



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

KOLMEFAASILINE VAHELDI ÖPPE- JA TEADUSTÖÖKS

3-Phase Inverter For Study and Research Purposes

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Ragnar Kase

Üliõpilaskood: 206562

Juhendaja: Indrek Roasto, vanemlektor

Tallinn, 2024

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Ragnar Kase

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Kolmefaasiline vaheldi õppe- ja teadustööks“ („3-Phase Inverter For Study and Research Purposes“)

mille juhendaja on Indrek Roasto,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

13.05.2024

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

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Ragnar Kase 206562

Õppekava, peeriala: EAAB, mehhatroonika

Juhendaja(d): Vanemlektor, Indrek Roasto, +372 6203702

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Kolmefaasiline vaheldi õppe- ja teadustöök

(inglise keeles) 3-Phase Inverter For Study and Research Purposes

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Vaheldi projekteerimine ja komponentide valik.
2. Vaheldi arvuti mudeli loomine ja simuleerimine PLECS tarkvaras.
3. Juhtimise lisamine vaheldi mudelile ja regulaatorite häälestamine.
4. Vaheldi prototüübi ehitamine ja simulatsiooni tulemuste katseline valideerimine.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lähteandmete kogumine ja kirjanduse läbitöötamine	15.02.24
2.	Arvuti mudeli loomine ja simuleerimine	29.02.24
3.	Prototüübi ehitamine	20.03.24
4.	Lõputöö kirjutamine	10.05.24
4.1	Esimene versioon valmis	20.04.24
4.2	Lõplik versioon valmis	20.04.24

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "mai"13.05.2024.a

Üliõpilane: ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: ".....".....20.....a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

SISUKORD

1. EESSÕNA	3
2. SISSEJUHATUS	4
3. OLEMASOLEVA ÜHEFAASILISE VAHELDI ÜLEVAADE JA PÕHIFUNKTSIOONID	5
4. VAHELDI MODELLEERIMINE ja Simuleerimine	7
4.1 Projekteerimistingimused	7
4.2 LC-filtri arvutamine	8
4.3 Juhtimissüsteemi kirjeldus.....	12
4.3.1 Tagasisidestatud juhtimissüsteem.....	14
4.4 Vaheldi riistavara mudel.....	17
4.5 Simulatsiooni tulemused	19
4.5.1 Sümmeetriline koormus.....	19
4.5.2 Asümmeetriline koormus	23
4.5.3 Mittelineaarne koormus	24
5. PROTOTÜÜBI EHITAMINE	26
5.1 Filtri praktiline valmistamine ja materjalide valik	27
5.1.1 Poolid.....	27
5.1.1.1 Rakis.....	29
5.1.2 Kondensaatorid	30
5.2 Andurite valik ja integreerimine süsteemi	30
5.2.1 Pinge anduri takistused	32
5.2.2 Vooluanduri keerud.....	33
5.2.3 Andurite kalibreerimine	35
5.3 Tugiplaadi roll ja valmistamine.....	35
5.4 Stendi töö ja katsetulemused	36
6. KOKKUVÕTE	41
7. SUMMARY.....	43
KASUTATUD KIRJANDUS	45
LISAD	47
Lisa 1 Olemasoleva vaheldi skeem	48
Lisa 2 PLECS simulatsioon.....	49
Lisa 3 RT Box'i juhtimine	50
Lisa 4 Sensorite trükkplaadi skeem	51
Lisa 5 Trükkplaadi joonis ilma maandus polügoonideta	52

1. EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema algatajaks oli töö koostaja enda soov saada täiendavaid teadmisi kolmefaasiliste süsteemide valdkonnas. Juhendaja, Indrek Roasto, suunas töö koostajat TalTechis poolelioleva projekti juurde, mille valmiseni võimaldas tõsta ülikooli laborite katsevõimekust ning anda tudengitele praktiline õppevahend. Peamiselt koguti algteadmisi internetist, ent osa infost pärines ka paberandjalt.

Antud lõputöös uuritakse kolmefaasilise vaheldi ehitust ja toimimist. Samuti käsitletakse vaheldile filtri disainimist ning dq-juhtimise loomist, kasutades selleks PLECS-i simulatsioonikeskkonda.

Võtmesõnad: kolmefaasiline inverter, kolmefaasiline vaheldi, dq-juhtimine, LC-filter, bakalaureusetöö.

2. SISSEJUHATUS

Kolmefaasiline vaheldi on tänapäeva elektrisüsteemides olulisel kohal, eriti arvestades elektrifitseerimise, salvestustehnoloogiate ja taastuenergiaallikate kasutamise kasvavat mõju.

Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis on jõuelektroonika nii bakalaureuse kui ka magistrikavas sees, mistõttu on oluline tutvustada tudengitele ka vaheldi tööpõhimõtet ning võimaldada neil sellega seotud praktilisi katseid läbi viia. Enne töö koostamist puudus instituudis sobiv kolmefaasilise vaheldi katsestend, mis on ühtlasi antud lõputöö teema põhjuseks.

Antud lõputöö eesmärgiks on luua kolmefaasilise vaheldi katsestend, mis võimaldaks nii õppetöös kui ka teadustöös vaheldi tööpõhimõtetega tutvumist ning teostada võimsa siinuselise toiteallika katseid. Sellest tulenevalt on lõputöö tulemusel oodata praktilist ja kasutuskõlblikku lahendust, mis toetaks instituudi õppe- ja teadustegevust ning aitaks kaasa tudengite praktiliste oskuste arendamisele.

Lõputöö eesmärkide saavutamiseks rakendatakse integreeritud uurimismetoodikat, mis kaasab olemasoleva informatsiooni analüüsi, mõõtmisi, simuleerimist ning katsetamist. Mõõtmistel kasutatakse mõõtevahendeid nagu ostsiloskoop ja multimeeter. Simuleerimiseks kasutatakse arvutiprogrammi PLECS ning filtri arvutamisel kasutakse programmi MATLAB.

Kolmefaasilise vaheldi ehitus rajanes olemasolevale ühefaasilisele vaheldi stendile, mis jäi üle Euroopa lineaarkiirendi projektist. Antud lõputöö üheks motivatsiooniks oli efektiivselt ära kasutada olemasolevat seisma jäänud elektroonikat. Olemasolevale vaheldile tuli lisada mõningad elemendid ning teostada mõningad muudatused, milleks olid (kirjeldatud pikemalt lõputöö põhiosas):

- Ühefaasilise muunduri muutmine kolmefaasiliseks.
- LC-filtri ehitamine ja lisamine süsteemi.
- Juhtimissüsteemi muutmine suletud ahelaga juhtimiseks (andurite ja kontrolleri lisamine).
- Kaitsealgoritmide lisamine.
- Stendi sisend- ja väljundosa kohandamine labori toitevõrguga.

