

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Oliver Voorel

Humanoidrobot Semuboti toitesüsteemi uuendamine

Bakalaureusetöö (12 EAP)
Arvutitehnika eriala

Juhendajad:
arvutitehnika nooremteadur Renno Raudmäe , MSc
elektroonika spetsialist Teet Tilk , MSc

Tartu 2025

Humanoidrobot Semuboti toitesüsteemi uuendamine

Lühikokkuvõte:

Käesolev bakalaureusetöö keskendub humanoidrobot Semuboti toitesüsteemi edasi arendamisele, eesmärgiga tõsta süsteemi töökindlust, funktsionaalsust ja kasutusmugavust. Töö raames kaardistati eelnevate toiteallikate parameetrid ja tarbijate vajadused, mille põhjal vahetati välja roboti toiteallikad uue aku vastu. Aku integreerimine robotisse vajab täiendavate kinnituskomponentide, kuumvahetussüsteemi, voolupiiraja ja pingemuundurite disainimist ja testimist. Viimased kolm lisati kompaktsuse ja efektiivsuse eesmärgil ühise trükkplaadi peale. Töö käigus valminud lahendus vajab mugavaks ja turvaliseks kasutamiseks veel edasiarendust, mille jaoks koostati ka vastavad soovitusel.

Võtmesõnad: Semubot, humanoidrobot, aku, kuumvahetus, pingeregulaator

CERCS: T125 Automatiseerimine, robotika, juhtimistehnika

Upgrading the power system of the humanoid robot Semubot

Abstract:

This bachelor's thesis focuses on the further development of the power system of the humanoid robot Semubot, with the aim of improving the system's reliability, functionality, and user convenience. As part of the work, the parameters of the previous power supplies and the needs of the consumers were mapped, based on which the robot's power source was replaced with a new battery. Integrating the battery into the robot required the design and testing of additional mounting components, a hot swap system, a current limiter, and voltage converters. For the sake of compactness and efficiency, the latter three were integrated onto a single printed circuit board. The solution developed during this work still requires at least one further iteration to ensure convenient and safe use, for which corresponding recommendations have also been provided.

Keywords: Semubot, humanoid robot, battery, hot swap, voltage regulation

CERCS: T125 Automation, robotics, control engineering

Sisukord

Lühendid ja mõisted	5
Tabelite loend.....	6
Jooniste loend.....	7
1. Sissejuhatus	9
1.1 Probleemi tutvustus.....	9
1.2 Töö eesmärk	9
2. Kirjanduse ülevaade	11
2.1 Laiatarbe elektroonika ülevaade.....	11
2.1.1 Energia salvestamine	11
2.1.2 <i>Hot Swapping</i>	11
2.1.3 Pinge muundamine.....	12
2.2 Pingemuundurite tüübid	12
2.2.1 Pingejagur	12
2.2.2 Zener diodi kasutamine	13
2.2.3 LDO.....	13
2.2.4 <i>Buck Converter</i>	14
2.2.5 <i>Boost Converter</i>	15
3. Metoodika ja töövoog kirjeldus	18
3.1 Tööeelse olukorra kaardistamine.....	18
3.2 Aku valimine	18
3.3 Lisafunktsionaalsus	18
3.4 Pinge muundamine.....	18
3.5 Testimine ja integreerimine.....	18
4. Valminud lahendus	19
4.1 Kaardistamise tulemused.....	19
4.2 Nõuded.....	22
4.2.1 Nõuded akule	22
4.2.2 Nõuded toitesüsteemile	22
4.3 Süsteemi ülesehitus	23
4.4 Aku valimine	23

4.5 Trükkplaadi disain	24
4.5.1 Juhtkiipide valik	25
4.5.2 LTC4418 (<i>Dual Channel Prioritized PowerPath Controller</i>).....	25
4.5.3 LTC4226-2 (<i>Wide Operating Range Dual Hot Swap Controller</i>).....	27
4.5.4 LTC3895 (<i>Synchronous Step-Down DC/DC Controller</i>).....	28
4.5.5 Lisakomponendid	34
4.5.6 Komponentide paigutus.....	37
4.6 Toitesüsteemi integreerimine ja testimine	38
4.6.1 Aku.....	38
4.6.2 <i>Hot Swap</i>	40
4.6.3 Pingemuundurid	40
5. Kokkuvõte.....	42
Viited	43
Litsents	46

Lühendid ja mõisted

downstream - kasutatakse, et viidata elektroonikas alamsüsteemidele või komponentidele, mis järgnevad eeldatava elektrivoolu liikumise teekonnal.

BMS - ingl *Battery Management System*, aku haldamise süsteem, mille eesmärgiks on balanseerida aku elemente, kaitsta akut ülepinge ja liige tühjaks laadimise eest ning piirata vajadusel laadimissvoolu.

BOM - ingl *Bill of Materials*, koostu osade loetelu.

LDO - ingl *Low Dropout Regulator*.

Li-Ion - ingl *Lithium-Ion*.

LiFePO₄ - liitium-raudfosfaat aku.

LiPo - liitium polümeer aku.

läbilöögipinge - pinge minimaalne väärtus, millest piisab läbilöögikanali tekitamiseks isolaatoris; vastupinge minimaalne väärtus pooljuhil (nt diodil), millest piisab vastupidise suunaga juhtiva kanali tekitamiseks selles.

MOSFET - ingl *Metal oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, metalloksiidväljatransistor.

NMC - ingl *nickel manganese cobalt*, nikkel mangaan koobalt aku.

petrokeemia - maavarade keemilist koostist uuriv teadusharu, mis tööstusharuna tegeleb keemiatoodete valmistamisega naftast ja maagaasist.

polygon - polügoon, elektroonika disainis ühenduste loomiseks kasutatavad suured vaskalad, et parandada soojuseraldust ja vähendada raja takistust.

PWM - ingl *Pulse Width Modulation*, pulsi laiuse modulatsioon.

SOA - ingl *Safe Operating Area*, komponendi ettenähtud tööpiirkond.

talitlustsükkel - väljendab anduri impulsslaine emiteerimisperioodi ja vaikimis- ehk ooteperioodi suhet .

tugipinge - ingl *reference voltage*, juhtkiibi seesmiselt genereeritud võrdluspinge.

veavõimendi - ingl *error amplifier*.

Tabelid

1	Süsteemi tarbijate elektrilised omadused [2, 19]	20
2	Erinevate akude omaduste võrdlus	21
3	Funktsionaalne BOM	25
4	Väljundpinge kofigureerimine läbi VFB ja VPRG jala	29
5	Lülitamissageduse kofigureerimine FREQ jalaga	31
6	Kondensaatorite omaduste võrdlus	36

Joonised

1	Roboti toiteks kasutatavad akud: a - eriliikuri aku, b - LiPo aku	10
2	Erinevad akud: a - autoaku [4], b - makita akutööriistade aku [5], c - telefoni aku [6]	11
3	Zener dioodi kasutamise konseptsioon ideaaltingimustes [10]	13
4	<i>The two operating modes of a buck converter</i> [14]	14
5	<i>The two configurations of a Boost converter (On-state and Off-state)</i> [18]	16
6	a - alumiiniumprofiil toru 3D mudel, b - alumiiniumprofiil toru kinnituste 3D mudelid	19
7	Vana aku toes roboti küljes: a - ilma akuta, b - koos akuga	20
8	Tööle eelnev toitesüsteemi ülesehitus: rohelisega märgitud süsteemi osad, punasega märgitud planeeritud, kuid veel implementeerimata süsteemi osad	21
9	Toitesüsteemi ülesehitus: rohelisega märgitud juba olemasolevad süsteemi osad, lillaga märgitud töö käigus vastavalt nõuetele valitud komponendid, kollasega märgitud töö käigus disainitud komponendid	23
10	Trükkplaadi funktsionaalne plokk skeem	24
11	Töö raames disainitud <i>Hot Swap</i> elektriskeem kasutades LTC4418 juhtkiipi	26
12	Töö raames disainitud LTC4226-2 elektriskeem	28
13	Töö raames disainitud pingemuundurite elektriskeem	29
14	Töö raames disainitud LTC3895 elektriskeemi 5V osaskeem	30
15	Töö raames disainitud LTC3895 elektriskeemi 19V osaskeem	30
16	LTC3895 andmelehe graafik sageduse konfigureerimiseks [25]	32
17	Kompenseerimata pingeregulaatori reaktsioon koormuse muutustele [28]	33
18	Kompenseeritud pingeregulaatori reaktsioon koormuse muutustele [28]	33
19	Tüüpiline MOSFET SOA graafik [29]	35
20	Trükkplaadi disain Altium Designeris	37
21	Funktsionaalsete plokkidena jagatud trükkplaadi 3D vaade	37
22	Modelleeritud aku hoidja: a - alt vaade, b - pealt vaade	38
23	Uus aku integreeritud roboti külge	39
24	Kommertslikult kasutatavad pingemuundurid ajutise lahendusena	39
25	Eraldunud kuumusest läbi põlenud kondensaator	41

1. Sissejuhatus

1.1 Probleemi tutvustus

Sotsiaalsete humanoidrobotite arendamine ja kasutuselevõtt on tänapäeval hoogsalt kasvav trend. Humanoidrobotid sarnanevad inimesele nii käitumise kui ka välimuse poolest ning nende eesmärgiks on enamasti pakkuda tuge hariduses, tervishoius, teeninduses ja sotsiaalhoolduses. Konkreetsemate näidetena võib välja tuua eakate hoolduse, erivajadustega inimeste abistamise ja õpetamise ning samuti tööjõupuuduse leevendamise teenindussektoris.

Sotsiaalsete humanoidrobotite suurim eelis on nende võimes suhelda inimestega loomulikult ja emotsionaalsel viisil. Erinevalt varasematest traditsioonilistest tööstusrobotitest on neil oskus jäljendada inimeste näoilmeid ja kehakeelt, mis võib pakkuda olulist emotsionaalset tuge ning suurendada inimeste kaasatust ja heaolu. Näiteks tervishoiusektoris on sellised robotid abiks patsientide motiveerimisel ja raviprotseduuride jälgimisel, aidates kaasa patsientide kiiremale taastumisele. Samuti on neil potentsiaal parandada õppijate motivatsiooni ja tulemusi hariduskeskkonnas, olles nii kaasavad kui ka kohanduvad vastavalt õppija vajadustele. [1]

Pidevalt kasvav vajadus selliste robotite järele on ajendiks välja arendada vabavaraline sotsiaalne humanoidrobot Semubot. Täpsemalt keskendub töö Semuboti toitesüsteemi uuendamisele.

1.2 Töö eesmärk

Tööle eelnevalt koosnes Semuboti elektriskeemi toitesüsteem kahest erineva nominaalpingega akust.

Pardarvutit Intel Nuc 13 Pro [2], mille peamiseks eesmärgiks on stabiilse infovahetuse tagamine välismaailmaga, toitis üks 4-elementiline LiPo (JOONIS 1) aku. Vaatamata suurele energiatihedusele ei suuda antud mahutavusega LiPo tagada arvuti tööd kogu päeva vältel.

Teise toiteallikana on kasutusel oluliselt suurem ja raskem 7-elementiline eriliikuri aku (JOONIS 1), mida võib välimuse ja kaalu poolest samastada autoakule. See aku on piisava mahutavusega, et tagada ülejäänud roboti süsteemidele vajalik töövool kogu päeva vältel, kuid tulenevalt toiteallika kaalust ja kujust on ligipääs akule piiratud, mis raskendab oluliselt aku laadimist ja takistab roboti pikemajalist sihtotstarbelist kasutamist.



(a)



(b)

Joonis 1. Roboti toiteks kasutatavad akud: a - eriliikuri aku, b - LiPo aku

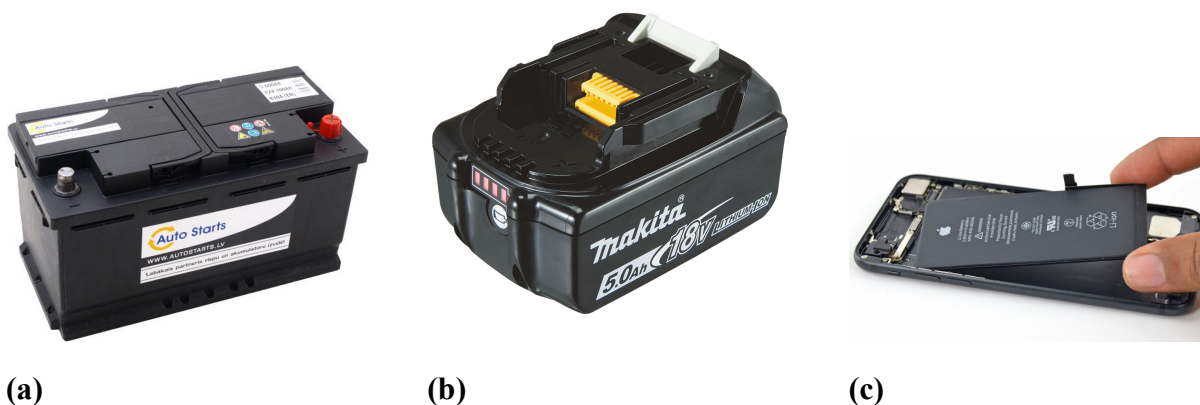
Lõputöö eesmärgiks on kaardistada elektriskeemide lubatavad pingevahemikud ja voolu tarbimine. Seejärel vastavalt nendele parameetritele välja valida uus aku, mis kõrvaldaks võimalikult palju ja suures mahus eelnevate toiteallikate puudusi, ning integreerida see toitesüsteemi osaks.

2. Kirjanduse ülevaade

2.1 Laiatarbe elektroonika ülevaade

2.1.1 Energia salvestamine

Tehnoloogia arenguga koos on läbi aegade pidevalt kasvanud ka vajadus efektiivsemate energia tootmis- ja salvestamistehnoloogiate järele. Mobiilsete robotite areng aitab kaasa just salvestamistehnoloogiate arengule, kuna liikuvad robotid vajad pidevalt stabiilset ja efektiivset energiaallikat. Energia salvestamiseks on mitmeid tehnoloogiaid, millest levinumad on *fuel cell* ehk kütuseelementidel põhinev tehnoloogia ja erinevad akutehnoloogiad (NMC, LiPo, LiFePO₄ jt). Kütuselemendid on küll üldiselt suurema energiatihedusega ja nende kasutamine on keskkonnasõbralikum, kuid oluliselt kallim ja keerukam [3], mistõttu laiatarbeelektronikas (nutitelefonid, sülearvutid, robottolmuimejad, akutööriistad, auto elektroonika jne (JONIS 2)) ja ka Semubotis kasutatakse energia talletamiseks just akusid.



