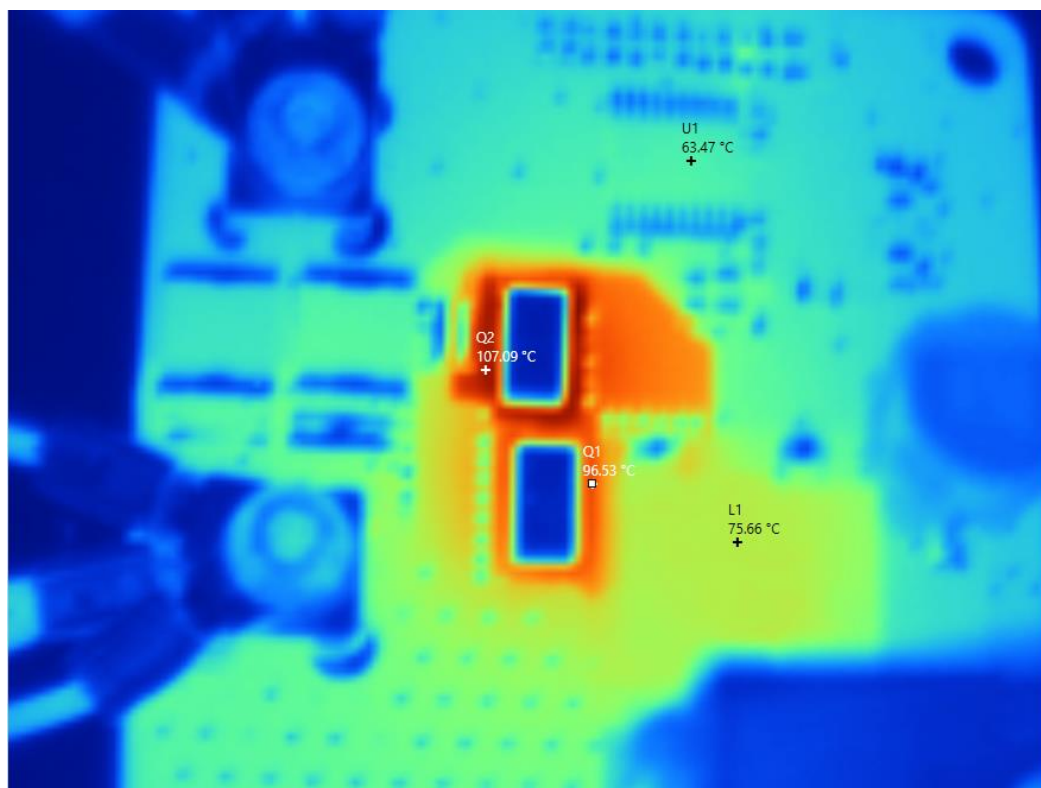


Joonis 23. 168 W muunduri mõõdetud võimsuskadude võrdlus

Joonis 24 annab ülevaate temperatuuri jaotumistest 168 W muunduril, kus on kasutusel räni transistorid. Jooniselt on selgelt näha, et alumise õla transistoril on oluliselt kõrgem temperatuur kui teistel komponentidel. Joonis 25 annab ülevaate temperatuuri jaotumisest 168 W muunduril, kus on kasutusel GaN-transistorid. GaN-transistoride puhul on näha, et temperatuur jaotub kahe õla vahel ühtlasemalt kui räni transistoridel.



Joonis 24. 168 W muunduri termopilt (räni transistoriga)



Joonis 25. 168 W muunduri termopilt (GaN-transistoriga)

168 W muundur täitis oma eesmärgi, kuid on veel võimalusi, kuidas seda tulevikus paremaks arendada. Uuel hooajal tuleks kasutada GaN-transistoreid, et vähendada soojuskadusid alumises transistori õlas. See aga tähendaks ka isearendatud kontrolleri arendamist, et GaN-transistoreid paremini juhtida. Praegune kontrolleri on mõeldud räni transistoride kontrollimiseks, mistõttu isearendatud kontrolleri arendamise puhul saaks GaN-transistorit efektiivsemalt juhtida.

504 W muunduri maksimaalseks väljundvõimsuseks jäi 492 W. Põhjuste väljaselgitamine nõuab lisauuringuid. FEST 23 504 W alalispingemuundur on võrreldes FEST 22 muundurist 0,54 % efektiivsem ning võimsuskadu on 2,04 W väiksem. Tulemust parandas ilmselt kõige enam välise signaalivõimendite kasutuselevõtt. 504 W muunduri puhul tuleks järgmisel hooajal kaaluda mitme faasilise muunduri arendamist, et soojust paremini hajutada ning vähendada komponentide suurust. Mitme faasilise lahenduse puhul sobiks kasutada ka GaN-transistoreid. Kuigi muundur ei saavutanud oma disainitud võimsust, on võimalik teda kasutada vormeli peal, sest on arvestatud varuga ning samuti on jahutusventilaatorite valiku muudatuste tõttu tarbimine langenud.