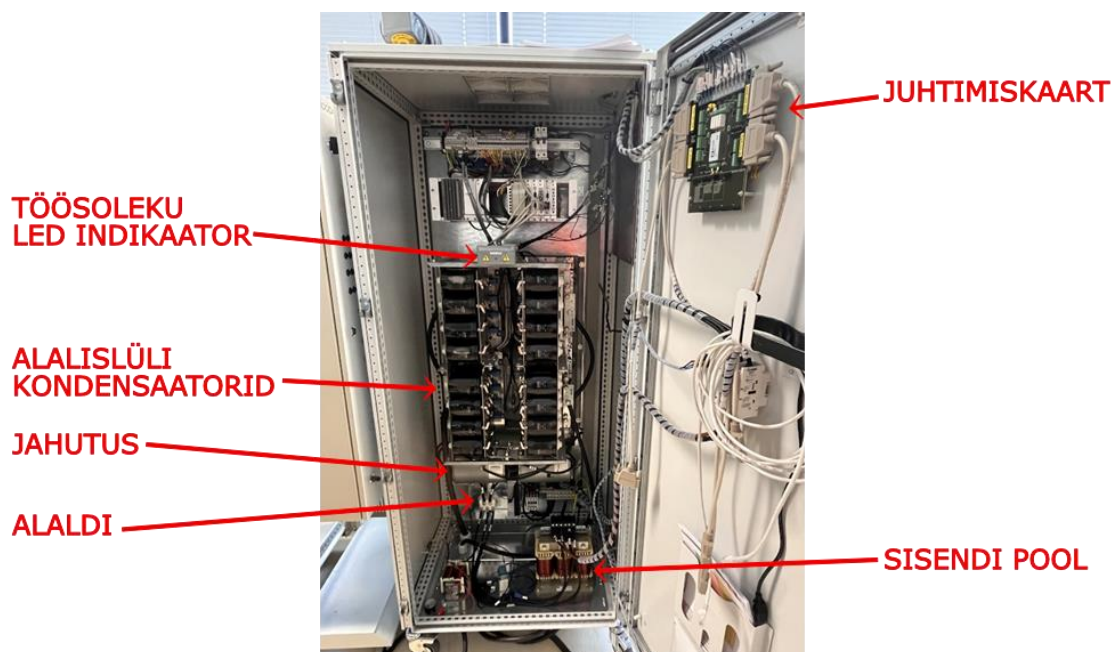
Lõputöö lisades on esitatud suuremad joonised.

Võtmesõnad: kolmefaasiline inverter, kolmefaasiline vaheldi, dq-juhtimine, LC-filter, bakalaureusetöö.

3. OLEMASOLEVA ÜHEFAASILISE VAHELDI ÜLEVAADE JA PÕHIFUNKTSIOONID

Töö põhineb Euroopa lineaarkiirendi projektist ülejäänud vaheldistendi ümberehitamisel (vt joonis 3.1). Olemasoleva ühefaasilise vaheldi uurimine nõudis põhjalikku lähenemist, kuna jõuosa elektriskeemide ja funktsioonide osas oli vaja täiendavat selgust. Esmalt oli oluline tuvastada süsteemi põhiline struktuur ja selle komponendid. Selgitustöö käigus ilmnis, et muunduri riistvara koosnes ühefaasilisest alaldist ja sellele järgnevast ühefaasilisest kõrgsagedusvaheldist. Kuna lineaarkiirendi projekt ei vajanud siinuseelist väljundit siis ei oma olemasolev vaheldi väljundfiltrit. Lisaks oli stend varustatud laadimistakisti ja tööoleku LED-indikaatoriga.

Lisaks jõuosale oli vaheldil ka eraldi abitoide, mis toitis juhtimissüsteemi, transistoride juhtahelaid ja jahutusventilaatorit. Ventilaator töötab pidevalt sõltumata transistoride temperatuurist.



Joonis 3.1 Olemasolev ühefaasiline vaheldi enne muutmist

Vaheldi põhines avatud ahelaga juhtimisel st ilma tagasisideta juhtimisel. Transistoride juhtsignaalid genereeriti reaalaja simulaatorseadmega RT Box, mis võimaldab jõuelektronika kiirprototüüpimist. RT Box oli vaheldi jõuosaga ühendatud läbi spetsiaalse sisendite ja väljundite trükkplaadi (juhtimiskaardi).

Kiirprototüüpimine ei vaja sügavaid koodikirjutamise teadmisi. Juhtimiseks kasutatakse

graafilisi plokke, millele tuleb ette anda vaid parameetrid. Kiirprototüüpimine ehk graafiline programmeerimine võimaldab juhtimises teha kiirelt ja efektiivselt muudatusi. Plokkskeemi on ka lihtsam lugeda kui koodi mõnes programmeerimiskeeles ja sellega saab hakkama iga vastava haridusega insener. Seetõttu sobib kiirprototüüpimine hästi ka nii õppe kui teadustöökaks ning RT Boxi otsustati kasutada ka kolmefaasilise vaheldi juhtimiseks antud lõputöös.

Ühefaasilise vaheldi põhjalik uurimine ja süvitsi mõistmine oli vajalik selleks, et jätkata edasiste täienduste ja modifikatsioonidega, mis on seotud kolmefaasilise vaheldi loomise ja funktsionaalsuse täiustamisega. Selles kontekstis oli üks olulisemaid aspekte jõuosa detailne analüüs ja dokumentatsioon (koostatud joonis on leitav lisas 1), mis võimaldas paremini mõista vaheldi toimimist ning tagada selle stabiilne ja ohutu kasutamine erinevates rakendustes ja keskkondades.

4. VAHELDI MODELLEERIMINE JA SIMULEERIMINE

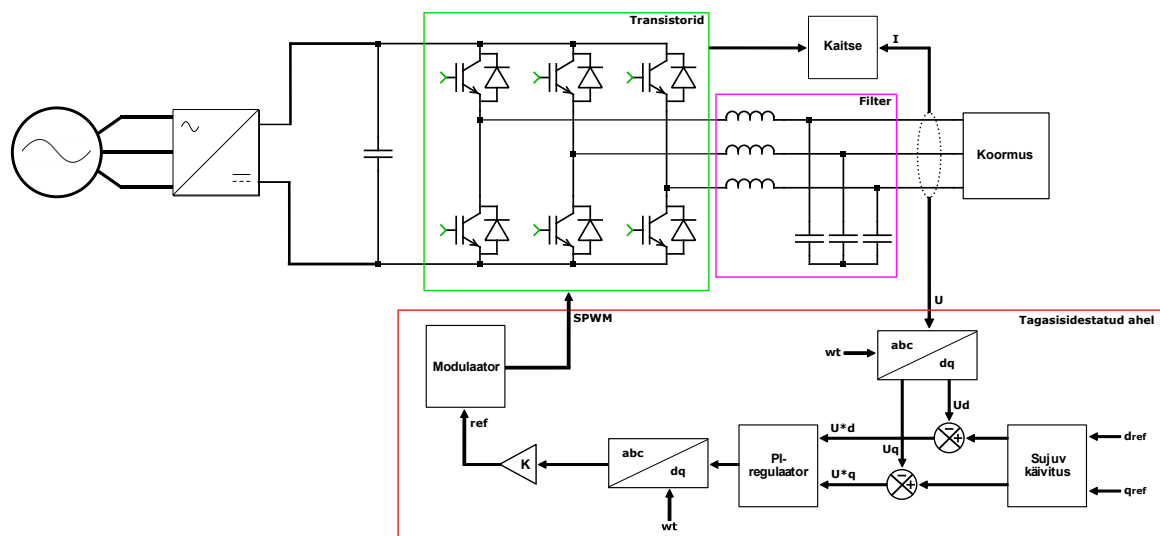
Kolmefaasilist vaheldit modelleeriti PLECS tarkvaras, eesmärgiga kontrollida süsteemi teoreetilist toimimist ning selleläbi parandada ja täpsustada juhtimist, võttes seejuures arvesse komponentide nominaal- ja maksimaalvoolude ning nende taluvuspiiride vahelist tasakaalu. Selle kaudu sooviti vältida komponentide ülekoormust ja tagada piisav varu erinevateks ettenägematuteks olukordadeks.

4.1 Projekteerimistingimused

Projekteerimine toimus tabeli 4.1 parameetrite ja joonise 4.1 diagrammi alusel. Tabeli maksimumväärtused tulenevad olemasolevate andurite taluvuspiiridest. Sagedusel võeti aluseks Euroopa standard. Väljundpinge korral eeldati, et see ei saa olla suurem kui sisendpinge ning selle tõttu määrati see sisendpingega võrdseks.