Joonis 2. Erinevad akud: a - autoaku [4], b - makita akutööriistade aku [5], c - telefoni aku [6]

2.1.2 Hot Swapping

Tänapäeva konkurentsitihedas maailmas on nii tööstusprotsesside katkematu toimimine kui ka kasutajamugavuse tagamine ülioluline. *Hot-swap* tehnoloogia võimaldab komponentide vahetamist või lisamist ilma süsteemi seiskamata. See on eriti oluline suurtes tootmisüksustes ja meditsiinivaldkonnas, kus iga seisak võib põhjustada märkimisväärset kahju. Konkreetsemalt võib välja tuua, et lisaks meditsiinivaldkonnale on *Hot Swap* võimekuse tähtis ka petrokeemia, energeetika ja transpordi tööstusharudes, mis on kõik normaalseks igapäeva elu toimimiseks väga vajalikud tööstusharud. [7]

Toite *hot Swap* funktsionaalsuse kasutamist on näha ka laiatarbeelektronikas, nagu robottolmuimejad, sülearvutid, nutiseadmed ja muud aku toitel töötavad seadmed. Autor julgeb väita, et väga keeruline oleks müüa tänapäeval näiteks telefoni, mille laadimiseks tuleks aku eemaldada või telefon välja lülitada.

2.1.3 Pinge muundamine

Vajadus pinge muundamise järele käib käsikäes elektrienergia tootmise ja salvestamisega. Alalisvoolumuundurid (DC- DC) on kasutusel olnud juba alates 1920ndatest ning neil on lai rakendusala tööstuses, arvutite riistvaras ja taastuenergia tootmissüsteemides. Esmalt kasutati *boost*-tüüpi muundureid, millest on aja jooksul välja kasvanud mitmed teised muundurid. Viimastel aastatel on just DC- DC muundurite tehnoloogia kiiresti arenenud. Ülemaailmne DC- DC muundurite turg kasvas 2016. aastal 3,46 miljardi USA dollarini ja prognooside kohaselt ulatub see 2021. aastaks 3,94 miljardi dollarini, aastaseks kasvumääraks (CAGR) hinnatakse 2,66%. Kuna vajadus energia tootmise järele kasvab pidevalt, siis kasvab ka pingemuundurite olulisus. [8]

2.2 Pingemuundurite tüübid

2.2.1 Pingejagur

Antud pingemuundur suudab väljundis tagada vaid sisendpingest väiksemat pinget. Muundur on väga lihtne ja vajab vaid kahte takistit, millest tulenevalt on tegemist ka väga töökindla ja odava pingemuunduriga.

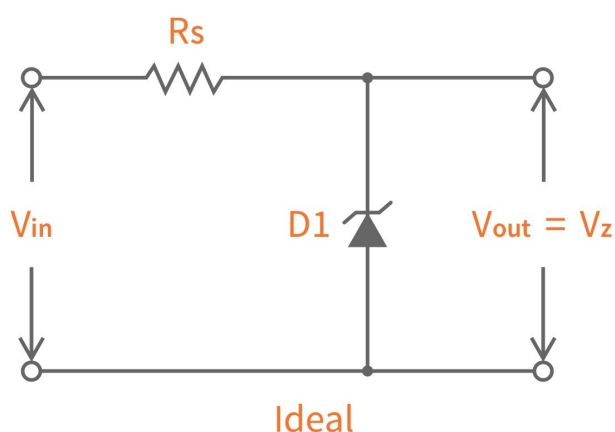
Tööpõhimõte seisneb selles, et vooluringi läbides kasutatakse ära kogu vooluallika potentsiaal (pingete erinevus). Suletud vooluringis läbib igat vooluringi komponenti sama kogus voolu. Ohmi seadusest ($I = U/R$) tulenevalt peab vool suurema takistuse läbimiseks tegema rohkem tööd, mistõttu langeb vastava takisti otstele suurem pinge ehk kasutatakse ära suurem kogus toiteallika potentsiaali. Toitepingest madalam pinge mõõdetakse just pärast esimest takistit, sest osa takistust on juba läbitud, kuid osa on veel ees. Väljundpinge sõltub otseselt esimese ja teise takisti omavahelisest suhtest ning on alati võrdne teise takisti peal langeva pingega.

Selle pingemuunduri väga suur puudus tuleneb tema tööpõhimõttest. Kuna väljundpinge sõltub takistite omavahelisest suhtest, siis iga koormuse lisamine väljundisse muudab koheselt takistuste suhet, mistõttu ei ole selle pingemuunduri väljundist võimalik võtta töö tegemiseks voolu.

2.2.2 Zener diodi kasutamine

Zener diodid on erilised oma väga kindla läbilöögipingega ning neid on samamoodi võimalik kasutada madalama väljundpinge saamiseks kõrgemast sisendpingest. Zener diodide kasutamine on sarnaselt eelnevale pingemuundurile väga lihtne ja töökindel, kuna vajab vaid kahte komponenti, diodi ja takistit.

Tööpõhimõtte seisneb Zener diodi vooluringi asetamisele vastupingestatult ning väljundpinge moodetakse vahetult pärast takistit ja enne Zener diodi (JOONIS 3). Kindel läbilöögipingega ja suur voolu juhtivus läbilöögi pingest kõrgemate pingete juures tagab, et vastupingestatud diod hoiab väljundpinget võrdsena läbilöögipingega. [9]



Joonis 3. Zener diodi kasutamise konseptsioon ideaaltingimustes [10]

Ka selle pingemuunduri puudus tuleneb otseselt tema tööpõhimõttest suunata suur kogus voolu maasse. Selline voolu raiskamine on väga ebaefektiivne viis pingega muundamiseks, eriti kui sisend- ja väljundpinge erinevus on väga suur. Lisaks kaasneb suure vooluga ka suur võimsus ning seega vajavad sellised süsteemid pidevat jahutust.

2.2.3 LDO

LDO ehk madala pingelanguga regulaator on samuti pingega alandamiseks kasutatav lahendus, mille eeliseks on võimalus saavutada väljundis stabiilne ja täpne pingega ka siis, kui sisend- ja väljundpinge erinevus on väga väike. LDO kasutab täpsemat ja reguleeritavat vooluringi, mille peamised komponendid on tugpinge, veavõimendi ja juhttransistor. Tööpõhimõtte seisneb selles, et regulaator võrdleb väljundpinget sisseehitatud täpse tugipingega ja kasutab veavõimendit selle erinevuse analüüsimiseks. Veavõimendi reguleerib omakorda juhttransistorit, mis määrab, kui palju voolu lastakse sisendist väljundisse. Kui väljundpinge kaldub soovitud kõrvale,

reguleeritakse transistorit vastavalt, et taastada soovitud pinge. Selline aktiivne reguleerimine tagab stabiilse väljundpinge ka koormuse muutumise ja sisendpinge kõikumise korral.

LDO suur eelis on madal müratase ja kiire reageerimine pingekõikumistele, mistõttu sobib see tundlikele analoog- või digitaalahelatele. Lisaks on LDO töö väga vaikne, kuna puuduvad füüsilised lülitused.

Sarnaselt Zener diodiga reguleerimisele on LDO oluliseks puuduseks kasutamata potentsiaali soojuseks muutmine, mis on ebaefektiivne ja vajab sageli jahutust. [11]

2.2.4 Buck Converter

Järgnev pingemuunduri ülesehitust ja kasutamiskorda kirjeldav alapeatükk põhineb allikatel [12–15]. Töö raames on välja toodud olulisemad põhimõtted.

Buck Converter on nimetatud pingemuunduritest levinuim ning selle eesmärgiks on muundada kõrgem sisendpinge madalamaks väljundpingeks. Selle pinget vähendava muunduri olulisteks komponentideks on transistorid, diod (võib asendada transistoriga), induktor, *compensation network*, tagasiside ahel ja kõige olulisema osana mikrokontroller või PWM kontrolleri.

Buck converteri tööpõhimõte seisneb toitepinge perioodiliselt sisse ja välja lülitamisel. Lülitusi kontrollib vastav mikrokontroller, avades ja sulgedes lülitustransistoreid kõrgetel sagedustel (kuni 1 MHz). Kui vooluallika poolne transistor on sisse lülitatud ehk moodustub suletud vooluring läbi koormuse, siis liigub vool toiteallikast läbi transistori, induktori ja koormuse GND-i (JOONIS 4 *On-state*). Sama transistori välja lülitamisel jätkub induktoris salvestunud magnetvälja mõjul voolu liikumine läbi koormuse (JOONIS 4 *Off-state*).



Joonis 4. *The two operating modes of a buck converter* [14]

Seega sõltub väljundpinge vooluallika poolse transistori sisse ja välja lülitamise omavahelisest suhtest. On omakorda selge, et sellise loogikaga ei ole võimalik väljundis saavutada sisendpingest kõrgemat pinget, kuna äärmisel juhul on vooluallika poolne transistor 100% ajast sees ning siis on väljundpinge võrdne sisendpingega.

Lülitustransistori talitlustsükli (*duty cycle*) määrab mikrokontroller vastavalt väljundpingele, mida mõõdetakse pidevalt läbi väljundisse ühendatud tagasisideahela. Levinuim tagasiside ahel on lihtne pingejagur, mille väljundit võrreldakse pidevalt seismise tugipingega.

Eelised

- **Kõrge efektiivsus:** Kuna energia ei muundu soojuseks läbi takistuse, vaid salvestatakse induktoris magneväljana, on efektiivsus tihti üle 90%.
- **Sobib suurte koormuste jaoks:** Väiksemad energiakaod võimaldavad toita suuremat koormust liigse soojuseralduseta.
- **Muutuv sisendpinge ja väljundkoormus:** Aktiivne väljundpinge jälgimine ja töösageduse reguleerimine tagab stabiilse väljundpinge ka muutuva sisendpinge ja väljundkoormuse korral.

Puudused

- **Komplekssus:** Võrreldes lihtsate takistite või LDO-dega on Buck converterite skeem keerukam ning vajab hoolikat kujundamist ja lisateadmisi (nt õige lülitusageduse ja komponentide valimine).
- **Elektromagnetiline kiirgus (EMI):** Pidevad kiired lülitused tekitavad müra ja häireid, mis võivad mõjutada tundlikke seadmeid või signaale. Selle vältimiseks on vajalik head maandus- ja varjestuslahendused.
- **Voolukõikumine:** Tulenevalt skeemi tööloogikast ei ole toiteallikas koormusega pidevalt ühendatud. Seega ei suuda skeem tagada oma töösagedusest kiirematele koormuse kõikumistele stabiilset pinget. Seda on võimalik osaliselt kompenseerida väljundisse kondensaatori lisamisega.
- **Väljundsignaali pulsatsioon:** Kuigi kondensaator lisamine väljundisse aitab siluda pinge kõikumisi, ei ole väljundpinge kunagi täielikult stabiilne, mistõttu vajavad väga tundlikud väljundskemid täiendavat silumist või filtreerimist.

2.2.5 Boost Converter

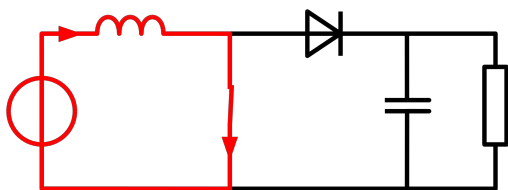
Järgnev pingemuunduri ülesehitust ja kasutamiskorda kirjeldav alapeatükk põhineb allikatel [16, 17]. Töö raames on välja toodud olulisemad põhimõtted.

Boost converter on ülesehituse ja tööloogika poolest sarnane *Buck Converter*ile, kuid erinevusena on tema eesmärgiks muundada madalam sisendpinge kõrgemaks väljundpingeks. Seda tüüpi pingemuundurit kasutatakse olukordades, kus toiteallika väljundvool on kõrgem, kui koormuse töövool, kuid toiteallika pinge pole piisavalt kõrge.

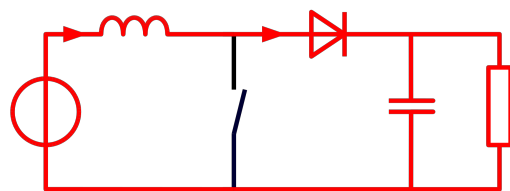
*Boost converter*eri põhikomponendid on lülitustransistor (enamasti MOSFET), diood, induktor, tagasiside ahel ja töö juhtimiseks vajalik mikrokontroller või PWM kontrolleri.

Üldine tööpõhimõte seisneb induktoris magnetväljana salvestatud energia liitmisel toiteallika potentsiaalile. Transistori sisse lülitamisega lühistatakse induktor ning seega salvestatakse induktoris toiteallika energiat magnetvälja abil (JOONIS 5 *On-State*). Transistori välja lülitamisel taastatakse vooluring läbi koormuse ning lisaks toiteallikale teeb ka induktor endas salvestatud energia arvelt tööd, et suunata voolu läbi koormuse. Seega langeb koormusele lisaks toiteallika pingele ka induktori poolt tekitatud pinge (JOONIS 5 *Off-State*).

On-State



Off-State



Joonis 5. *The two configurations of a Boost converter (On-state and Off-state)* [18]

On selge, et sellise loogika abil ei ole väljundis võimalik saavutada sisendpingest madalamat pinget, kuna sisendpingele liidetakse alati juurde.

Väljundpinget hoitakse kontrolli all tagasisideahela abil, mis mõõdab väljundpinget pingejaguri abil ja võrdleb seda sisemise tugipingega. Võrdluse põhjal määrab mikrokontroller transistori talitlustersükli. Pikem talitlustersükkel tähendab rohkem salvestatud energiat ja seega kõrgemat väljundpinget.

Eelised

- **Hea efektiivsus:** Õige disaini korral võib efektiivsus ulatuda 85–95%.
- **Pidev ühendus toiteallikaga:** Erinevalt *Buck Converter*ist on toiteallikas pidevalt koormusega ühendatud, mis vähendab voolu kõikumisi koormusel.
- **Kompaktne lahendus:** Ei vaja suurt transformaatorit ega mitmeelemendilisi akupakke.

- **Muutuv sisendpinge ja väljundkoormus:** Aktiivne väljundpinge jälgimine ja töösageduse reguleerimine tagab stabiilse väljundpinge ka muutuva sisendpinge ja väljundkoormuse korral.