4 MAJANDUSLIK OSA

Majanduslik osa hõlmab alalispingemuunduri projekteerimiseks kulunud aega ning võrreldakse ostutoote ning isearendatud toote maksumust. Ajakulu sisse arvestatakse järgmisi tegevusi: eelmise hooaja analüüs, uute sisendite ja lahenduste uurimine, teoreetilised arvutused, projekteerimist, testimist.

4.1 Ettevalmistavad tegevused

Ettevalmistuse alla kuuluvad järgmised tegevused: eelmise hooaja analüüs, uute sisendite ja lahenduste uurimine ning teoreetilised arvutused. Eelmise hooaja analüüs annab tootele sisendi, mida saaks paremini teha. Uute sisendite ja lahenduste uurimine paneb paika kontseptsiooni ning annab peamised andmed, et alustada teoreetiliste arvutustega. Tabel 3 näitab ettevalmistavate tegevuste ajakulu.

Tabel 3. Ajakulu ettevalmistavate tegevuste puhul

Tegevus	Ajakulu, h	Ajakulu osakaal
Eelmise hooaja analüüs	30	30 %
Uute sisendite ja lahenduste uurimine	40	40 %
Teoreetilised arvutused	30	30 %
Tegevused kokku	100	

4.2 Tootearendus

Tootearenduse alla kuuluvad projekteerimine ning testimine. Projekteerimine hõlmab elektriskeemide joonestamist ning komponentide paigutamist Altium Designer keskkonnas. Pärast projekteerimist on vaja trükkplaati testida. Tabel 4 näitab tootearenduse tegevuste ajakulu.

Tabel 4. Ajakulu tootearenduste tegevuste puhul

Tegevus	Ajakulu, h	Ajakulu osakaal
Elektriskeemide joonestamine	30	27, 27 %
Komponentide paigutus	60	54, 54 %
Trükkplaadi testimine	20	18, 19%
Tootearendus kokku	110	

4.3 Ostutoote ja isearendatud toote maksumuse võrdlus

Tudengivormelis tuleb sageli teha valik ostutoote või isearendatud toote vahel. Valik sõltub mitmetest parameetritest: mass, toote ruumala, toote keerukus, toote kasutegur, hind, ühilduvus ülejäänud süsteemiga, paindlikkus, jne. Tabel 5 näitab ostutoote ning isearendatava plaadi maksumuse võrdlust. Hinnad sisaldavad komponentide ning trükkplaadi maksumust. Isearendatud süsteem on 472,21 € võrra odavam. Reaalsuses oleks isearendatud süsteemi kulud tööjõukulude tõttu kordades suuremad, kuid tudengivormeli organisatsioonis tööjõukulud puuduvad.

Tabel 5. Ostutoote ning isearendatava plaadi maksumuse võrdlus

	Ostutoode	Isearendatud muundur (168 W)	Isearendatud muundur (504 W)
Kogus	3	1	2
Tükihind	305,16 €	51,97 €	195,68 €
Maksumus	915,54 €	51,97 €	391,36 €
		Isearendatud süsteem kokku:	443,33 €

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli projekteerida tudengivormelile FEST 23 kaks erineva võimsusega alalispingemuundurit. Lisaks oli autoril plaanis katsetada erinevaid lahendusi, et muuta muundurit efektiivsemaks võrreldes eelmise hooajaga. Esimeses peatükis kirjeldati lühidalt tudengivormeli võistlussarja ning uusi reeglimuudatusi, mis annavad aluse uue alalispingemuunduri süsteemi loomisele.

Teises peatükis analüüsiti eelmise hooaja muundurit, et selgitada välja tema puudused ning uuriti erinevaid lahendusi, kuidas oleks võimalik muunduri efektiivsust parandada. Suurimateks muutusteks olid sujuvkäiviti ahela lisamine ning välimiste paisuvõimendite lisamine transistoride ette. Teises peatükis uuritakse välja, millist mikrokontrollerit hakatakse 504 W moodulil kasutama ning arvutatakse välja teoreetiline efektiivsus ning soojuskadu.