Tabel 4.1 Projekteerimise põhiparameetrid

Parameeter	Väärtus	Ühik
Nominaalvool, I_{nom}	12	A
Voolu maksimum, I_{max}	16	A
Sisend faasipinge, U	230	V
Nominaalne väljundsagedus, f_r	50	Hz
Transistoride lülitussagedus, f_s	15	kHz
Väljundi maksimaalne faasipinge, U_o	230	V
Nimivõimsus, P	11	kW

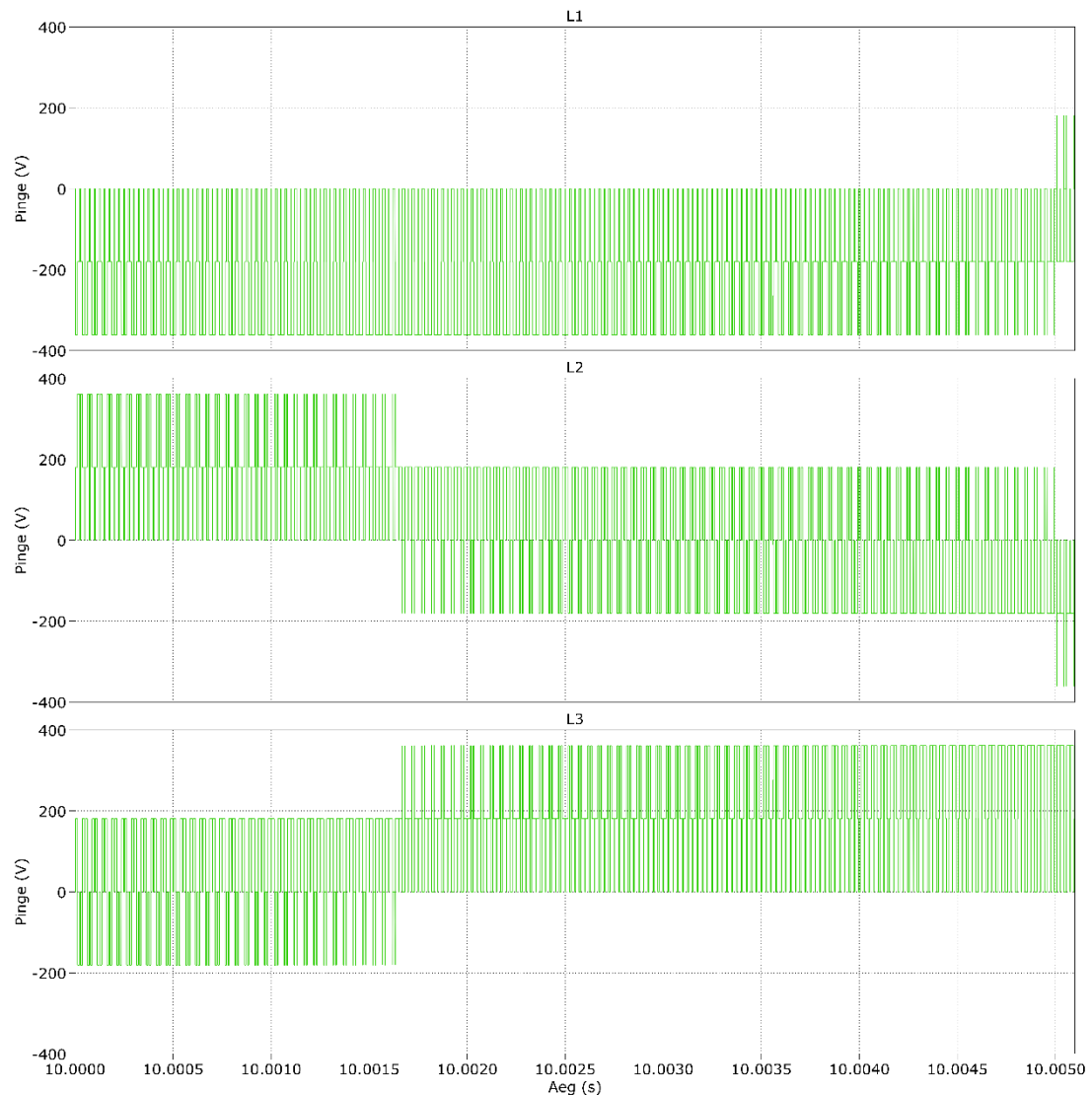


Joonis 4.1 Vaheldi jõuosa ja juhtimise lihtsustatud diagramm

4.2 LC-filtri arvutamine

Filter on oluline osa vaheldi efektiivses toimimises. Sellega on võimalik puhastada pinget ja vool häiringutest ning saada selle toimele väljundisse siinussignaale.

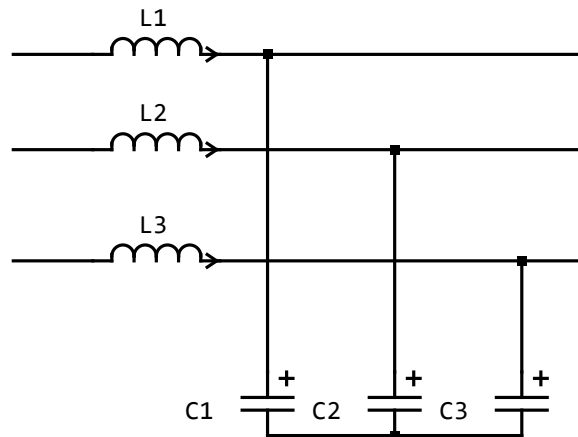
Joonisel 4.2 on välja toodud kuidas nägi välja vaheldi väljund veerandperioodi ulatuses filtrita kui väljundtakistus oli $3 \times 20 \Omega$.



Joonis 4.2 Vaheldi väljund ilma filtrita

Antud töös kasutati väljundsignaalide puhastamiseks passiivset madalpääs LC-filtrit, mille skemaatiline esitusviis on esitatud joonisel 4.3. Valitud filter laseb läbi madala sagedusega signaalid ning lõikab ära kõrged. Filtri parameetrid määravad sageduspiirkonna, millest alates hakatakse signaale lõikama ning mida filter läbi ei lase. Selle tulemusena eemaldatakse häiringud ja harmoonikud, mille sagedus on kõrgem

süsteemi sagedusest. [1] Tulemuseks on antud juhul siinuseline signaal.



Joonis 4.3 Vaheldi väljundfiltri skeem

LC-filtri arvutused rajanevad ühefaasilise PWM (*pulse-width modulation* ehk PLM – pulsilaiusmodulatsioon) inverter pingeaallika arvutustel [2] ning selle alusel tuleb esmalt leida pooli induktiivsus alljärgneva valemiga:

$$L_f = \frac{U_o}{I_o f_s} \left[K \frac{U_{DC}}{U_{o,av}} \left(1 + 4\pi^2 \left(\frac{f_r}{f_s} \right)^2 K \left(\frac{U_{DC}}{U_{o,av}} \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.1)$$

kus K – kordaja,

k – modulatsiooniindeks,

U_o – nominaalpinge, V,

I_o – nominaalvool, A,

f_r – väljundsagedus, Hz,

f_s – lülitussagedus, Hz,

U_{DC} – alalispingevahelüli pinge, V,

$U_{o,av}$ – lubatud harmoonikate osakaal väljundpingest, V,

L_f – induktiivpooli induktiivsus, H.