Puudused

- **Pinge tõstmisel vool väheneb:** Kuna toiteallikas ei muutu iseenesest võimsamaks, siis võimsuse valemist ($P = U \times I$) tulenevalt peab voolutugevuse ja pinge korrutis jääma samaks. Seega kõrgema pinge korral peab väljundvool olema väiksem kui sisendvool.
- **Pingepulsatsioon:** Kiire lülitamine tekitab väljundisse pulsatsioone, mis võivad tundlikke koormuste korral vajada lisa filtreerimist.
- **Elektromagnetiline müra (EMI):** Pidevad kiired lülitused tekitavad müra ja häireid, mis võivad mõjutada tundlikke seadmeid või signaale. Selle vältimiseks on vajalik head maandus- ja varjestuslahendused.
- **Keerulisus:** Nõuab rohkem teadmisi ja tähelepanu komponentide valikul võrreldes lihtsate lineaarregulaatoritega (nt LDO või Zener-diod).

3. Metoodika ja töövoog kirjeldus

3.1 Tööeelse olukorra kaardistamine

Esimese sammuna oli vaja kaardistada töö hetkeolukord ja sellest tulenevalt püstitada ka nõuded. Lisaks annab hetkeolukorra kaardistamine parema ülevaate vaja minevast lisafunktsionaalsusest. Süsteemi kaardistamine viidi läbi selle komponentide tootjate spetsifikatsioonide analüüsi ning süsteemi töötingimustes testimise kaudu.

3.2 Aku valimine

Pärast toitesüsteemi nõuete selgitamist tuli keskenduda sobiva aku valikule. Analüüsiti erinevaid aku keemilisi koostisi (nt Li-Ion, LiFePO₄, NMC) ja nendega kaasnevat omadusi. Otsuse langetamisel olid määravateks faktoriteks aku mahutavus, laadimiskiirus, maksimaalne väljundvool ja saadavus. Lisaks on oluline välja tuua, et roboti kandevõime ja sisemõõtmelised seadsid omakorda vastavad piirangud. Teisejärguliste näitajatena võeti arvesse võimalike laadimistsükli arvu, nominaalpinget ja hinda.

3.3 Lisafunktsionaalsus

Roboti kasutamismustrist tulenevalt oli tekkinud vajadus, et süsteemi toiteallikaid oleks võimalik vahetada jooksvalt. Selleks lisati toitesüsteemile *hot swap* võimekus, mis võimaldab akupaketi või välist toiteallikat ühendada või eemaldada süsteemi tööd katkestamata. Seejuures analüüsiti erinevate mikrokontrollerite tootjate pakutavaid lahendusi.

3.4 Pinge muundamine

Esiotsuseks oli kasutuses mitu akut, kuna süsteemi osade nõutavad pingevahemikud ei kattunud. Seega oli ilmselge vajadus muundada muutuv akupinge stabiilseteks väljundpingeteks. Selle käigus analüüsiti erinevate pinge muundamis tehnoloogiate eeliseid ja puudusi. Muuhulgas võeti arvesse muundurite võimekust kohaneda muutuva sisendpinge ja väljundkoormusega.

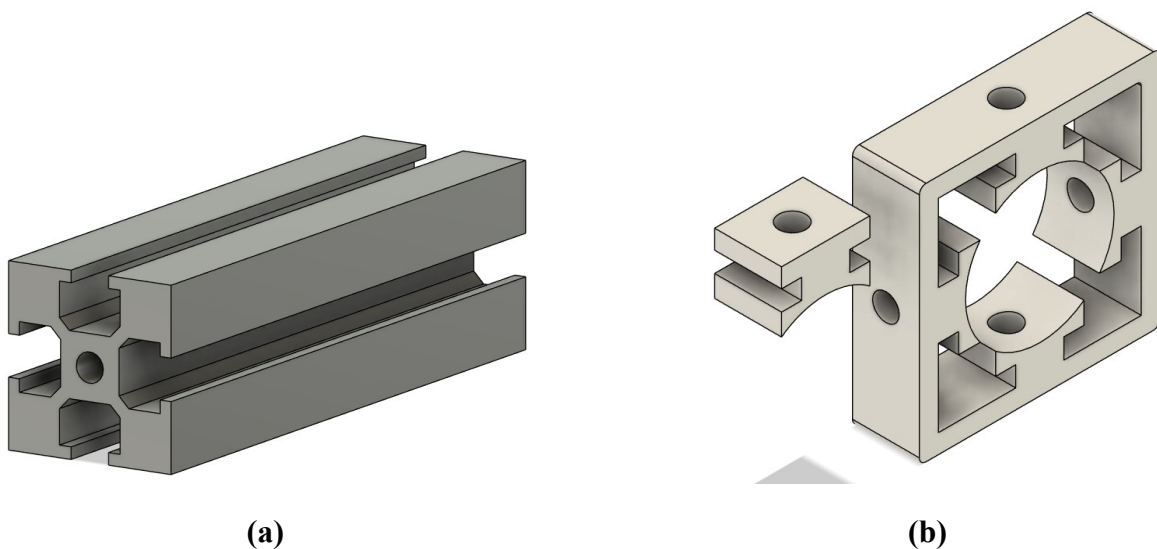
3.5 Testimine ja integreerimine

Testimise ja integreerimise etapi eesmärgiks on kõigi moodulite ühiseks tervikuks ühendamine. Selleks tuleb järkjärguliselt testida iga alamsüsteemi eraldiseisvat töötamist ja võimalusel/vajadusel parandada tekkinud vead. Kui esineb vigu, mis ei ole jooksvalt parandatavad, siis tuleb need üles märkida järgmiseks edasiarenduseks.

4. Valminud lahendus

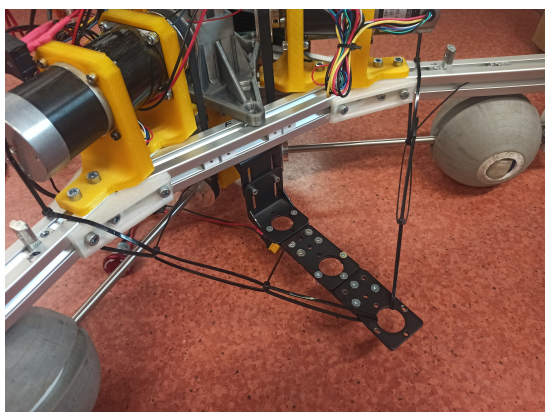
4.1 Kaardistamise tulemused

Roboti põhikonstruktsioon on ehitatud alumiiniumprofiil torudest (JOONIS 6), mis on omavahel kinnitatud erinevate 3D prinditud ühendustega. Torude iseloomulikust profiilist tulenevalt on nende külge lihtne tugevalt kinnitada lisaseadmeid kasutades ära profiili süvendeid ja vajadusel polte. Joonisel 6 on näha kaks võimaliku kinnitusstiili, mis libistatakse alumiiniumprofiili siine mööda vajalikku kohta. Selline kinnitusviis tagab tugeva ühenduse ja on samaaegselt hästi kohalduv tuleviku edasiarendustele.

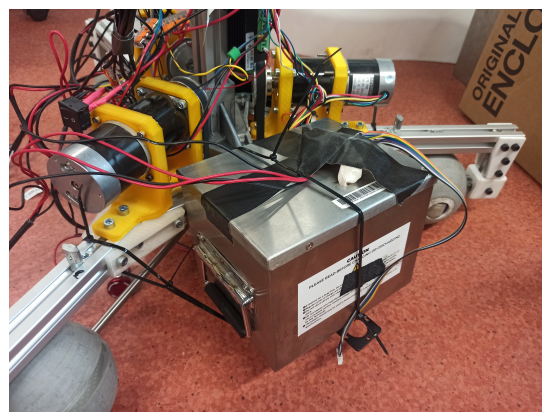


Joonis 6. a - alumiiniumprofiil toru 3D mudel, b - alumiiniumprofiil toru kinnituste 3D mudelid

Eirliikuri aku oli kinnitatud konstruktsiooni külge metallnurdade ja kaablivitsadega (JOONIS 7), mis ei ole pikas perspektiivis piisavalt töökindel lahendus.



(a)



(b)

Joonis 7. Vana aku toes roboti küljes: a - ilma akuta, b - koos akuga

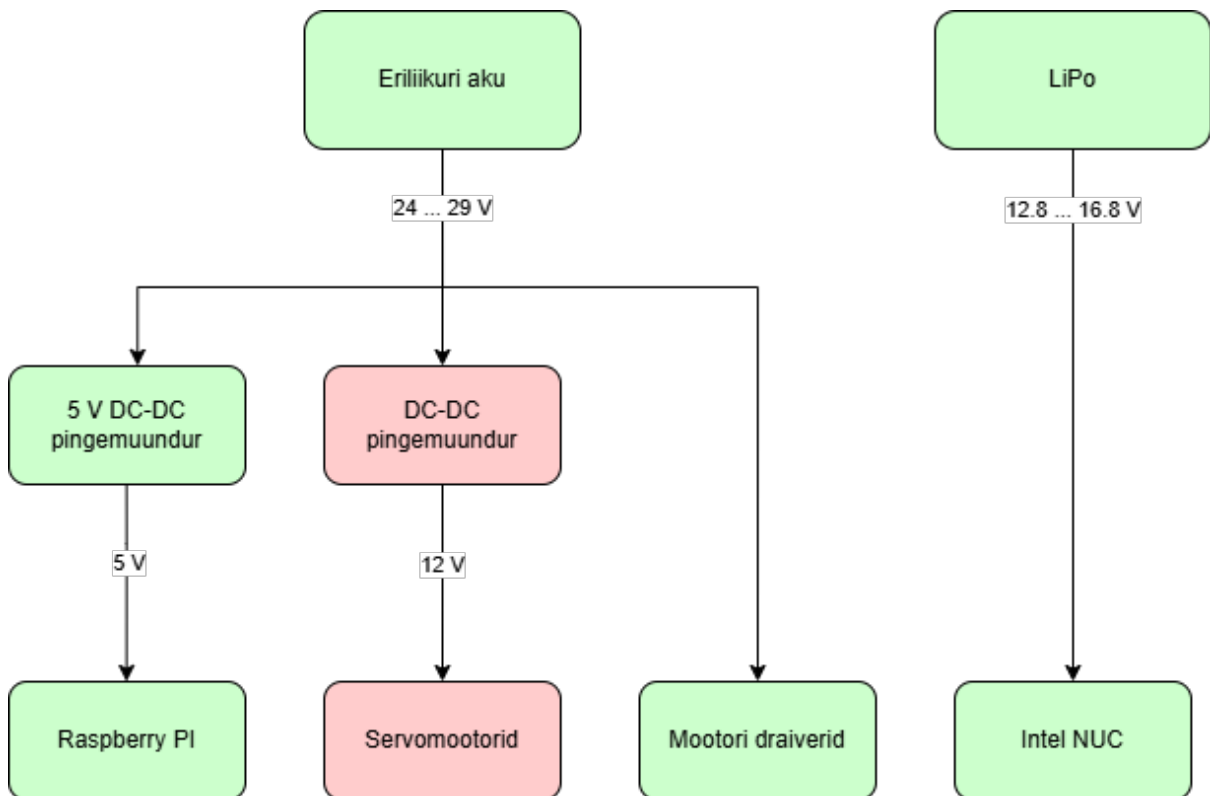
Kaardistamise käigus kogutud andmete põhjal määratleti süsteemi olulisemad tööparameetrid ning tehnilised piirangud, mis seadsid aluse edasistele projekteerimisotsustele. Kaardistamise tulemused süsteemi tarbijate kohta kanti tabelisse 1 ning kasutuses olevate akude (JOONIST 1) kohta tabelisse 2. Tööle eelnev toitesüsteemi ülesehitus on visualiseeritud joonisel 8.

Tabel 1. Süsteemi tarbijate elektrilised omadused [2, 19]

Tarbijad	Nimipinge (V)	Koormusvool (A)	Võimsus (W)
Intel NUC 13	12 ... 20	4.5 ... 10	90 ... 120
Mootorite juhtmoodulid koos mootoritega	24	<6	144
Raspberry Pi	5	<1	<5
Servomootorid (tarbimine ühe kohta)	5 ... 12	0.5 ... 3	<36

Tabel 2. Erinevate akude omaduste võrdlus

Aku	Keemiline koostis	Mahutavus (Ah)	Elementide arv	Elemendi nimipinge (V)	Aku nimipinge (V)
Eriliikuri aku	NMC	39.6	7	3.6	25.2
LiPo	Liitium Polümeer	5.2	4	3.2 ... 4.2	12.8 ... 16.8



Joonis 8. Tööle eelnev toitesüsteemi ülesehitus: rohelisega märgitud süsteemi osad, punasega märgitud planeeritud, kuid veel implementeerimata süsteemi osad

4.2 Nõuded

4.2.1 Nõuded akule

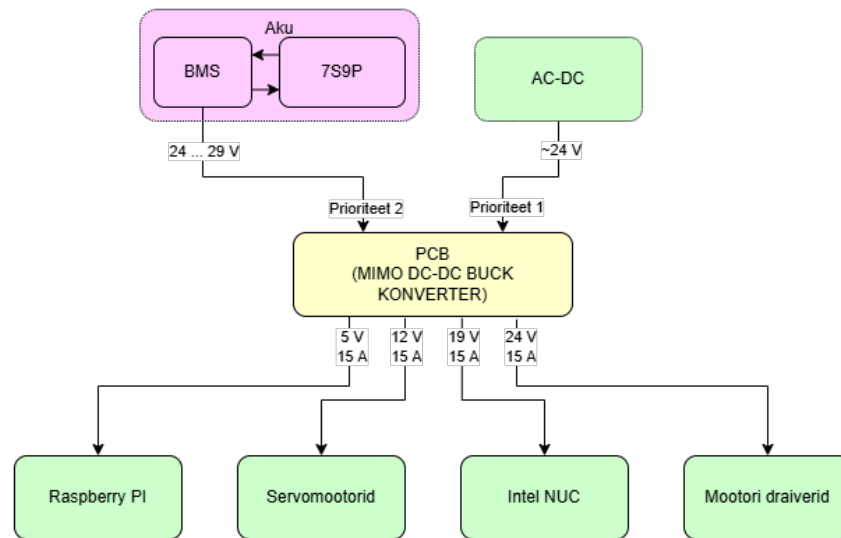
- Aku peab võimaldama robotil sihipäraselt töötada 8 h.
- Aku peab mõõtmetelt ja kujult mahtuma olemasoleva roboti korpusesse.
- Aku peab olema hallatud ja kaitstud BMSi poolt.
- Akut laadimine ei tohi vajada selleks spetsiifiliselt mõeldud laadijat. Akut peab olema võimalik laadida üldlevinud madalama klassi toiteplokkidest.
- Aku peab olema suuteline tagama kõikidele süsteemi osadele samaaegselt voolu ehk maksimaalne väljund voolu tugevus peab olema vähemalt 30 A.
- Akut peab olema võimalik laadida vähemalt 10 A voolutugevusega.
- Aku peab võimalusel koosnema kommertslikult üldlevinud akumoodulitest, et lihtsustada edasisi parandus-, hooldus- ja arendustöid.