Kolmandas peatükis projekteeriti valmis kaks erineva võimsusega muundurit. Seejärel valmistati mõlemad muundurid ning asuti TTÜ jõuelektronika laboris muundurite efektiivsust mõõtma. Pärast testimist töödeldi ning analüüsiti laborist saadud andmeid. Seejärel analüüsiti 504 W muunduri uute lahenduste toimimist. Pärast seda võrreldi 168 W muunduri puhul Si- ja GaN-transistoride erinevusi. Peatüki lõpus võrreldi selle aasta muundureid eelmise aasta muunduriga ning pakuti välja lahendusi, mida järgmisel hooajal katsetada.

Viimases peatükis kirjeldatakse lõputöö majandusliku poolt. Majanduslikus pooles uuritakse inseneri ajakulu süsteemi loomisel ning võrreldakse ostutoote ja isearendatud süsteemi hinda.

168 W muundur täitis oma eesmärgi. 504 W muundur ei saavutanud disainitud võimsust, kuid jahutuskomponentide muutuste tõttu on vajaminev võimsus väiksem ning seetõttu on võimalik muundurit vormelis rakendada.

SUMMARY

The main purpose of the thesis was to design two different DC-DC converters for the FEST 23 FS Team Tallinn formula car. The other goal was to research solutions, which could help improve converter's efficiency. The first part describes Formula Student competition and it's new rule changes, which gives an input for developing new DC-DC converters.

The second part analyses previous season's converter to figure out main issues in the previous season and describes new solutions which could improve efficiency. The main improvements are precharge circuit and external gate drivers. There is also a topic which describes the process of choosing the MCU for the DC-DC Module. The last part of the topic is the part where theoretical efficiency and power losses are calculated.

The third part describes the designing process of the converters. Next topic describes the production and testing processes. The chapter ends with analysing the test results and comparing this year converters with previous year converter.

The last topic describes the economic part. In this topic the work hours of the engineer is calculated and there is a comparison table between bought product and self-developed product.

The 168 W DC-DC converter meets the requirements. 504 W converter did not achieve it's designed maximum output power but can be used in the formula car, since the cooling system components have been replaced with lower power consumption components.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] Formula Student Germany, Gmbh, „Concept,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.formulastudent.de/about/concept/>. [Kasutatud 28 Aprill 2023].
- [2] MTÜ Tudengi Vormel, „Formula Student Team Tallinn,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.formulastudent.ee/>. [Kasutatud 28 Aprill 2023].
- [3] Formula Student Germany, GmbH, „Formula Student Rules 2023,“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.1.pdf. [Kasutatud 28 Aprill 2023].
- [4] Vicor Corporation, „BCM® in a VIA™ Package Bus Converter BCM4414xG0F4440yzz,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.vicorpower.com/documents/datasheets/ds_BCM4414xG0F4440yzz.pdf. [Kasutatud 29 Aprill 2023].
- [5] Texas Instruments, „LM25116 Wide-Range Synchronous Buck Controller,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm25116.pdf?ts=1683279441466&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM25116%253FkeyMatch%253DLM25116%2526ti-search%253Dsearch-everything%2526usecase%253DGPN-ALT. [Kasutatud 30 Aprill 2023].
- [6] H. Anniste, Alalispingemuunduri arendamine tudengivormelile FEST 22, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2022, p. 5,8,55,57,67
- [7] Eurocircuits, „The Impact of Different Copper Thicknesses on the Cooling of a SMD-Voltage Regulator,“ 22. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.eurocircuits.com/blog/the-impact-of-different-copper-thicknesses-on-the-cooling-of-a-smd-voltage-regulator/>. [Kasutatud 1 Mai 2023].

- [8] STMicroelectronics, „ARM®-based 32-bit MCU, up to 32 KB Flash, crystal-less USB,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/389/stm32f042c4-1851049.pdf>. [Kasutatud 1 Mai 2023].
- [9] Efficient Power Conversion, „Fundamentals of Gallium Nitride Power Transistors,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Available: https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/product-training/Appnote_GaNfundamentals.pdf. [Kasutatud 01 Mai 2023].
- [10] GaN Systems, „GS61008T Top-side cooled 100V E-mode GaN transistor Datasheet,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.mouser.ee/datasheet/2/692/GS61008T_DS_Rev_200402-1837994.pdf. [Kasutatud 1 Mai 2023].
- [11] Infineon, „EiceDRIVER™ 1ED31xxMU12H Compact,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-1ED31xxMU12H-DataSheet-v02_01-EN.pdf?fileId=5546d46274cf54d50174d97c37be1f67. [Kasutatud 1 Mai 2023].
- [12] Analog Devices, „LTC7004 Fast 60V High Side NMOS Static Switch Driver,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/609/ltc7004-3125761.pdf>. [Kasutatud 1 Mai 2023].
- [13] Coilcraft Inc, „DC-DC Optimizer,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.coilcraft.com/en-us/tools/dc-dc-optimizer/#/search>. [Kasutatud 1 Mai 2023].
- [14] Coilcraft, „Shielded Power Inductor – SER2000,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/597/ser2000-270634.pdf>. [Kasutatud 1 Mai 2023].
- [15] Coilcraft, „Shielded Power Inductors - SER2900,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/597/ser2900-270685.pdf>. [Kasutatud 1 Mai 2023].
- [16] Texas Instruments, „Webench Power Designer,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator>. [Kasutatud 1 Mai 2023].