Antud valmist on tuleb avada veel teguri K väärtus valemiga:

$$K = \left[\frac{\left(k^2 - \frac{15}{4} k^4 + \frac{64}{5\pi} k^5 - \frac{5}{4} k^6 \right)}{1440} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.2)$$

kus k – modulatsiooniindeks,

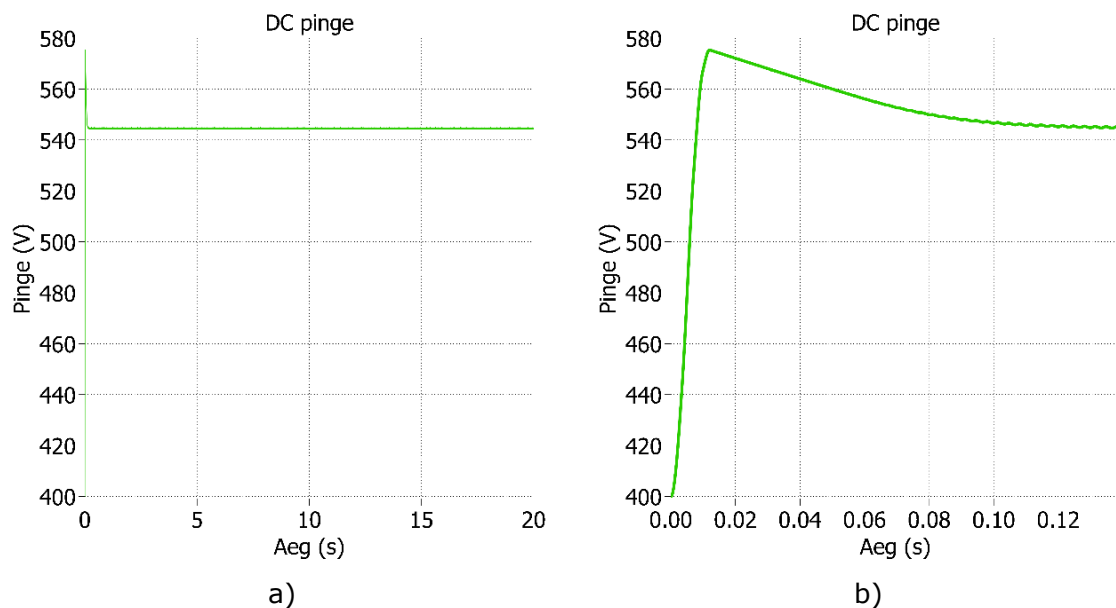
Kui on olemas induktiivsuse väärtus, saab leida mahtuvuse C_f :

$$C_f = K \left(\frac{U_{DC}}{L_f f_s^2 U_{o,av}} \right), \quad (4.3)$$

kus C_f – kondensaatori mahtuvus, F,

Valemitest tulenevalt leiti puuduvad suurused simuleerides PLECS-i keskkonnas avatud ahelaga süsteemi, mis vastasid sisendi pingele ja valitud nominaalvoolule – faasi pingele $U_o = 230$ V, nominaalvool $I_o = 12$ A. Amplituud modulatsiooni indeks k (siinussignaali kordaja) võeti simuleerides 1. Väljundsagedus jäeti Euroopa standardi järgi $f_r = 50$ Hz. Lülitussagedus võeti punktis 4.1 ette antud $f_s = 15$ kHz. Lubatud harmoonikute osakaaluks määrati 0.5%, mis on $U_{o,av} = 2$ volti 402 V liinipinge korral.

Alalisülili pingele oli üks elementidest, mis tuli leida kasutades simulatsiooni ning selle graafik on esitatud joonisel 4.3. Graafikust tulenevalt on alalispinge vahelülili stabiliseerunud osa keskvaärtuseks $U_{DC} = 546$ V.



Joonis 4.4 Alalisülili pingele 90 Ω väljund kogutakistuse korral, ilma filtrita, avatud ahelaga süsteemis: a) simulatsiooni 20-sekundiline jooksutus, b) käivituse algus

Induktiivpooli ja kondensaatori parameetrite määramiseks leitakse K valemi 4.2 alusel:

$$K = \left[\frac{\left(1^2 - \frac{15}{4} \cdot 1^4 + \frac{64}{5\pi} \cdot 1^5 - \frac{5}{4} \cdot 1^6 \right)}{1440} \right]^{\frac{1}{2}} = 0,0072$$

Asendades parameetrid ja leitud K väärtuse valemisse 4.1, leitakse vajalik induktiivsus:

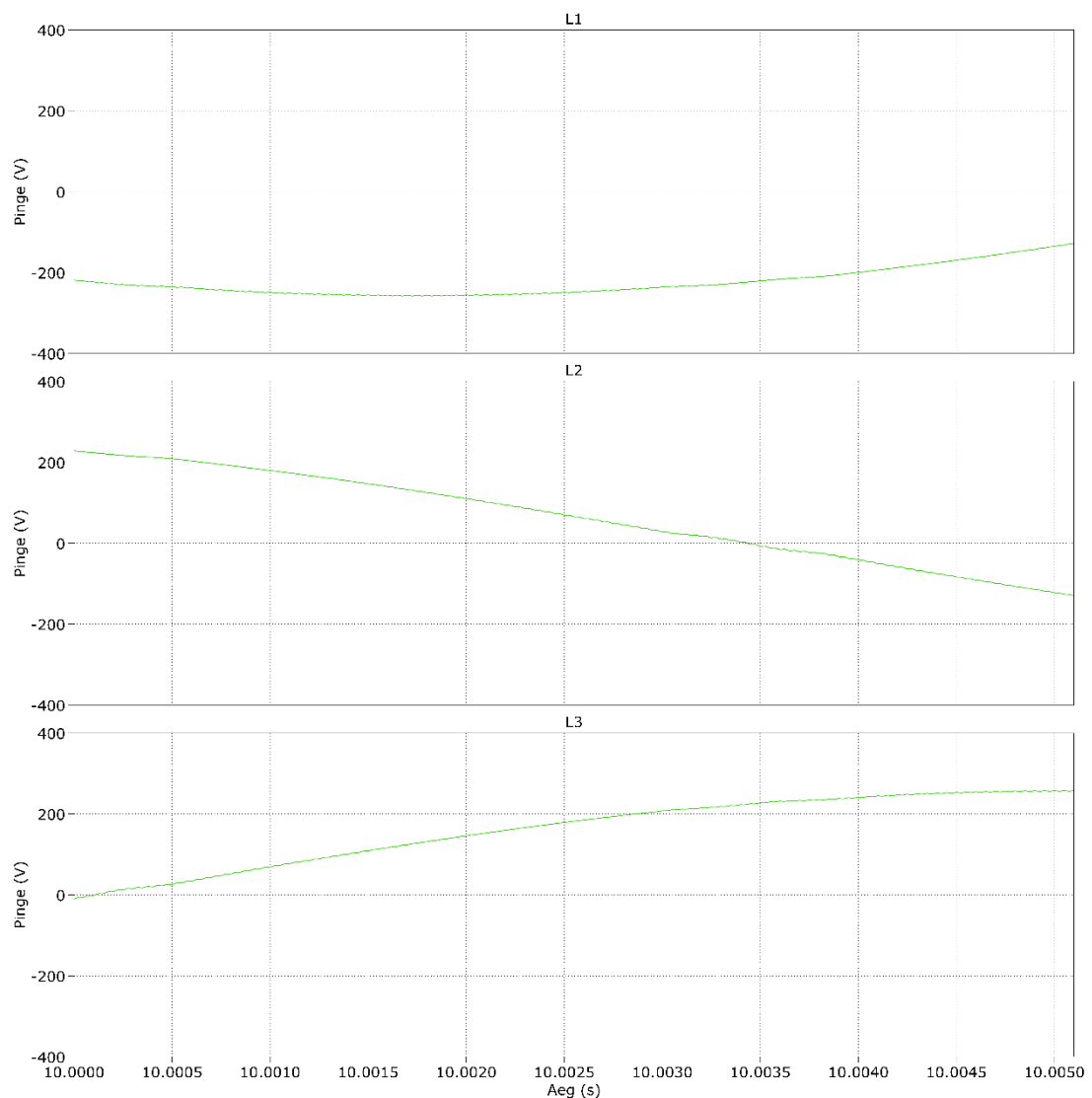
$$L_f = \frac{230}{12 \cdot 15 \cdot 10^3} \cdot \sqrt{0,0072 \cdot \frac{546}{2} \left(1 + 4\pi^2 \left(\frac{50}{15 \cdot 10^3} \right)^2 \cdot 0,0072 \left(\frac{546}{2} \right) \right)} = 0,0018 \text{ H} = 1,8 \text{ mH}$$

Nüüd saab leida kondensaatori mahtuvuse valemist 4.3:

$$C_f = 0,0072 \left(\frac{546}{0,0018 \cdot (15 \cdot 10^3)^2 \cdot 2} \right) = 4,9 \mu\text{F}$$

Olemasolevate parameetritega saab koostada filtri kolmefaasilisele süsteemile, lisades saadud parameetritega induktiivpoolid ja kondensaatorid igasse faasi.