4.2.2 Nõuded toitesüsteemile

- Toitesüsteem peab häireteta toimima muutuva sisendpingega.
- Toitesüsteem peab kaitsma *downstream* komponente ülepinge ja liigse voolu eest.
- Toitesüsteem peab võimaldama vahetada sisend toiteallikat robotit välja lülitamata.
- Toitesüsteem peab tagama alamsüsteemidele sobivad pingevahemikud.
- Toitesüsteem peab võimaldama alamsüsteemide tööks vajalikku voolutugevust.

4.3 Süsteemi ülesehitus

Süsteemi üldine ülesehitus on visualiseeritud joonisel 9.



Joonis 9. Toitesüsteemi ülesehitus: rohelisega märgitud juba olemasolevad süsteemi osad, lillaga märgitud töö käigus vastavalt nõuetele valitud komponendid, kollasega märgitud töö käigus disainitud komponendid

4.4 Aku valimine

Vastavalt kaardistamise tulemustele ja seatud kasutusnõuetele oli oluline valida sobiv aku, mis vastaks nii elektrilistele kui ka füüsilistele nõuetele. Aku valimise protsess sisaldas mitut järjestikust sammu: aku nimipinge valik, sobivuse hindamine ning lõplik otsuse langetamine.

Nimipinge valikul oli oluline silmas pidada süsteemi tarbijate pingevajadusi, plaanitavate pingemuundurite töövahemikke ning aku sobivust valitud laadimisskeemiga, et tagada stabiilne ja efektiivne töö kogu toitesüsteemi ulatuses. Valituks osutus 24 V, kuna see on kõigi süsteemi tarbijate sobivatest pingevahemikest kõrgeim standartne aku nimipinge, mis võimaldab pinge muundamisel kasutada samalaadseid tehnoloogiaid suurendades seeläbi töökindlust ja parandatavust. Sellest kõrgema pinge (nt 36 V või 48 V) valimisel ei oleks olulisi eeliseid, kuna see tähendaks, et roboti tööks oleks tarvis rohkemate jadamisi ühendatud elementidega akut. Rohkem elemente muudab aku ehitamise kallimaks ja keerulisemaks. Lisaks võimaldab madalam pinge akut laadida ka odavamatest ja enimlevinud toiteplokkidest, mille maksimaalne väljundpinge on sageli kuni 30 V.

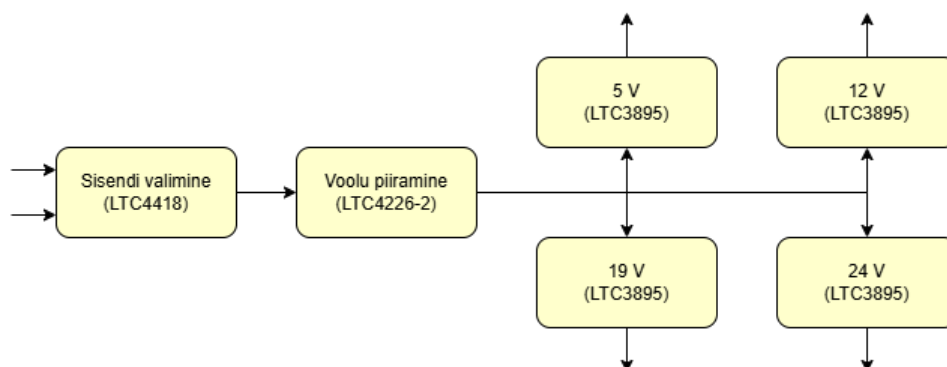
Sobivust hinnates võeti esmajärjekorras arvesse aku mahtuvust ja maksimaalsed väljundvoolu. Nõuetest tulenevalt pidi toiteallikas suutma süsteemi töös hoida terve tööpäeva. Kaardistamise tulemusena täheldati, et maksimaalne hetkeline töövool võib ulatuda kuni 25 A, kui kõik mootorid saavad samaaegselt käskluse alustada liikumist. Pideva koormusena on aga peamiseks tarbijaks pardaarvuti Intel NUC, mis tarbib õige toitepinge korral keskmiselt 5 A [20]. Roboti eesmärgist tulenevalt ei liigu robot pidevalt ringi ning mootorite vool on ühtlasel töötamisel oluliselt väiksem kui käivitusvool, seega võiks aku mahtuvus olla natuke üle $5A * 8h = 40Ah$. Lisaks aitab akut säästa ka töö raames valmiv *hot swap* võimekus, mis võimaldab süsteemil töötada väiksema mahtuvusega akuga pikemalt.

Peale mahtuvuse ja maksimaalse väljundvoolu oli sobivuse hindamise juures oluline arvesse võtta roboti välimusest ja ehitusest tulenevaid füüsilisi piiranguid ja ka saadavust.

Kõiki asjaolusid arvestades sai uueks toiteallikaks valitud ExoCool OÜ (Tõuksimaailm) poolt kokku pandud 24 V nimipingega tõukeratta aku. Nad võimaldasid tellida erineva nimipingega, mahutavuse ja kujuga akusid, mis vastasid kõikidele nõuetele [21]. Lisaks oli tegu Eesti ettevõttega, mis tagas kiirema tarne ja lihtsustas võimalike garantiiküsimuste lahendamist.

4.5 Trükkplaadi disain

Trükkplaadi funktsionaalne ülesehitus on visualiseeritud joonisel 10. Kõik töö käigus koostatud trükkplaadi failid on üles laetud avalikku koodihoidlasse GitHub [22]. Kokku telliti 4 komplekteeritud trükkplaati, mille hinnaklass on leitav tabelist 3. Ühe trükkplaadi hind ilma komplekteerimistasuta tuli kokku umbes 115 dollarit. Täpne komponentide nimekiri on leitav avalikust koodihoidlast GitHub [22], kuid täpne hind on ajas muutuv sõltuvalt valuutakursist ja üldlevinud komponentide (nt standardised takistid ja kondensaatorid) valikust.



Joonis 10. Trükkplaadi funktsionaalne plokk skeem

Tabel 3. Funktsionaalne BOM

Komponent	Kogus	Komplekti hind	Koguhind
Aku	1	740 €	740 €
Trükkplaadid	5	17.36 \$	86.81 \$
LTC3895 koos põhikomponentidega	16	15.16 \$	242.56 \$
LTC4418 koos põhikomponentidega	4	20.24 \$	80.96 \$
LTC4226 koos põhikomponentidega	4	16.60 \$	66.40 \$
Komplekteeritud trükkplaat	4	114.84 \$	459.36 \$

4.5.1 Juhtkiipide valik

Nii pinge muundamiseks kui ka toiteallikate sujuvaks vahetamiseks on saadaval mitmeid erinevate tootjate juhtkiipe. Juhtkiipide valikul lähtuti eeskätt nende suutlikkusest tagada alamsüsteemi põhifunktsionaalsus antud tööparameetrite juures, millest oluliseimad olid sisend- ja väljundpinge vahemikud. Lisaks võeti otsuse langetamisel arvesse ka tootjapoolset juhtkiibi simuleerimisvõimalust, hinda, lisafunktsionaalsusi ja ka tellimiskeskonna JLCPCB tarnevõimekust. Valituks osutusid tootja *Analog Devices* juhtkiibid LTC4418, LTC4226 ja LTC3895. Määravaks faktoriks osutus võimalus simuleerida juhtkiipide tööd tootja enda loodud tarkvarakeskkonnas LTspice, mis võimaldas varakult tuvastada võimalikke probleemkohti ja vähendas oluliselt arendusprotsessis vigade tekkimise riski.

Kõik järgnevad juhtkiipide kasutuskorra kirjelduse peatükid põhinevad vastavate juhtkiipide andmelehtedel (LTC4418 [23], LTC4226 [24], LTC3895 [25]).

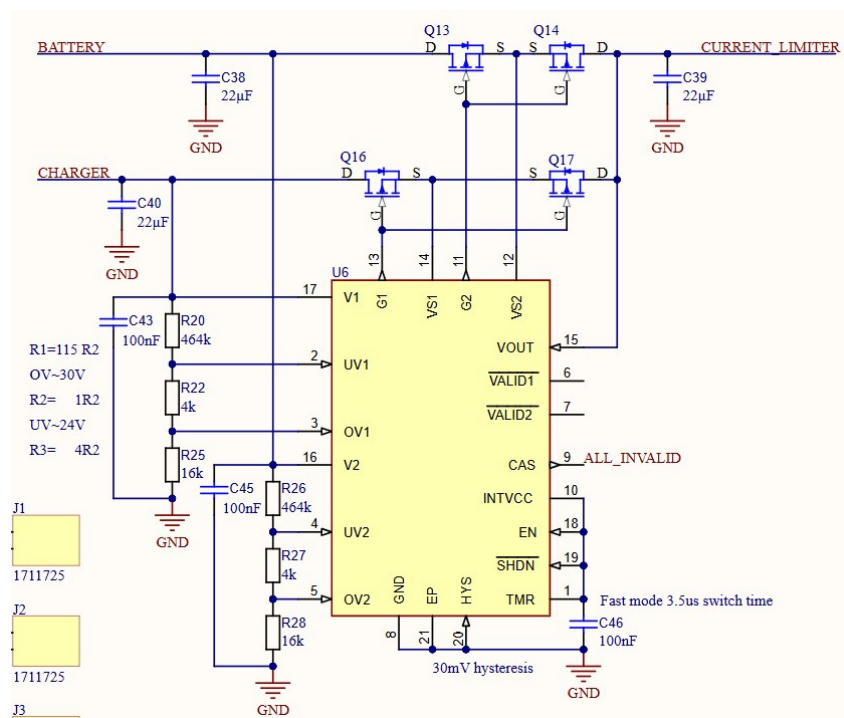
4.5.2 LTC4418 (*Dual Channel Prioritized PowerPath Controller*)

LTC4418 on kahekanaliline prioritseeriv toiteallika kontrolleri, mis võimaldab automaatselt valida kahe erineva sisendallika vahel, tagades seejuures katkestusteta toite ülekande väljundis. Kiip kontrollib pidevalt mõlema sisendi pinget ning lülitab koormuse eelistatud allikale, kui see on saadaval ja valiidne. Lülitamine toimub läbi N-kanaliga MOSFET-tüüpi transistoride pingestamise ja valiidust kontrollitakse peamiselt tugipingega võrdluse kaudu. Lisaks võrdlusele võetakse arvesse ka ajalist määratlust ja sätestatud hüstereesi.

Iga sisendi toitepinge õigesse vahemikku jäämist kontrollitakse läbi OV (*Over Voltage*) ja UV (*Under Voltage*) viikude. Vastav sisend määratakse sobimatuks (*invalid*), kui pinge OV viigu peal ületab 1 V või UV viigu peal on alla 1 V. See võimaldab kasutajal määrata mõlema toiteallika jaoks eraldi sobiva pingevahemiku ühendades toiteallika ja OV ning UV viigud läbi lihtsa pingejaguri (nt JOONIS 11 takistid R20, R22 ja R25). Vältimaks pidevaid kiireid lülitusi tugipinge lähedastel pingetel on võimalik seadistada hüsterees, kasutades selleks mõeldud HYS viiku. Maandades HYS viigu seatakse hüsterees 30 mV peale.

Lisaks on toiteallikale võimalik anda ajaline puhver, enne kui ta pinge langedes sobimatuks tunnistatakse ühendades kondensaatori TMR (*Timer*) viigu külge. Ajalise puhvri suurus on lineaarselt seotud kondensaatori mahtuvusega, kus iga nano-Faradi kohta pikeneb aeg umbes 16 ms võrra. Maandades TMR viigu võib toiteallikas vaikimisi töötada sobimatus pingevahemikus 3.5 μ s enne kui ta väljundist lahti ühendatakse. Antud skeemi disainis on TMR viigu külge ühendatud 100 nF kondensaator ehk puhvri suuruseks on 160ms.

Lisafunktsionaalsusena võimaldab LTC4418 anda märku vastava sisendi valiidsusest läbi VALID viikude pingestamise ning on võimalik omavahel ühendada ka mitu LTC4418 kiipi läbi CAS (*Cascade*) viigu, et võimaldada rohkemate toiteallikate vahel lülitamist. Antud skeemi (JOONIS 11) kontekstis ei olnud see vajalik ja neid jalgu ei kasutatud.



Joonis 11. Töö raames disainitud *Hot Swap* elektriskeem kasutades LTC4418 juhtkiipi

4.5.3 LTC4226-2 (*Wide Operating Range Dual Hot Swap Controller*)

LTC4226 on laia tööpinge vahemikuga kahe kanaliline *Hot Swap* kontrolleri, mille eesmärk on võimaldada sisend toiteallikate ohutut ühendamist süsteemi külge tekitamata hetkelisi voolutõuse ja/või pingelangusi. Selline funktsionaalsus on vajalik, kuna ühendamise hetkel võib voolutugevus tõusta kiloamprieni, mis on paljudele elektroonika komponentidele surmav. Hüppeline voolukasv tekitab omakorda järsu pingelanguse, mis tekitab kogu süsteemi ebastabiilsust ja võib kahjustada pingetundlikke elektroonika komponente.

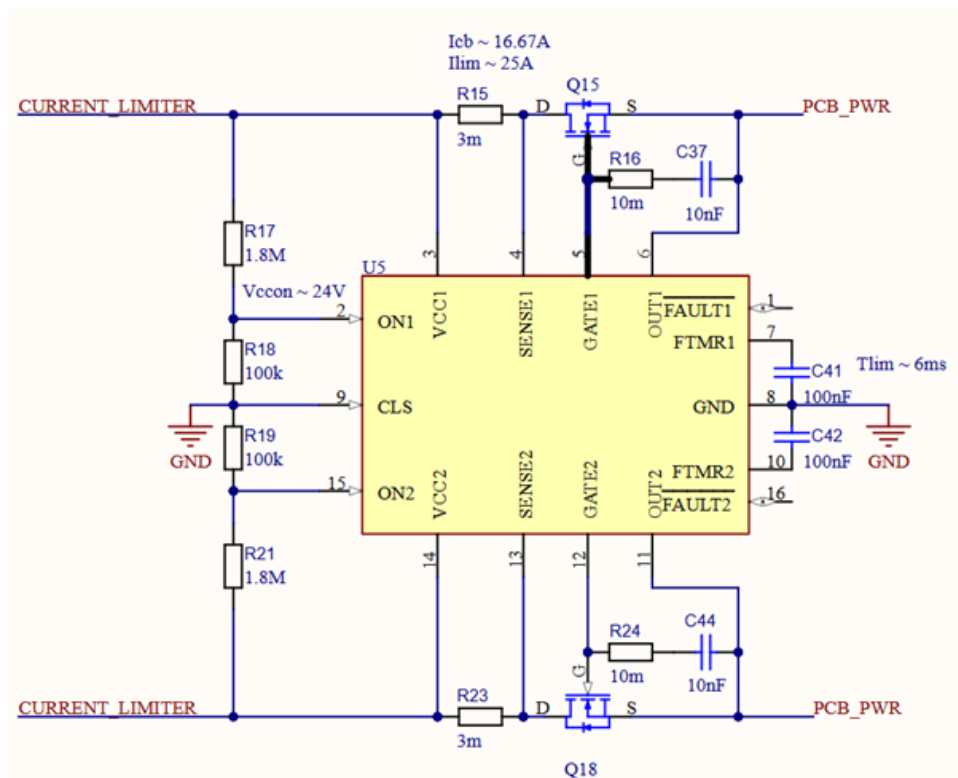
Valituks osutus mitmekanaline juhtkiip, kuna kanalite liitmisel on võimalik vähendada koormust ja soojuseraldust transistoritel, võimaldades endiselt suurt voolu.