- [17] Coilcraft Inc, „Shielded Power Inductors – SER1360,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/597/ser1360-270713.pdf>. [Kasutatud 1 Mai 2023].
- [18] Texas Instruments, „An Accurate Approach for Calculating the Efficiency of a Synchronous Buck Converter Using the MOSFET Plateau Voltage,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.ti.com/lit/an/slvaeq9/slvaeq9.pdf?ts=1649166105481&ref_url=htt. [Kasutatud 1 Mai 2023].
- [19] Infineon, „MOSFET OptiMOSTM5Power-Transistor,60V,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.mouser.ee/datasheet/2/196/Infineon_ISC0702NLS_DataSheet_v02_00_EN-2581292.pdf. [Kasutatud 1 Mai 2023].

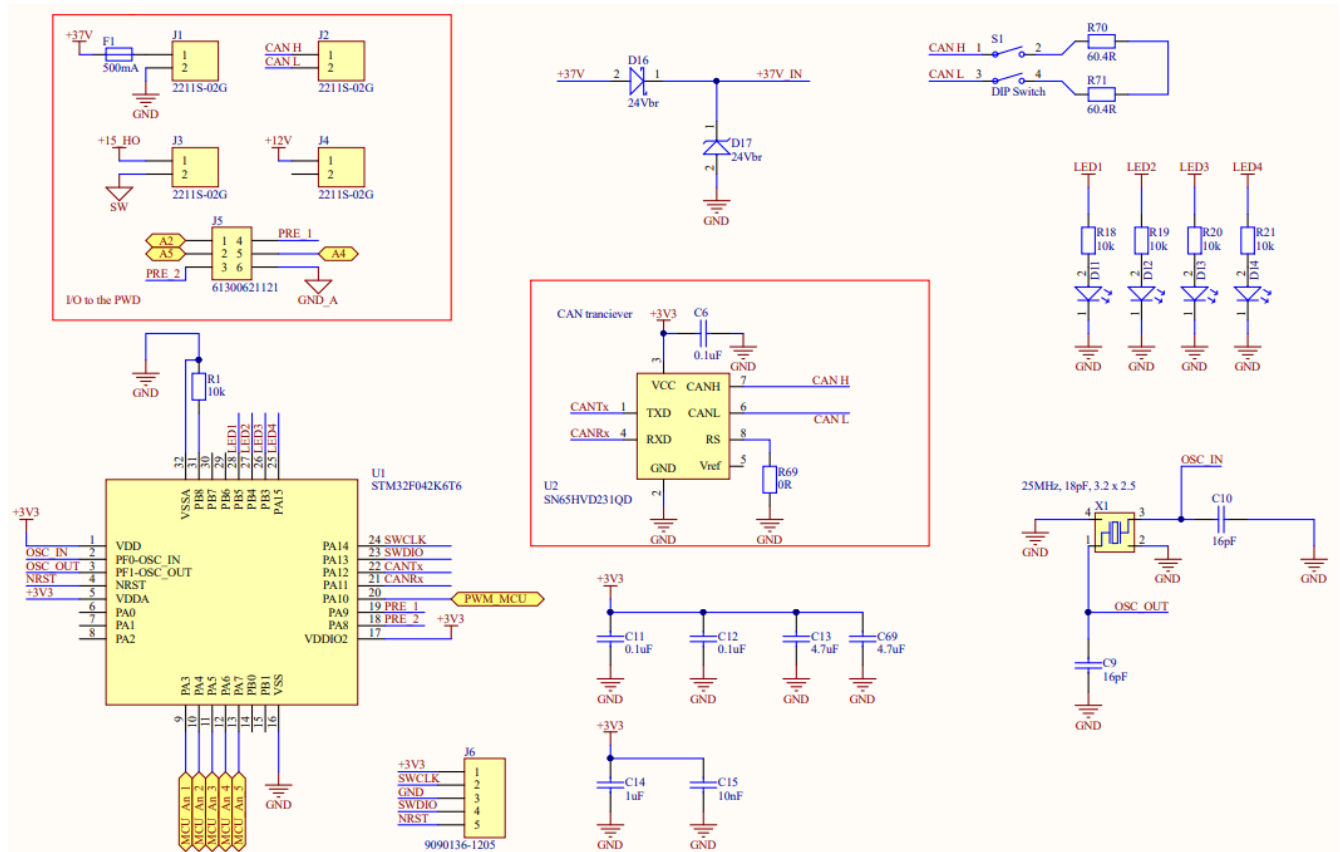
LISAD

Lisa 1. MCU skeem

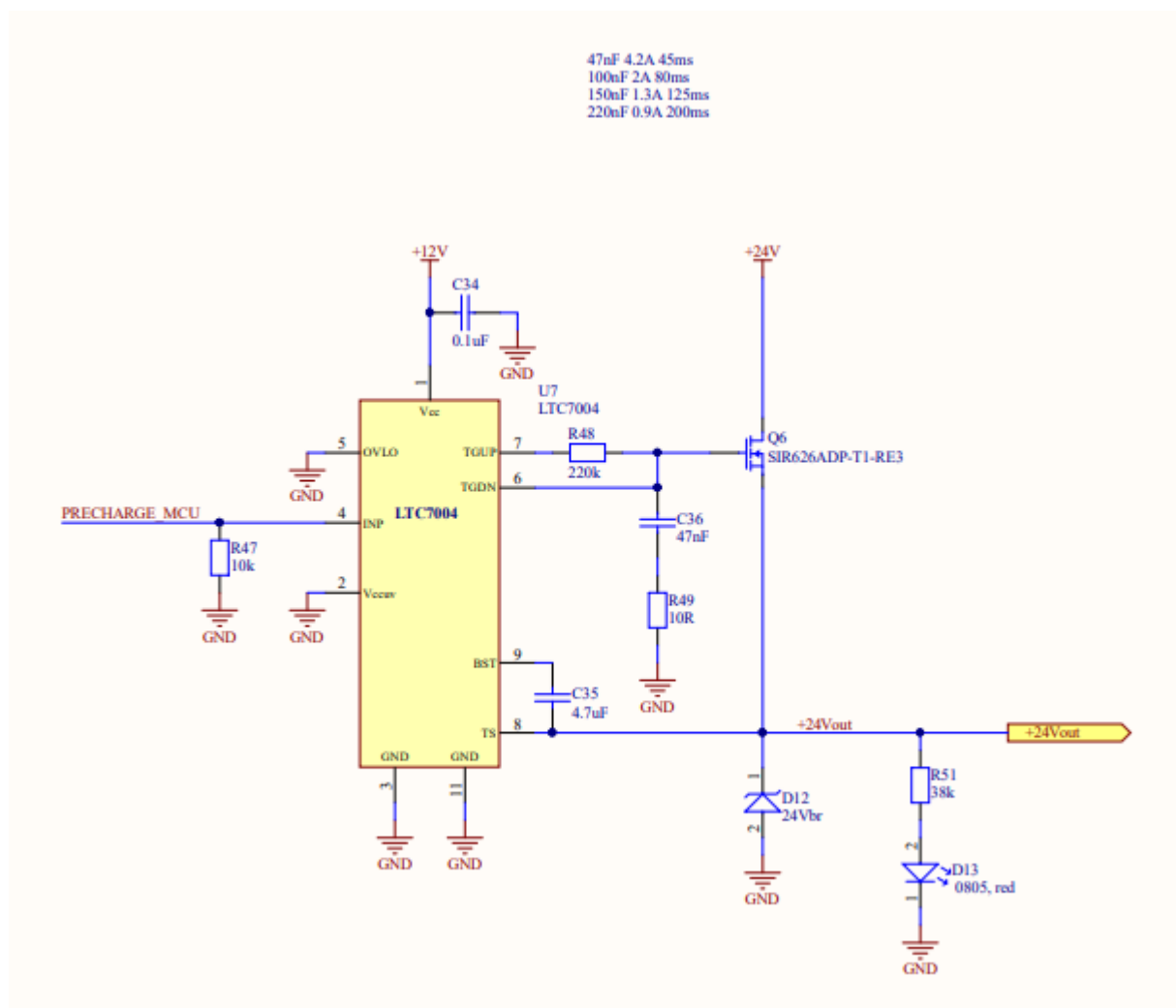
Lisa 2. Sujuvkäivitusahela skeem

Lisa 3. Jõuahela trükkplaadi skeem

Lisa 1. MCU skeem



Lisa 2. Sujuvkäivitusahela skeem



Lisa 3. Jõuahela trükkplaadi skeem