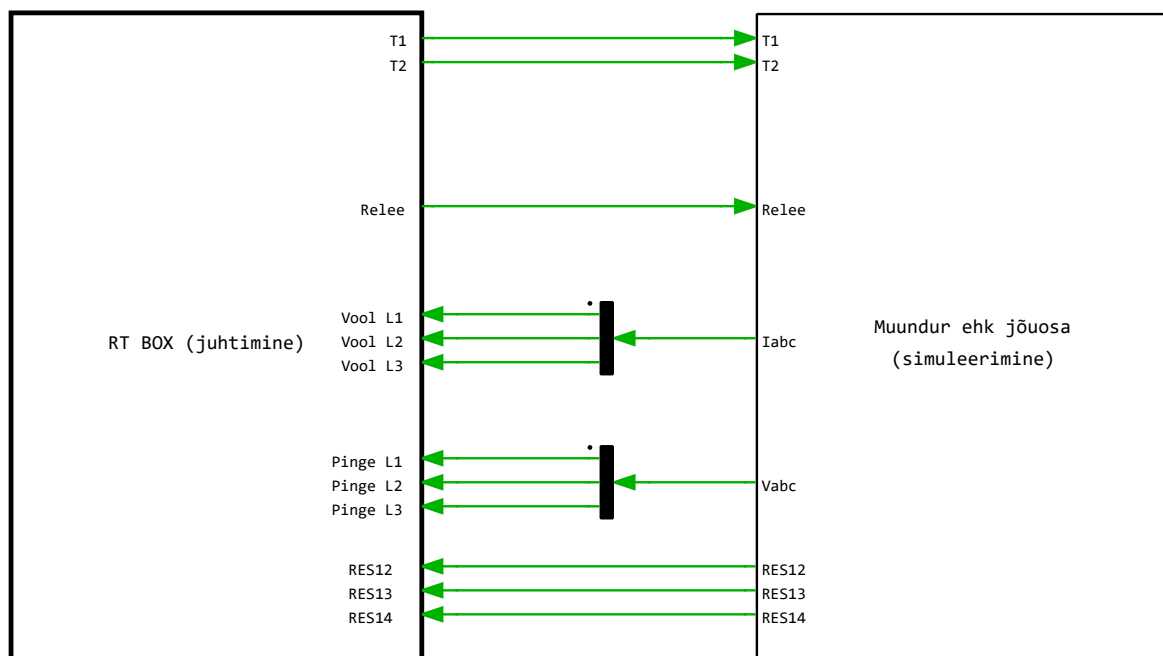
Kasutades samu parameetreid, mida kasutati joonise 4.2 korral ning vaadeldes sama perioodi, on tulemus märgatavalt muutunud (vt joonis 4.5).



Joonis 4.5 Vaheldi väljund LC-filtriga (veerand perioodi)

4.3 Juhtimissüsteemi kirjeldus

Kogu juhtimissüsteem koostati programmis PLECS. PLECS-is jaotati skeem kaheks – RT Box'i juhtimine ja simuleerimine (vt joonis 4.6). Skeem tuleb kaheks jagada kuna sedasi on sama mudeliga võimalik süsteemi nii simuleerida kui ka muundurit reaalajas juhtida. Simuleerimiseks kasutatakse jõuosa alamsüsteemi vt. joonis 4.11. Reaalse muunduri juhtimiseks kasutatakse ainult juhtimise blokki ja muundur on ühendatud mudeliga läbi RT Boxi. Simuleerimiseks on juhtimisbloki väljunditeks transistoride SPWM (*Sinusoidal pulse width modulation* ehk siinuseline pulsilaiusmodulatsioon) signaalid T1 ja T2 ning relee olekusignaali. Sisenditeks on andurite pingelised väärtused ning transistoride veasignaale.

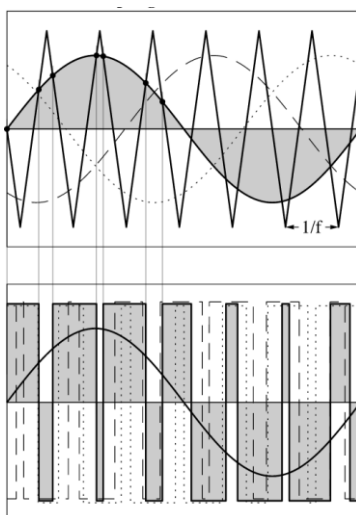


Joonis 4.6 Skeemi kõrgeim aste

RT Box'i juhtimise ploki sisu on välja toodud lisas 3. Juhtimise ploki on kõik mis ei esinda reaalsel elektrisüsteemi. Ploki skemaatika on jaotatud kuueks osaks – transistoride juhtimine, seiskamissignaali, andurite signaali, kondensaatorite laadimisrelee, juhtimine ja modulaator.

Transistoride juhtimise osas väljastatakse transistoridele PLECS-i PWM väljastusplokkide kaudu SPWM signaal, kasutades selleks modulatsiooni osas väljastatud siinust signaali, mille amplituudväärtuse määrab siinussignaali kordaja. Signaal muutmiseks SPWM signaaliks kasutatakse naturaalsel diskreetimist, mis on

nähtav joonisel 4.7. Lisaks on plokis valitud polaarsus, mis positiivsed signaalid väljastab ülemistele transistoridele ning negatiivsed alumistele ning 0 signaali korral suleb mõlemad transistorid. 0 väärtus rakendub ka programmi või RT Box'i seiskumise korral, mis tagab ohutuse. Vältimaks nii ülemise kui ka alumise transistori ühel ajal lülitamist, määratakse ka „*dead-time*“ (ajavahemik kahe lülituse vahel, kui kumbi transistor pole sisse lülitatud).



Joonis 4.7 Naturaalne diskreetimine (kandelaaine alustab keskelt) [3]

Vaheldi varustati ületemperatuuri ja -voolukatsetega.

IGBT moodulid on varustatud ületemperatuuri kaitsega. Vastavad veasignaalid annavad teada kui seade kuumeneb üle. See tähendab seda, et kui transistoride mooduli temperatuur ϑ_{DCB} tõuseb üle $(115 \pm 5)^\circ C$, siis väljastatakse RT Box'ile signaal 1. [4] Signaali väärtuse 1 korral programm peatatakse ning transistorid sulguvad. Põhjusel, et PLECS-i „*assertion*“ plokk töötab 0 korral, siis invertteeritakse sinna minev signaal.

Ülevoolukatise baseerub vaheldi vooluanduritel, mis mõõdavad väljundi voolu efektiivväärtust.

Kondensaatorite laadimisrelee on vajalik, et seadme käivitamisel vältida liigselt kõrget ja järsku voolu kondensaatoritel, mis kahjustaks seadet. Selleks ühendatakse releega süsteemi 50.6Ω lisatakistus.

Juhtimise osas kasutatakse sisendina pingeadurite signaale. Selle kohta on täpsemalt kirjutatud punktis 4.3.1.