Juhtkiibi tööpõhimõte seisneb MOSFET-tüüpi transistori tasapisi sisselülitamisel. Samaaegselt jälgitakse pidevalt voolutugevust šundi peal langeva pingemõõtmise ja seesmise tugipingega võrdlemisega. Seega on šundi takistuse valimisega võimalik määrata voolutugevuse ülempiir. Täpsemalt määratakse šundi takistuse valimisega kaks lävendit: lühiajalise voolupiirangu lävend, mida tähistatakse kui I_{cb} (*I Current Breaker*) ja absoluutne voolupiirangu ülempiir, mis on alati lühiajalise voolupiirangu kordne arv ning mida tähistatakse kui I_{lim} (lühendina *I limit*). Lühiajalise voolupiirangu madalam lävend võimaldab taluda müra või koormuse järsu muutuse tõttu ajutiselt piirväärtust ületavat voolu, ilma et toide täielikult katkestataks. Absoluutse voolupiirangu ja lühiajalise voolupiirangu omavahelist suhet on võimalik määrata läbi juhtkiibi CLS (*Current Limit Set*) viigu. Disainitud skeemil JOONIS 12 on CLS viik maandatud, mis määrab, et $I_{lim} = 1.5 * I_{cb}$.

I_{cb} -d on omakorda võimalik määrata õige takistusega šundi valimisega. Šundi peal langevat pinget võrreldakse sisemise tugipingega, milleks on andmelehe põhjal 50mV. Seega on šundi takistus leitav Oomi seadusest: $R_s = 50mV / I_s$, kus I_s on soovitud voolupiirang amprites ja R_s šundi takistus Oomides. Antud lahenduses soovime ühe kanali absoluutseks voolupiiranguks määrata 25 amprit, mille tulemusena saame šundi soovitud takistuseks 3 milli-Oomi, mida on näha ka koostatud skeemilt (JOONIS 12 takistid R15 ja R23).

Sisselülitamiseks kuluvat aega on võimalik määrata ühendades FTMR (*Fault Timer*) viigu külge kondensaatori, kus kondensaatori mahtuvus on lineaarselt seotud sisse lülitamiseks kuluva ajaga. Täpsemalt on vastav aeg leitav valemist $T_{lim} = 1.23V * C / 20A$, kus C on vastava kondensaatori mahtuvus faradites ning T_{lim} on aeg sekundites, mis kulub vastava kondensaatori laadimiseks, kui šunti läbib absoluutsest voolupiirangust suurem vool. Kui šunti läbib vool on suurem lühiajalisest

voolupiirangust, kuid väiksem absoluutsest voolupiirangust, siis on ka kondensaatorit laadiv vool väiksem ning võib arvestada ligikaudu 10 korda suurema T_{lim} väärtusega. Disainitud skeemis on FTMR viigu külge ühendatud kondensaatori mahtuvus 100nF, mis määrab T_{lim} väärtuseks ligikaudu 6ms (JOONIS 12 kondensaatorid C41 ja C42). Lisafunktsionaalsusena on ka sellel juhtkiibil võimalik määrata pinget alampiir, millest madalamatel pingetel voolu ei juhita. Seda alampiiri on võimalik määrata pingejaguriga kiibi ON viigu peal. Antud skeem on disainitud tööks pingetel üle 24V (JOONIS 12 takistipaarid R17, R18 ja R19, R21).

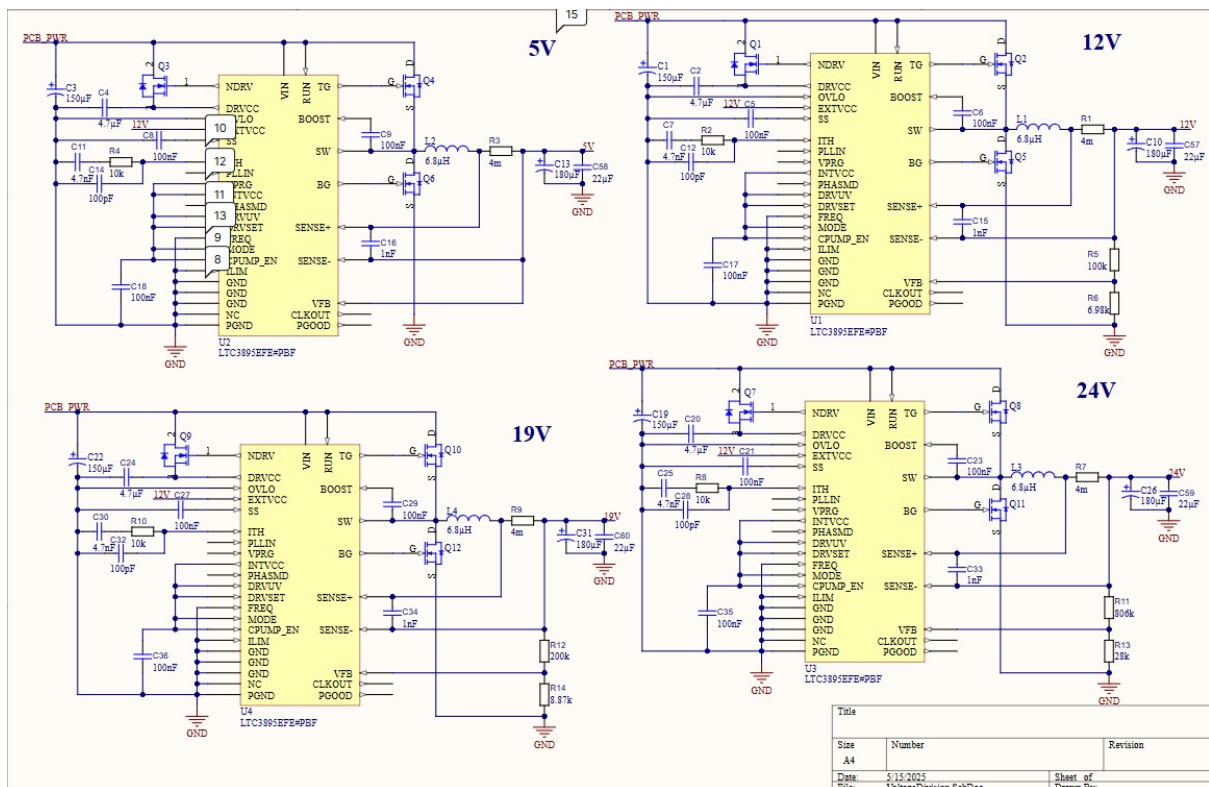


Joonis 12. Töö raames disainitud LTC4226-2 elektriskeem

4.5.4 LTC3895 (*Synchronous Step-Down DC/DC Controller*)

LTC3895 on pinget madaldav alalisvoolu kontrolleri, mis võimaldab N-kanaliga MOSFET-tüüpi juhttransistorite paisude pingestamise ja maandamisega kõrgemast sisendpingest saada madalam väljundpinge. Kontrolleri on mõeldud täitma eelnevalt kirjeldatud *Buck Converteris* juhtkiibi rolli.

Töö raames oli vaja saada 4 erinevat väljundpinget (5 V, 12 V, 19 V ja 24 V). Selleks disainiti *Altium Designeris* 4 sarnase tööpõhimõttega skeemi (JOONIS 13), mis kõik kasutavad LTC3895 kontrolleri.

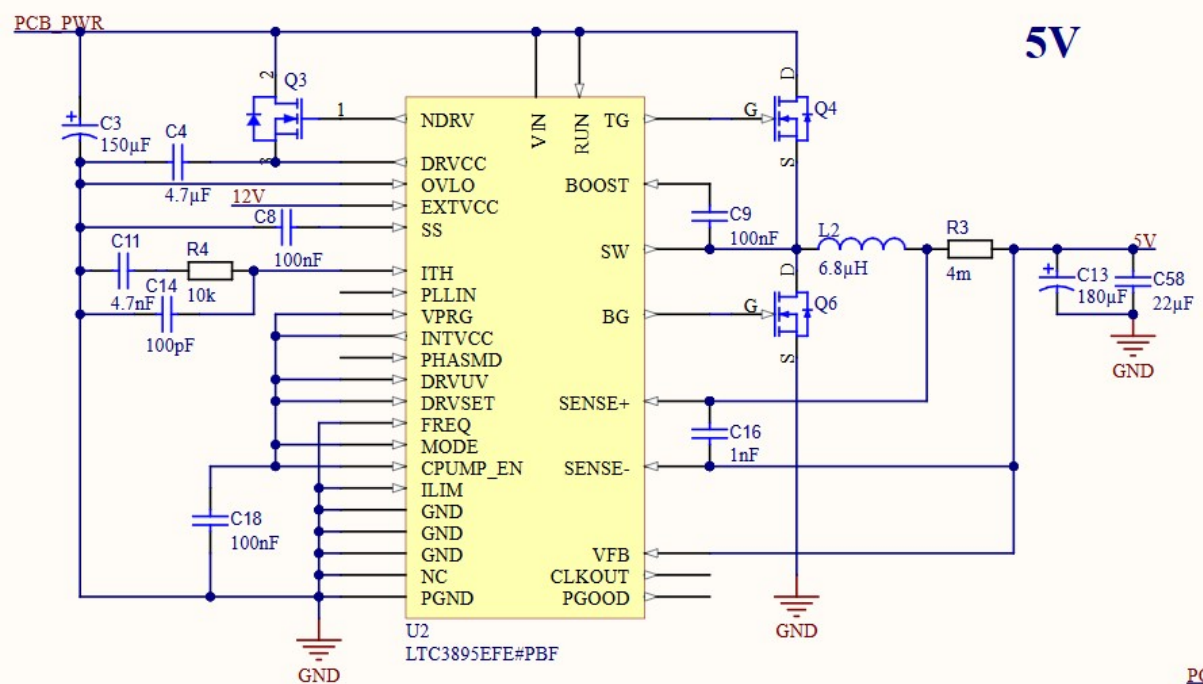


Joonis 13. Töö raames disainitud pingemuundurite elektriskeem

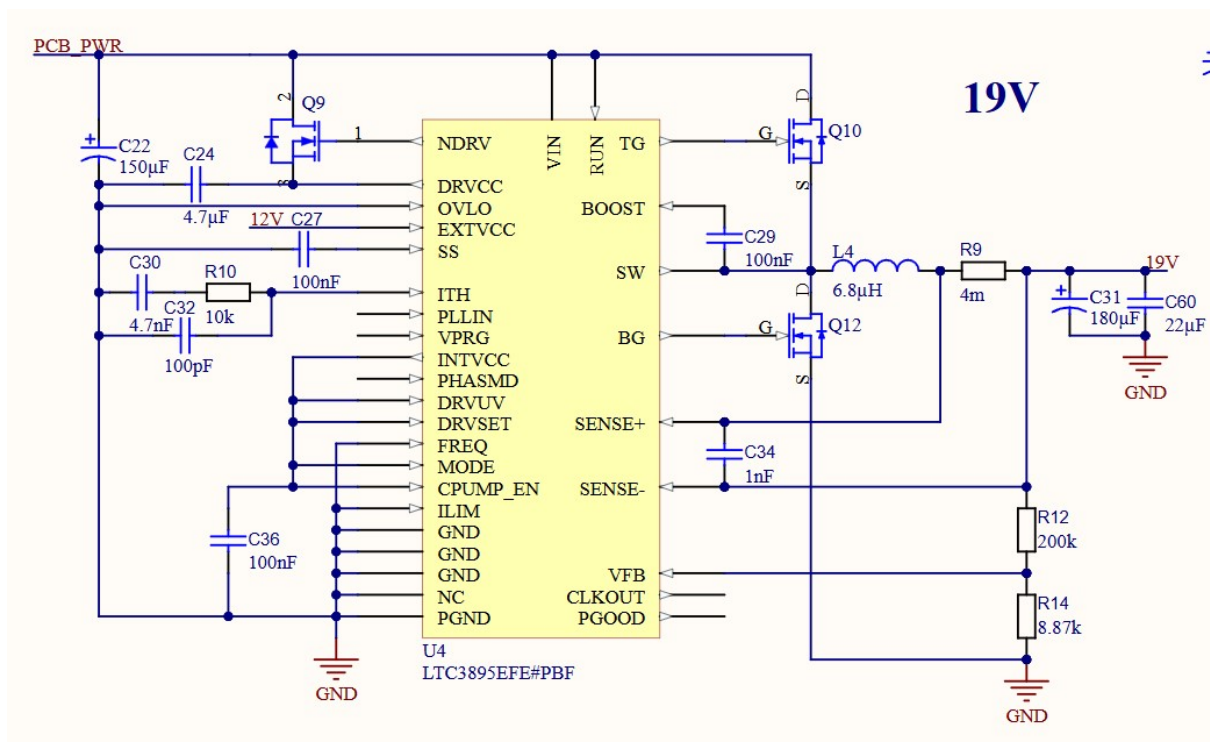
Väljundpinge määratakse sõltuvalt juhtkiibi kahe viigu kombinatsioonist. Esiteks määratakse VPRG (*Output Voltage Control Pin*) viigu kaudu võrdlusallikas ja teiseks võrreldakse pidevalt väljundpinget seismise tugipingega VFB (*Voltage Feedback Input*) viigu kaudu, et tagada soovitud väljundpinge säilimine ka koormuse muutumise korral. Ühendamise kombinatsioonidele vastavad väljundpinged on leitavad tabelist 4. Disainitud skeemidel on kasutusel 5 V väljundpinge saamise funktsionaalsus (JOONIS 14) ja ülejäänud väljundpingete saamiseks on koostatud vastavad pingejagurid (nt JOONIS 15 R12 ja R14).