Modulatsiooni osas saab kasutaja valida, kas soovib kasutada avatud või suletud ahelat. Suletud ahela korral kasutatakse juhtimises saadud tagasiside, kuid avatud ahela korral genereeritakse SPWM vaid sõltuvalt siinussignaali kordajast.

4.3.1 Tagasisidestatud juhtimissüsteem

Töö tegemise käigus ei leitud vastavaid näiteid pinge juhtimise skeemide kohta, mis ei oleks seotud üldvõrku ühendamisega. Selleks koostati tagasisidestatud ühele dq-voolujuhtimissüsteemile [7] sarnane pinge juhtimise süsteem, millele hiljem lisati sujuv käivitus, kuna reaalse seadme korral tekkisid suuremad voluhüpped.

Väljundis juhitakse pinget vastavalt kasutaja poolt sisestatud väärtusele. Selle toimimiseks kogub süsteem läbi pingeadurite informatsiooni, töötleb seda ning saadab vajaliku signaali modulatsiooni. Juhtimise osa on nähtav joonisel 4.9.

Väljundist mõõdetakse faasipingeid, mis kombineeritakse „3ph->RRF“ plokis koos saehammaslainega (vt joonis 4.8) kahedimensiooniliseks vektoriks $[y_d \ y_q]$, mis kirjeldab sisendi aktiiv- ja reaktiivosa. Antud protsessi kirjeldab alljärgnev valem [3]:

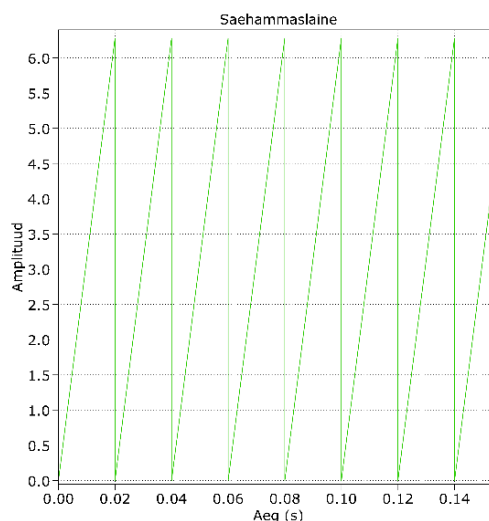
$$\begin{bmatrix} y_d \\ y_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \cos(\varphi - 120^\circ) & -\sin(\varphi - 120^\circ) \\ \cos(\varphi + 120^\circ) & -\sin(\varphi + 120^\circ) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

kus y_d – aktiivosa, V,

y_q – reaktiivosa, V,

φ – pöörleva *reference frame*'i pöördenurk, rad,

x_a, x_b, x_c – liinipinged, V.



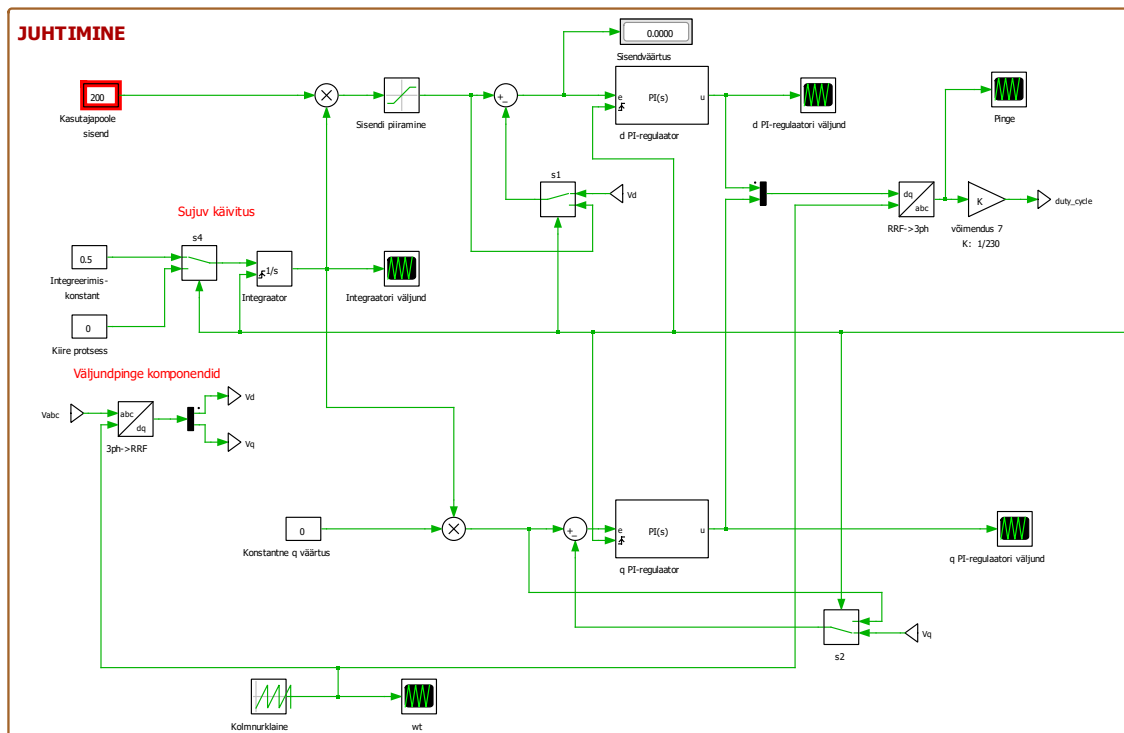
Joonis 4.8 Juhtimissüsteemi saehammaslaine

Saehammassignaali väärtused liiguvad 0-st 2π -ni 50 hertsise sagedusega.

Leitud vektori $[y_d y_q]$ väärtusi y_d ja y_q võrreldakse kasutaja sisestatud väärtustega. Skeemidel on y_d ja y_q esindatud vastavalt V_d ja V_q . Joonisel 4.9 võrreldakse V_d väärtust 200 V-ga ning V_q -d 0-ga. Põhjusel, et antud süsteemis puudub reaktiivenergia genereerimine ja juhtimise võimekus, siis nullitakse kontrollsüsteemis selle väärtus alumises rööpahelas.

PI-regulaator muudab signaali sujuvamaks ning vähendab sellega häiringuid väljundpinges. Lisaks sellele on sellel oluline roll koormushüpete korral. Õigete parameetrite korral parandab see märgatavalt süsteemi toimetulekut muutustele, vältides kõrgeid voluhüppeid. Parameetrid leiti katseeksitusmeetodil, simuleerides suuri koormushüppeid ning katsetades erinevaid P ja I väärtuseid reaalse seadme juhtimisel. Aktiivosa PI-regulaatori optimaalseteks parameetriteks saadi $P = 0.05$ ning $I = 0.5$, reaktiivosa korral oli P sama, kuid $I = 0.15$. Erinevus PI-regulaatoriga ja ilma selleta süsteemi võrdlus välja toodud joonisel 4.11. Jooniselt on näha, et juhtimissignaali häiringud vähenevad märgatavalt ning see on koormushüpete poolt vähem mõjutatav. Simulatsiooni üldisi väljundpinge väärtusi see ei mõjutanud, kuid PI-regulaator mõjutas reaalse seadme käivitusvoole ja pingeid, aidates kaasa sujuvale käivitusele.

Peale võrdlust ja PI-regulaatorit kombineeritakse taaskord suurused V_d ja V_q vektoriks ning valemiga 4.6 kolme faasiliseks signaaliks.