Tabel 4. Väljundpinge kofigureerimine läbi VFB ja VPRG jala

Jalg / Soovitud väljundpinge	3.3V	5V	0.8–60V
VFB	Vout	Vout	Pingejagur
VPRG	GND	INTVcc	Ühendamata



Joonis 14. Töö raames disainitud LTC3895 elektriskeemi 5V osaskeem



Joonis 15. Töö raames disainitud LTC3895 elektriskeemi 19V osaskeem

Tootja poolt on määratud, et kontrolleri suudab transistorite lülitusi teostada sagedusvahemikus 50 kHz ... 900 kHz. Kõrgem lülitussagedus tähendab, et transistorite paisude laadimine toimub sagedamini, seega kulub süsteemi töös hoidmiseks rohkem voolu. Lisaks peab kontrolleri suutma väga lühikese aja jooksul transistori suutma viia küllastunud olekusse, et vähendada takistusest tulenevat soojuseraldust. Samas võimaldab suuremal sagedusel opereerimine kiiremini reageerida koormuse muutustele ja vähendab väljundis lülitamisest tulenevaid pingekõikumisi ja elektromagnetilist müra. Lisaks on kõrgematel sagedustel võimalik kasutada nii mõõtmetelt kui ka väärtuselt väiksemaid komponente (nt induktorid ja kondensaatorid), mis võtab trükkplaadil vähem ruumi ja on odavam toota. [26]

Lülitamissageduse valikul on soovituslik maksimaalne voolu kõikumine 30% maksimaalsest väljundvoolust, mis antud disaini puhul on umbes 3 A. Voolu kõikumise amplituud on leitav valemist 1. [27]

$$L = \frac{V_{out} \times (1 - D) \times T}{CR \times I_{out}} \quad (1)$$

Induktori induktiivsus L [H], *Duty Cycle* D [%], tööperiood T [s], voolu kõikumine osasuhtena maksimaalsest väljundvoolust CR , maksimaalne väljundvool I_{out} [A]. [27]

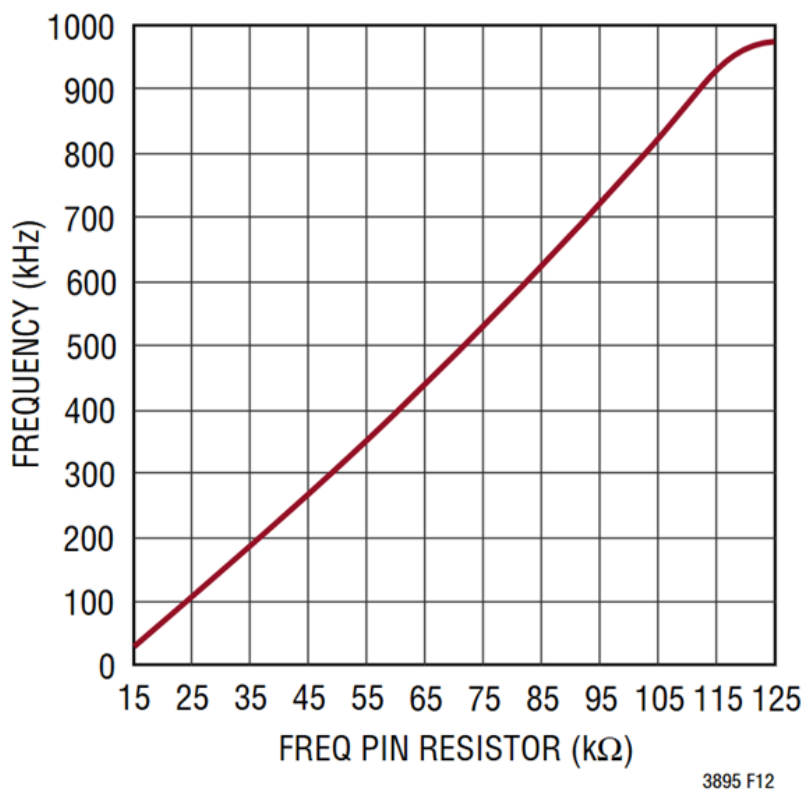
Soovitud sageduse määramine käib kontrolleri **FREQ** (*Frequency Control Pin for the Internal VCO*) viigu abil. Sagedust on võimalik määrata vaikeväärtusena või seadistada kasutaja poolt takisti ühendamisega **FREQ** viigu ja **GND** vahele (tabel 5).

Tabel 5. Lülitamissageduse konfigureerimine **FREQ** jalaga

Soovitud sagedus	350 kHz	535 kHz	50–900 kHz
FREQ	GND	INTVcc	Takisti

Ühendatud takisti väärtus määrab töösageduse, mille vastav sõltuvussuhe on esitatud juhtkiibi tootja poolt graafilisel kujul ning on välja toodud joonisel 16.

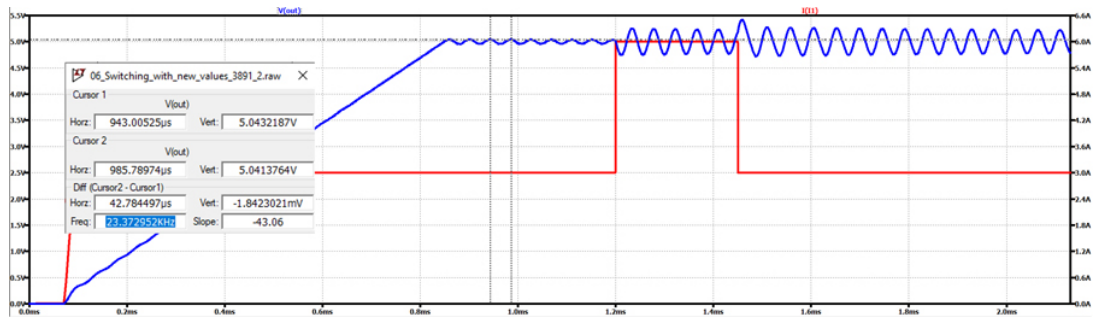
Antud disaini puhul, võttes arvesse eeldatavat kasutamismustrit, hinda ja komponentide saadavust, valiti lülitamissageduseks 350 kHz ja väljundinduktiivsuseks 6,8 μ H.



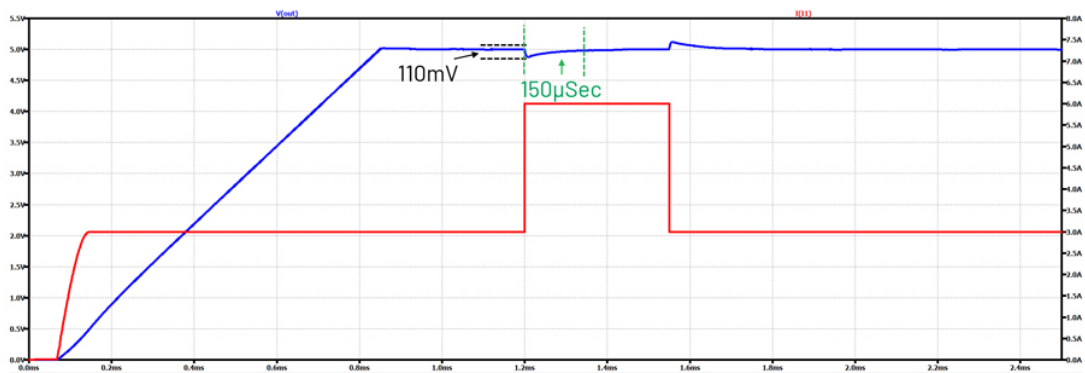
Joonis 16. LTC3895 andmelehe graafik sageduse konfigureerimiseks [25]

Pidevate lülituste tulemusena tekib Buck Converter tüüpi muundurites alati süsteemi ebastabiilsusi, mille kompenseerimiseks disainitakse ja ühendatakse *Compensation Network*. Ebastabiilsused tekivad kõige enam just koormuse muutumisel, kuna süsteemi aktiivne tagasiside üritab säilitada väljundis konstantset pinget muutes vajadusel lülitustransistorite talitlustusükklit. Kompensatsiooni võrgu süvitsi mõistmine nõuab spetsiaalseid teadmisi kontrolliteooriast, mis on antud töö fookusest väljas. Oluline on aga mõista selle võrgu üldist olemust, eesmärki ja praktilisi rakendamisevõimalusi.

Kompensatsiooni võrgu disainimise ja olemuse kohta on mitmeid allikaid [28], kuid kõige parema ülevaate saab võrreldes süsteemi reageerimist muutustele kompenseeritud ja kompenseerimata olukorras. Analog Devices'i poolt koostatud graafikutelt on selgelt näha, et punase joonega tähistatud koormuse muutus kompenseerimata olukorras (JOONIS 17), põhjustab kogu süsteemi väljundis pikaajast ebastabiilsust, mis võib halvimal juhul veel ajas võimeduda. Seevastu kompenseeritud olukorras (JOONIS 18), põhjustab koormuse muutus vaid hetkelise muutuse väljundis, mis stabiliseerub kiiresti ja rahulikult.



Joonis 17. Kompenseerimata pingeregulaatori reaktsioon koormuse muutustele [28]



Joonis 18. Kompenseeritud pingeregulaatori reaktsioon koormuse muutustele [28]

Disainitud lahenduses võeti kõigi pingemuundurite disainis kasutusele tootja poolse näidisskeemis kasutatud kompensatsioonivõrk koos vastavate komponentide väärtustega, mis ühendati juhtkiibi selleks ette nähtud ITH (*Error Amplifier Output and Switching Regulator Compensation Point*) viigu külge.

Skeemi disaini vaatepunktist langetati oluline otsus ka töörežiimi valikul, mida konfigureeritakse juhtkiibi MODE (*Mode Select and Burst Clamp Adjust Input*) viigu abil. LTC3895 pakub kolme erinevat töörežiimi, mille abil saab kohandada toiteallika käitumist sõltuvalt süsteemi efektiivsuse, pinge kõikumise ja voolu tarbimise nõuetest:

- **Pidev juhtimine (*Forced Continuous Mode*)** – MODE viigu ühendamisel INTVCC-ga töötab kontrollor pidevas voolu juhtimise režiimis, kus sõltumata koormusest jätkatakse sunniviisiliselt transistorite lülitamist. See võimaldab töörežiimidest kõige kõrgemat väljundvoolu ja tagab stabiilse töö ning vähendab väljundis pinge kõikumisi. Madalate koormuste korral on see väga ebaefektiivne ja võib põhjustada kiiret temperatuuri tõusu.
- **Burst Mode** – MODE viigu maandamisel (andmelehes 0 V ... 1 V) aktiveeritakse energiasäästlik Burst Mode, kus kontrollor katkestab transistorite lülitamise koormuse

väheneb ning alustab uuesti alles väljundpinge langemisel alla vaikumisi määratud või kasutaja poolt seadistatud piiri. See vähendab oluliselt tühivoolu ning on efektiivne madalate koormuste korral. Puudusena võib välja tuua, et selline töörežiim võib põhjustada suuremaid pinget kõikumisi väljundis, mis ei sobi kõikidele rakendustele ja pingetundlikele komponentidele.

- **Pulse-Skipping Mode** – MODE viigu ühendamisel pingevahemikku 1,4 V ... INTVCC - 1,3 V seatakse kontrolleri töörežiimiks impulsside vahelejätmise režiim, mis on kompromiss *Burst Mode* efektiivsuse ja pideva juhtimise stabiilsuse vahel. Selles režiimis teostatakse endiselt pidevalt transistorite lülitusi, kuid madala koormuse korral jäetakse osa lülitusi vahele. See võimaldab paremat mürakontrolli kui *Burst Mode*, kuid kõrgemat efektiivsust kui pidev juhtimine.

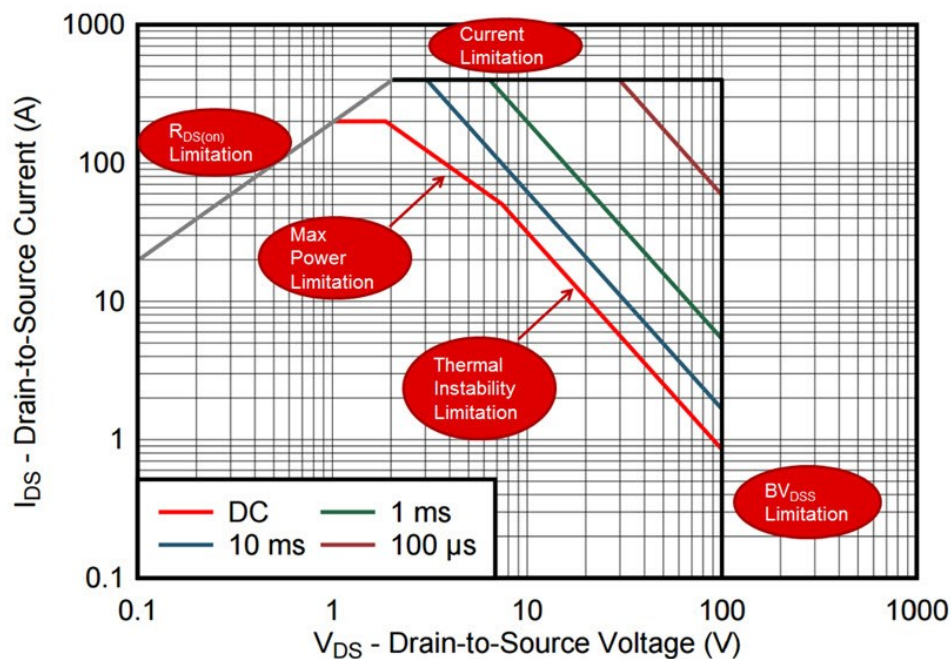
Ülejäänud kasutuses olevate viikude täpsem kasutamise kirjeldus on leitav juhtkiibi andmelehest ning nende kasutuskorra detailne lahti kirjeldamine ei ole antud töö fookuses.

Disainitud skeemis jäid kasutamata välise taktisignaali sünkroniseerimiseks mõeldud viigud PLLIN (*External Synchronization Input to Phase Detector*), PHASMD (*Control Input to Phase Selector*) ja CLKOUT (*Output Clock Signal*). Lisaks ei leidnud kasutust ka edasise loogika juhtimiseks mõeldud PGOOD (*Power Good*) viik.

4.5.5 Lisakomponendid

Lisakomponentide sobivuse hindamisel analüüsiti esmajärjekorras tootja poolseid piiranguid ja saadavust.