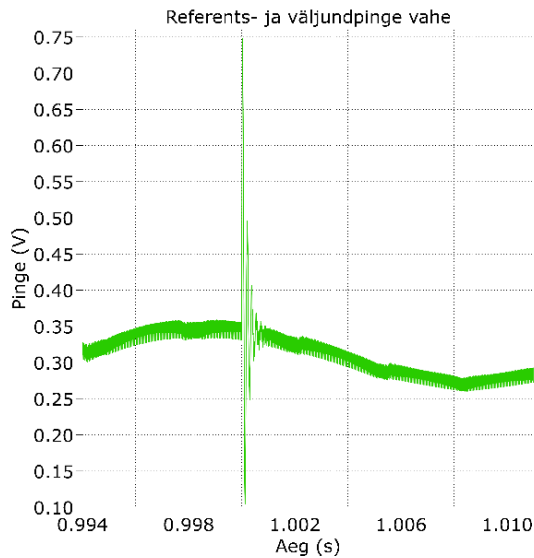


Joonis 4.9 Süsteemi töötlemine ja juhtimine

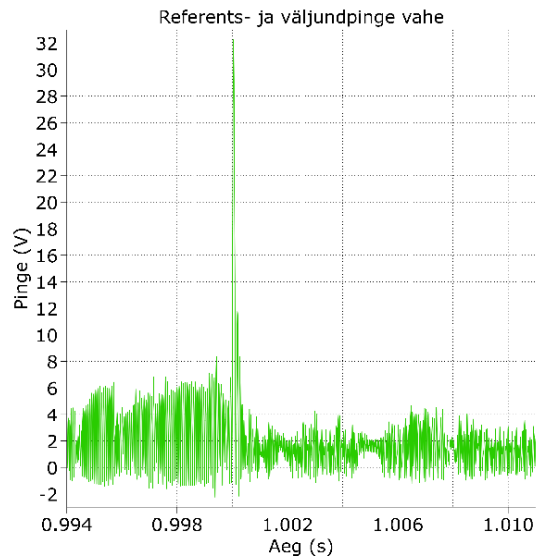
Saadud signaal edastatakse transistoride, inverteerides ühe rea transistoride signaalid. See tagab selle, et ülemine ja alumine transistor ei oleks korraga sees, mis võib lühistada elektrisüsteemi.

Simulatsioonis toimis juhtimine ka ilma sujuva käivitusega, kuid kui katsetati seda reaalse vaheldi peal, siis voolud ja pinged läksid käivitades ülemäära suureks. Selle parandamiseks loodigi sujuv käivitus.

Sujuva käivituse loomiseks lisati esmalt süsteemi kasutajapoolse sisendi läbi korrutamine integraatoriga, mis sujuvalt suurendab süsteemi edastatavat kasutajapoolset väärtust. Püsiolekusse jõudmise aega on võimalik kergesti muuta integreerimiskonstandi läbi. Integraatori ja PI regulaatorite integraatorite väärtused on vajalik ära nullida kui süsteemi tüüpi muudetakse (avatud ja suletud ahel) ning PI regulaatorisse tuleb edastada 0-signaali, et proportsionaalne tegur ei saaks avatud ahelaga süsteemi toimimise ajal juba tõusta. Selleks, et teostada integraatorite nullimist, edastatakse juhtimisviisi signaali olek integraatorite nullimise sisendisse ning kui selle signaali väärtus on 1 (avatud ahelaga süsteem), siis kõik integraatorid väljastavad 0 väärtust kuni kasutatakse juhtimisega süsteemi.



a)

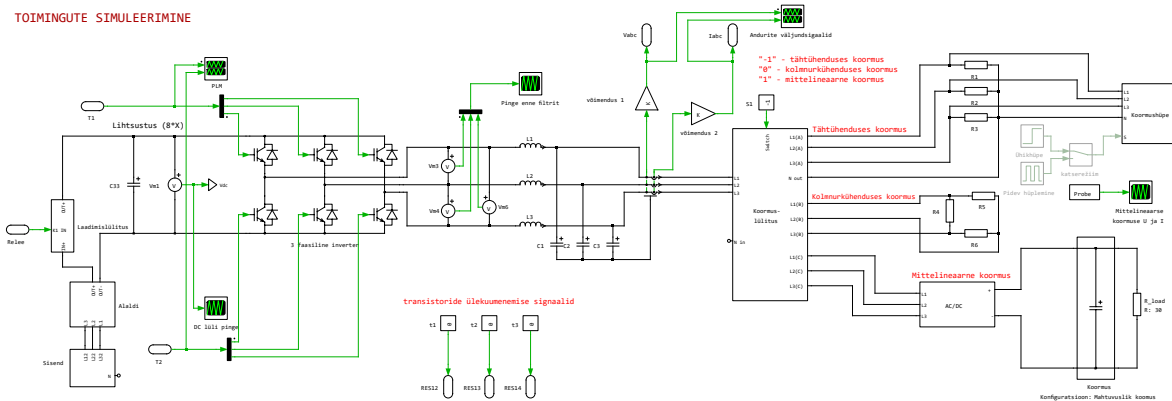


b)

Joonis 4.10 D komponendi PI-regulaatori väljund koormushüppe (50%) korral: a) PI-regulaatoriga, b) PI-regulaatorita

4.4 Vaheldi riistvara mudel

Vaadeldes vaheldisimulatsiooni plokki (vt joonis 4.11), koosneb see vaheldi reaalsete komponentide mudelist.



Joonis 4.11 Vaheldi riistvara mudel

„TOIMINGUTE SIMULEERIMINE“ sisendi allsüsteem koosneb pingesallikast ja poolist. Pingesallikas representeerib 325 voldist 50 hertsist seinakontakti ning pool seadme sees olevat reaalselt pooli LR3 40-5/8, mille induktiivsus on 4,6 mH igas faasis (võetud andmelehest [5]).

Alaldi allsüsteem esindab reaalselt SKD 210/12 [6] diodalaldi. Diiodide päripinge valiti

vastavalt andmelehe V_F ja $V_{(TO)}$ maksimumide keskmine. Milleks oli 1,25 V.

Simuleerides võeti kondensaatorid kokku ühe mahtuvusliku parameetriga. Selleks võeti aluseks lisas 1 koostatud elektriskeem, kus tulenevalt põhivalemitest rööbiti olevate kondensaatorite mahtuvused liideti (vt valem 4.5) ning jadamisi olevad kombineerused sarnaselt rööbiti takistuste valemiga (vt valem 4.6). Kasutatud valemid olid alljärgnevad:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (4.6)$$

Valemite rakendamise tulemusena leiti kogumahtuvus 17,6 mF, mis on kaheksakordne ühe kondensaatori mahtuvus.

Transistoride osa on lihtsustatud kolm SKIIP 1242GB120-407CTVF [4] moodulit, kus üks transistor esindab mooduli terve rea transistoreid. Reaaluses on transistorid sarnaselt ühendatud. Transistoreid on rohkem, et võimaldada läbi lasta suuremat võimsust.

Transistoride poolt genereeritud pinge puhastatakse disainitud LC-filtriga ning seejärel on lõppsignaali võimalik katsetada täht- ja kolmnurkühenduses olevate koormustega ning mittelineaarse koormusega. Koormuse tüüpi saab muuta läbi konstandi väärtuse, mis vahetab lülite abil väljundit:

„-1“ – tähtühendus;

„0“ – kolmnurkühendus;

„1“ – mittelineaarne koormus.

Seadme väljund ühendati filtri kondensaatorite neutraalpunkti, mis jätab võimaluse kasutada seadet neutraaliga, kuid simulatsioonide tulemusel on ilma neutraali ühendamata pinged võrdsed.

Peale filtrit mõõdetakse voolu ja pinget, mis saadetakse edasi juhtimisse. Kordaja signaalil esindab reaalse pinget ja voolu väärtust 5 V skaalal.