MOSFET-tüüpi transistorite valikul on üheks kõige olulisemaks omaduseks voolutaluvus. Sobivuse kontrollimiseks on tootja poolt enamasti koostatud SOA graafik. SOA graafikute mõistmiseks on mitmeid allikaid [29], mille põhjal võib kokkuvõtvalt öelda, et SOA graafik visualiseerib transistori läbivat maksimaalset lubatud voolutugevust sõltuvalt MOSFET-i peal langevast pingest. Samas on oluline mõista, et kui MOSFET töötab küllastunud olekus, siis on tema takistus minimaalne, mistõttu võib MOSFET-i peal langevat pinget lugeda nullilähedaseks. Seega on töö eesmärgi saavutamise raames oluline läbi mõelda, et lülituste sooritamisel ja skeemi pingestamisel ei läbiks MOSFET-i liiga suur vool, mille magnituud või kestus ületaks tema ohutu tööpiirkonna piirid. [30] SOA graafiku näide on toodud joonisel 19.



Joonis 19. Tüüpiline MOSFET SOA graafik [29]

Lisaks on töö eesmärgi saavutamise raames oluline ka paisu mahtuvus (*Gate Capacitance*), mille olemust on samuti lahti seletatud mitmetes allikates [31, 32]. Kokkuvõtvalt võib öelda, et paisu mahtuvus on parasiitmahtuvus ning see mõjutab oluliselt transistori lülitamiseks kuluvat aega. Seega peab sobivuse hindamiseks analüüsima, et kui suur võib olla maksimaalselt paisu mahtuvus sõltuvalt lülitussagedusest ja kontrolleri väljundvoolu võimekusest. Kiiremad lülitused nõuavad väiksemat mahtuvust või suuremat voolutugevust, et olla suuteline viima MOSFET küllastunud olekusse ja vähendada seeläbi soojuseraldust ning jääda SOA poolt määratud piiridesse.

Peale kirjeldatud parameetrite on MOSFET-idel veel hulganisti omadusi, mida tuli sobivuse hindamisel arvesse võtta, kuid nende detailne lahti seletamine on töö fookusest väljas.

Erinevate kondensaatorite sobivuse hindamisel analüüsiti peamiselt tootmistehnoloogiast tulenevaid omadusi, mille tulemused on leitavad tabelist 6.

Tabel 6. Kondensaatorite omaduste võrdlus

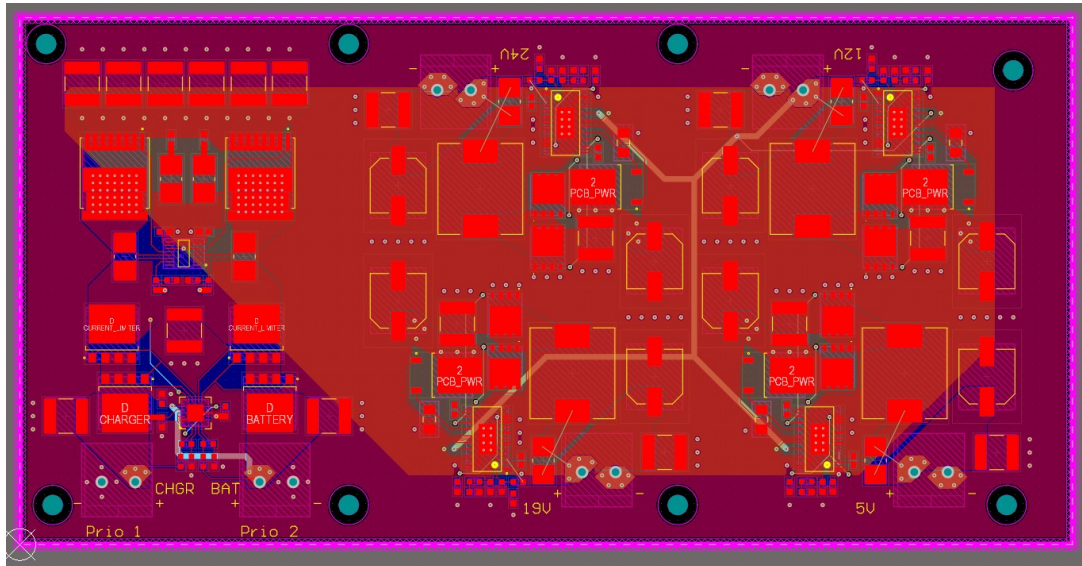
Omadus	Keraamiline	Alumiinium elektrolüüt
Mahtuvus	Tüüpiliselt paarsada μF	Kuni mitmed mF
Tolerants	5–10%	20–40%
Pinge	Tüüpiliselt alla 50V	Kuni paartuhat V
Polariseeritud	Ei	Jah
ESR (<i>Equivalent Series Resistance</i>)	Väga madal ($<0.1 \Omega$)	$>30 \Omega$
Sobiv sagedusvahemik	MHz – GHz	$<100 \text{ kHz}$
Töökindlus / eluiga	Praktiliselt piiramatult	Piiratud laadimiskordadega (kuni 10 000)

Kondensaatorite tüüpe on tegelikult rohkem, kuid hinna, saadavuse ja levimuse tõttu arvestati ülejäänud kondensaatorite tüübid võrdlusest välja. Erinevate eesmärkide saavutamiseks kasutati skeemi disainis mõlemat tüüpi kondensaatoreid.

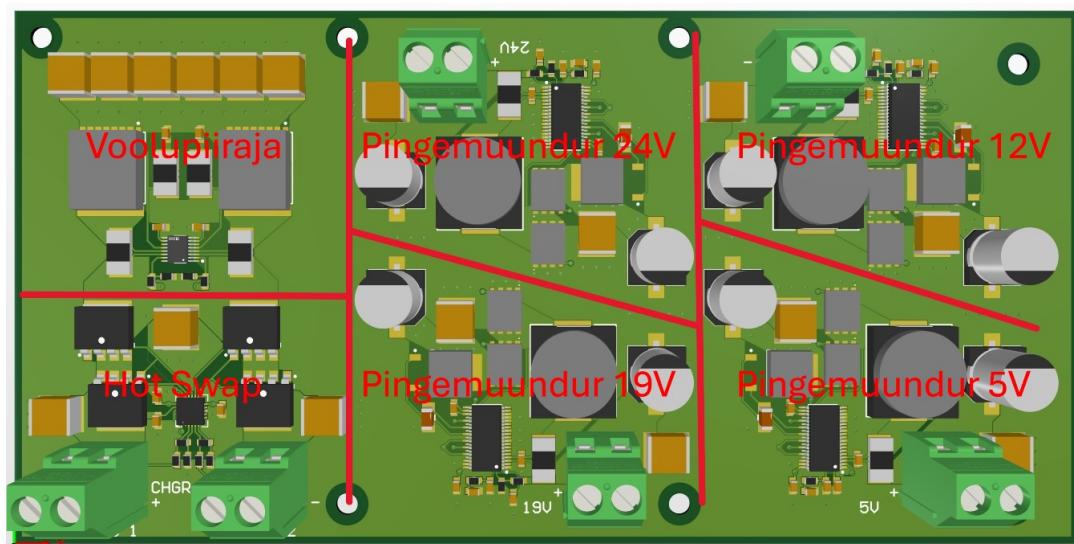
Induktorite valikul tuli arvestada määratud voolupiirangut ehk valitud induktorid pidid säilitama oma induktiivsuse ka skeemi maksimaalse voolutugevuse korral. Induktori induktiivsuse vähenemist voolu kasvades nimetatakse induktori küllastumiseks. Tootjate poolt nimetatakse vastavat piirmäära *Inductor Saturation Current* ning see tähistab enamasti voolutugevust, mille korral induktiivsus on langenud 20% (sõltuvalt tootjast võib ka 30%). [33]

4.5.6 Komponentide paigutus

Trükkplaadi disaini koostades on eelkõige arvestatud trükkplaadi tootja JLCPCB seatud tootmispiiranguid [34]. Disainitud trükkplaat (JOONIS 20) on neljakihiline, millest üks on *Ground plane* ehk maandatud kiht. Pealmisele kihile on asetatud kõik komponendid funktsionaalsete plokkidena (JOONIS 21). Radade vedamisel on arvestatud ka neid eelduslikult läbiva voolutugevusega, kasutades põhivoolukanalites võimalikult palju *polygone*.



Joonis 20. Trükkplaadi disain Altium Designeris

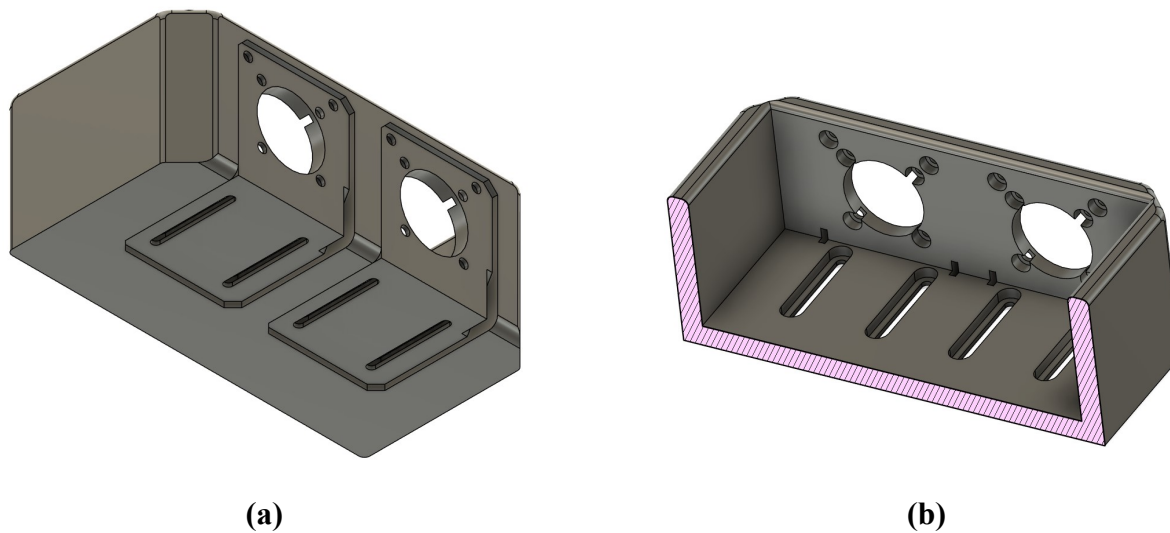


Joonis 21. Funktsionaalsete plokkidena jagatud trükkplaadi 3D vaade

4.6 Toitesüsteemi integreerimine ja testimine

4.6.1 Aku

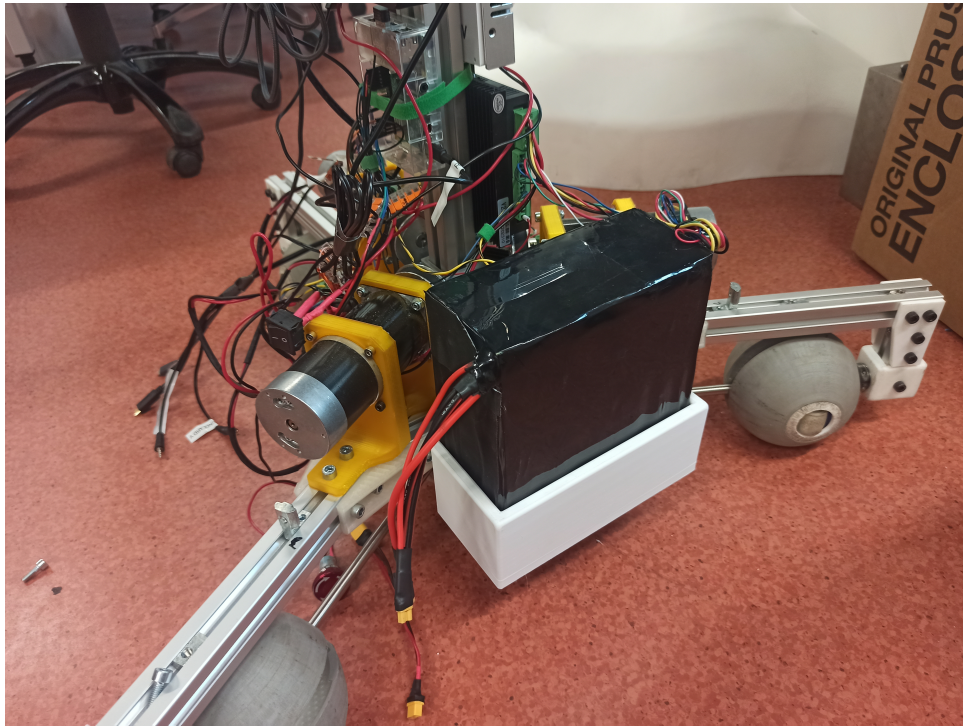
Uue tellitud aku gabariitmõõtmed olid $210\text{mm} \times 80\text{mm} \times 170\text{mm}$ ning selle kinnitamiseks disainiti ja prinditi aku hoidja, mis kasutas sarnaselt kaardistatud kinnitusmeetodile metallist nurkkinnitusi (JOONIS 7), kuid rohkemate kinnituspunktide ja poltidega. Nurkkinnitused integreeriti aku hoidja disaini sisse (JOONIS 22).



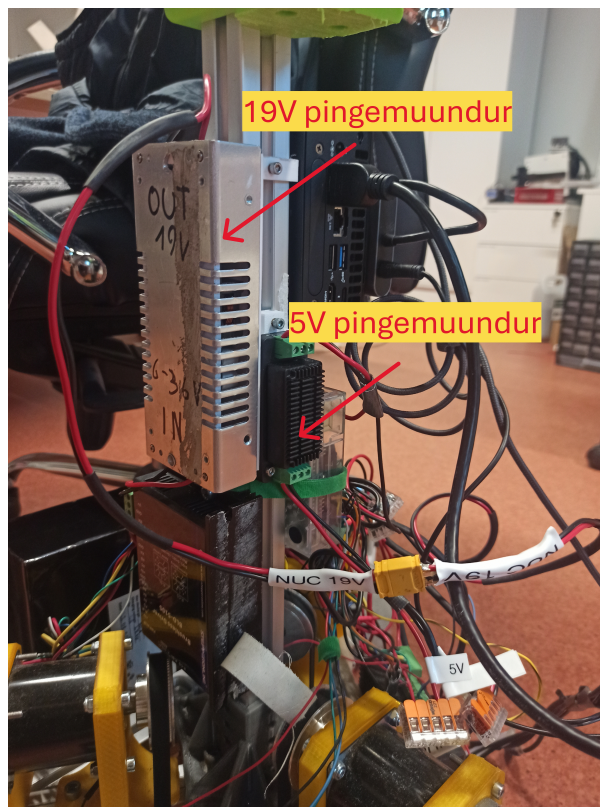
Joonis 22. Modelleeritud aku hoidja: a - alt vaade, b - pealt vaade

Oluliste saavutustena on aku nüüd toetatud varasema ühe nurkkinnituse asemel kahega, varasema ühe poldi asemel hoiab akut põhikonstruktsiooni küljes neli ning ka raskuse on kinnituspunktile lähemal, mis suurendab süsteemi üldist stabiilsust ja tagab oluliselt kindlama ning vastupidavama aku paigutuse. Lisaks ei ole aku välja vahetamise ajal tarvis kasutada ühtegi ühekordset lisa kinnitus vahendit (kaablivitsad, kahepoolne teip jm) (JOONIS 7), vaid aku on võimalik pesast välja tõsta ja asendada uuega (JOONIS 23).

Kuna enne trükkplaadi valmimist oli vajadus Semubot töökorda seada uue akuga, siis ajutise lahendusena kasutatakse kuni pingemuundurite täielikult töökorda seadmiseni kommertslikult saadaval olevaid pingemuundureid (JOONIS 24).



Joonis 23. Uus aku integreeritud roboti külge



Joonis 24. Kommertslikult kasutatavad pingemuundurid ajutise lahendusena

4.6.2 Hot Swap

Lisafunktsionaalsusena disainitud toiteallika kuumvahetus süsteem vajab plaadile ühe juhtkiibi (LTC4226) käsitsi juurde jootmist, kuna trükkplaadi tellimiskeskonna JLCPCB varud olid otsas.

Pärast õnnestunud jootmist toimis süsteem ootuspäraselt: prioritseeris esimesse sisendisse ühendatud toiteallikat, valideeris sisendeid vastavalt nende pingetele ning kõige olulisema sammuna võimaldas vahetada toiteallikaid, tekitamata olulisi häireid väljundis.

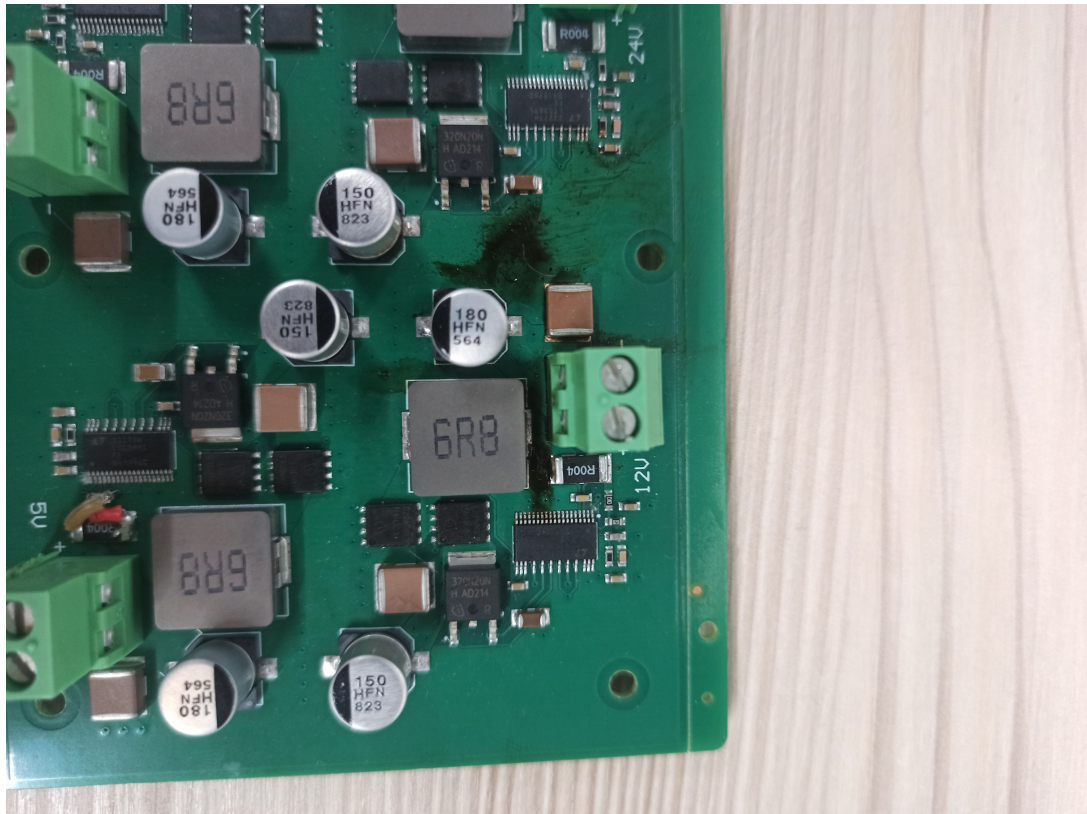
4.6.3 Pingemuundurid

Pingemuundurite disainis tuli välja paar puudujääki, millest osa olid jooksvalt parandatavad.

Esimese veana tuli välja, et pingemuundurite voolu piiramise ja reguleerimise takisti viigud SENSE+ (*Positive Input to the Differential Current Comparator*) ja SENSE- (*Negative Input to the Differential Current Comparator*) olid omavahel vahetuses, mis tähendas, et LTC3895 arvates oli skeemi väljundis pidevalt liiga suur voolutugevus, isegi kui koormust tegelikult ei olnud. Seda probleemi oli osaliselt võimalik lahendada, lõigates trükkplaadil läbi vastavad rajad. Sellest tulenevalt ei olnud enam igal väljundil individuaalset voolu piiramise võimekust, kuid pinge muundamine töötas ja sinna oli võimalik ühendada koormust. Järgmises iteratsioonis tuleks SENSE+ ja SENSE- viigud ühendada juba trükkplaadil õigesti.

Teise veana tuli välja, et skeemi ülepinge eest kaitsmiseks mõeldud viik OVLO (*Overvoltage Lockout Input*) oli ühendatud otse toitepingega. See tähendas, et juhtkiip sai pidevalt signaali, et skeemi sisendpinge on liiga kõrge ja ei aktiveerinud korralikult väljundit. Seda probleemi oli võimalik lahendada lõigates läbi raja, mis ühendas OVLO viigu sisendpingega. Järgmises iteratsioonis tuleks see viik ühendada toitepingega läbi pingejaguri või üldse maandada.

Kolmanda probleemina tuli välja, et üks disaini etapis langetatud otsus oli ekslik. Pingemuundurite töörežiimi valikul otsustati, et kasutatakse *Forced Continuous Mode* töörežiimi, et tagada stabiilsus ja võimaldada maksimaalset väljundvoolu. See aga omakorda tähendab, et koormuse puudumisel eraldub kogu sunniviisiliselt juhitud vool soojusena, mis lõpeb paratamatult kogu süsteemi läbi põlemisega (JOONIS 25).



Joonis 25. Eraldunud kuumusest läbi põlenud kondensaator

Antud disaini korral tähendab see, et kogu trükkplaati on võimalik pingestada vaid väga lühikest aega, mis muudab parandusteta disaini kasutuskõlbmatuks. Vaatmata valele töörežiimi valikule, on selleks lühikeseks ajaks pingejagurite väljundis õiged väljundpinged. Seda probleemi ei olnud võimalik jooksvalt piisavalt turvaliselt lahendada ning tuleviku edasi arendustes on plaan töörežiimiks valida *Pulse-Skipping Mode*, mis väldib koormuseta olukorras suurt soojuse eraldumist.

5. Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö raames uuendati humanoidroboti Semubot toitesüsteemi, eesmärgiga parandada efektiivsust, kompaktsust ning üldist kasutusmugavust. Uuendusprojekt lähtus roboti olemasoleva toitesüsteemi analüüsist ning selle kitsaskohtade tuvastamisest. Süsteemi kaardistamise käigus hinnati komponentide tootjate spetsifikatsioone ning teostati testimisi reaalses töökeskkonnas, et määratleda uue lahenduse projekteerimise lähtekohad ja nõuded.

Töö käigus asendati eelnev mitmel akul põhinev süsteem ühel akul põhineva süsteemiga. Aku valimisel lähtuti kaardistamise käigus seatud nõuetest, mille tulemusena integreeriti Tõuksimaailma poolt komplekteeritud aku roboti uueks toiteallikaks. Kaardistamise käigus tekkis vajadus disainida ka erineva väljundpingega pingemuundurid ning võimaldada vahetada roboti toiteallikat süsteemi tööd katkestamata (*hot swap*).

Töö tulemusena integreeriti uus aku roboti toiteallikaks kasutades kommertslikult saadaval olevaid pingemuundureid, kuna disainitud trükkplaat vajab ohutuks ja töökindlaks kasutamiseks edasiarendust.

Viited

- [1] Semubot. Semuboti kodulehekülj (2023). <https://www.youtube.com/watch?v=ChJylfA9KF0> (12.05.2025).
- [2] Intel. Intel® NUC 13 Pro Kit/Board/Mini-PC Technical Product Specification. 2023. <https://download.intel.com/newsroom/2023/client-computing/Intel-NUC-13-Pro-Tech-Product-Spec.pdf> (12.05.2025).
- [3] Sharaf O. Z. ja Orhan M. F. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (2014), lk 810–853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.012>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000227>.
- [4] Auto aku pilt. <https://new.ksd-images.lt/display?path=aikido/store/1a26f146adfb819aee03f2556407cc.jpg&op=resize&w=2000>.
- [5] Makita aku pilt. <https://espak.ee/epood/wp-content/uploads/197280-8.jpg>.
- [6] Telefoni aku pilt. <https://netiabi.ee/wp-content/uploads/2019/04/nutitelefoni-tahvelarvuti-aku-vahetus.jpg>.
- [7] The Impact of Hot-Swap Technology on Control Systems. Altus. <https://www.altus.com.br/en/post/593/the-impact-of-hot-swap-technology-on-control-systems> (12.05.2025).
- [8] Arunkumari T. ja Indragandhi V. An overview of high voltage conversion ratio DC-DC converter configurations used in DC micro-grid architectures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77 (2017), lk 670–687. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.036>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117305324>.
- [9] The Zener Diode. Electronics Tutorials. https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_7.html (12.05.2025).
- [10] Maestre S. Zener Diode as Voltage Regulator - Conceptual Overview. 2020. <https://www.circuitbread.com/tutorials/zener-diode-as-voltage-regulator-conceptual-overview> (12.05.2025).
- [11] The Fundamentals of LDO Design and Applications. Analog Devices. 2009. <https://www.analog.com/en/lp/001/fundamentals-of-ldo-design-and-applications.html> (12.05.2025).
- [12] Roy R. van. Buck Converter Selection Criteria. 2015. <https://www.richtek.com/~media/A6725C24E62947D08DA75025050F90B7.pdf> (12.05.2025).
- [13] Ejury J. Buck Converter Design. Infineon Technologies North America (IFNA) Corp. 2013. <https://cdn.badcaps-static.com/pdfs/2a997c023d0eda74b0a3c42d4b38ca9c.pdf>.

- [14] Buttay C. The two operating modes of a buck converter. 2006. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buck_operating.svg (12.05.2025).
- [15] Rahman M. S. Buck Converter Design Issues. Magiströö. Linköping Institute of Technology, 2007.
- [16] Boost Converters (Step-Up Converter). Monolithic Power Systems. <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/dc-dc-converters/boost-converters> (19.05.2025).
- [17] Arnob P., Touhidul I., Rafat F., Nahiduzzaman R., Jannatul B. ja Nahian S. Exploring Boost Converters: Design, Implementation and Future Perspective in Power Electronics (veebuar 2024). DOI: [10.13140/RG.2.2.32047.92324](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32047.92324).
- [18] Buttay C. The two configurations of a Boost converter (On-state and Off-state). 2006. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boost_operating.svg (12.05.2025).
- [19] Geerling J. Power Consumption Benchmarks (). <https://www.pidramble.com/wiki/benchmarks/power-consumption> (12.05.2025).
- [20] Kennedy P. Intel NUC 13 Pro NUC13ANKi7 Power Consumption and Noise (2023). <https://www.servethehome.com/intel-nuc-13-pro-review-nuc13anki7-some-perspective/3/> (12.05.2025).
- [21] Elektriitõukeratta aku valmistamine. Tõuksimaailm. <https://www.xn--tuksimaailm-ffb.ee/aku-valmistamine-li-ion-eritellimus-aku-ehitamise-koostamine/> (12.05.2025).
- [22] Voorel O. Github repositoorium. 20. mai 2025. <https://github.com/SemuBot/voorel-thesis-2025-semubot-BMS#> (20.05.2025).
- [23] Dual Channel Prioritized PowerPath Controller. Analog Devices. 2018. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc4418.pdf> (12.05.2025).
- [24] Wide Operating Range Dual Hot Swap Controller. Analog Devices. 2012. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/4226f.pdf> (12.05.2025).
- [25] 150V Low IQ, Synchronous Step-Down DC/DC Controller. Analog Devices. 2016. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3895fa.pdf> (12.05.2025).
- [26] Roy R. van. Buck Converter Selection Criteria. Richtek. 2015. <https://www.richtek.com/~media/A6725C24E62947D08DA75025050F90B7.pdf> (12.05.2025).

- [27] Dostal F. Selecting the Right Inductor Current Ripple (2023). <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/selecting-the-right-inductor-current-ripple.html> (12.05.2025).
- [28] Feldman R. Step-by-Step Process to Calculate a DC-to-DC Compensation Network (2023). <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/step-by-step-process-to-calculate-a-dc-to-dc-compensation-network.html> (12.05.2025).
- [29] Barr B. Understanding MOSFET Data Sheets, Part 2 - Safe Operating Area (SOA) Graph (2023). <https://www.ti.com/document-viewer/lit/html/SSZTCR5> (12.05.2025).
- [30] Rogachev A. Robust Hot Swap Design. Texas Instruments. 2014. <https://www.ti.com/lit/pdf/SLVA673> (12.05.2025).
- [31] Gate capacitance of MOSFET. Student Circuit. 2020. <https://www.student-circuit.com/learning/year2/digital-systems-design/what-is-gate-capacitance-of-mosfet/> (12.05.2025).
- [32] Understanding MOSFET Characteristics. ROHM Semiconductor. https://www.rohm.com/electronics-basics/transistors/tr_what5 (12.05.2025).
- [33] INDUCTOR SATURATION CURRENT. VISHAY INTERTECHNOLOGY. 2017. https://www.vishay.com/docs/48155/did-you-know_ihlp_saturation_vmn-ms7373.pdf (12.05.2025).
- [34] PCB Manufacturing & Assembly Capabilities. JLCPCB. 2025. <https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities> (12.05.2025).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Oliver Voorel

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Humanoidrobot Semuboti toitesüsteemi uuendamine

mille juhendajad on Renno Raudmäe ja Teet Tilk

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi Dspace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Oliver Voorel

9. juuni 2025. a.