4.5 Simulatsiooni tulemused

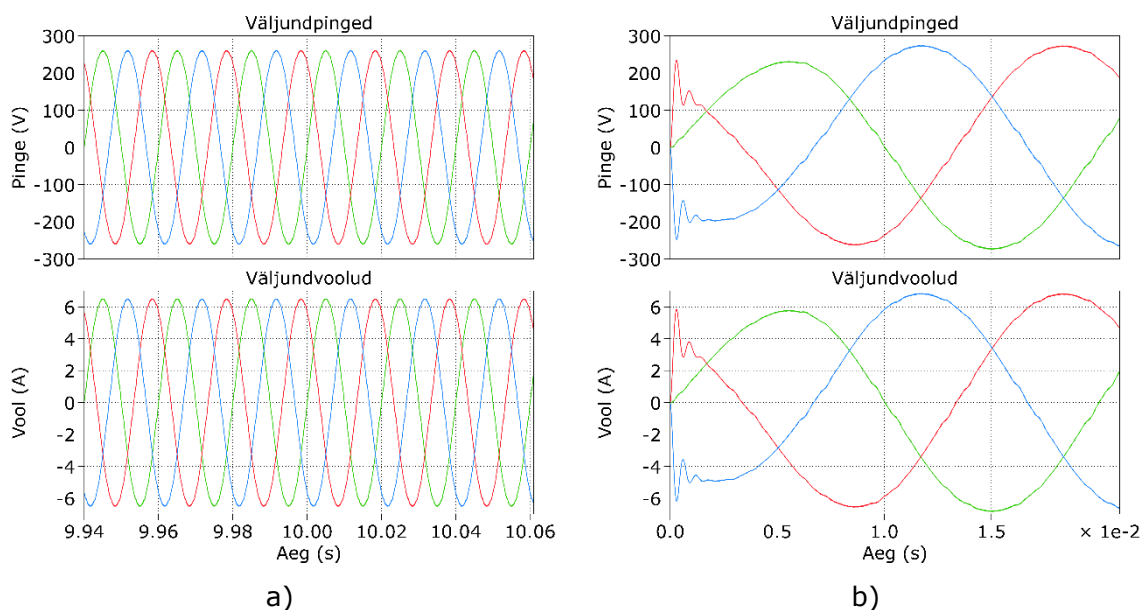
Antud alapeatükis kirjeldatakse kuidas leitud filter ja juhtimine käitub sümmeetrilise ja ebasümmeetrilise ning mittelineaarse koormuse korral.

4.5.1 Sümmeetriline koormus

Avatud ahelaga süsteemi toimimist kontrolliti iga 0.1 siinussignaali kordaja korral ning joonisel 4.12 on esitatud suurima kordaja (1) graafik kui koormus on 3×40 oomi.

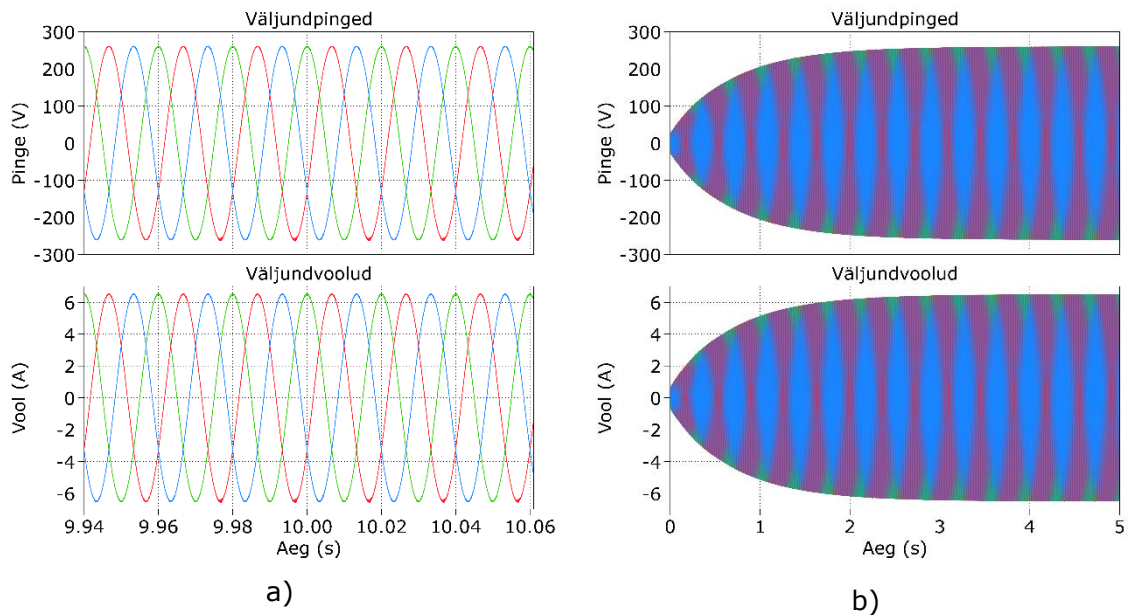
Graafikult on näha, et maksimaalne pinge amplituud antud koormuse korral on 260 V ning voolu amplituud samal juhul on 6.5 A. Leitud maksimaalne pinge oli sama ka teiste koormuste korral ning selle tõttu piirati ka juhtimisel maksimum seadistuse väärtust selle pingega, et vältida siinussignaali kordaja suurenemist üle ühe, mis mõjutab siinuse kuju.

Koormuse suurus valiti eeldatava katsekoormuse järgi.



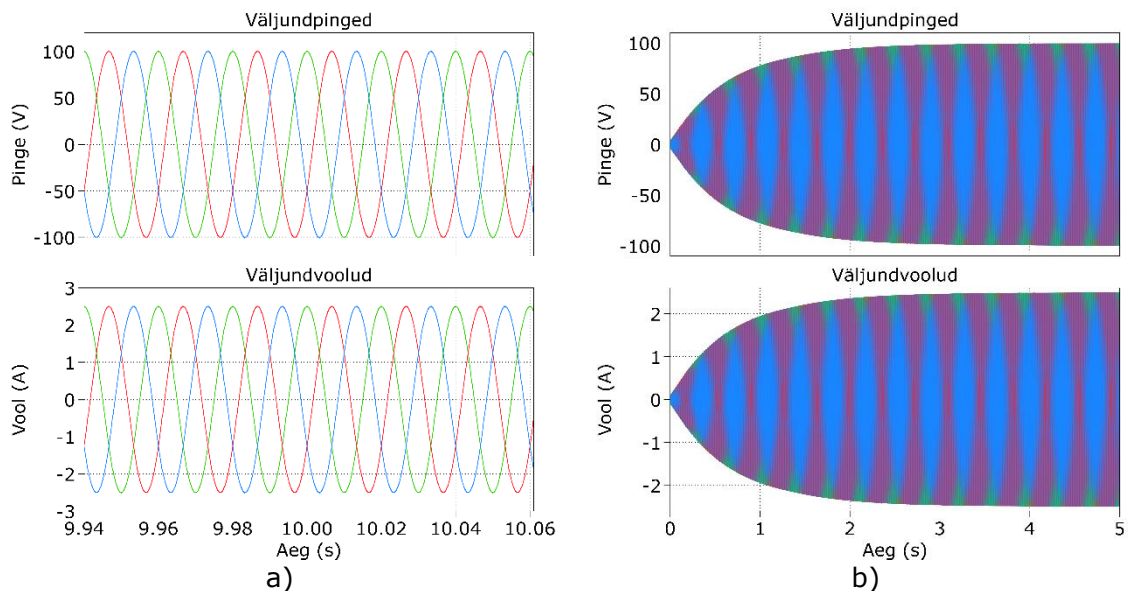
Joonis 4.12 Koormusvool ja -pinge, kui koormus on $3 \times 40 \Omega$: a) stabiliseerunud olek, b) käivitus

Avatud ahelaga süsteemi maksimumpingega katsetati ka tagasisidestatud juhtimist. Selleks määrati kasutajapoolseks sisendiks pinge väärtus 260 V. Tekkinud graafik on esitatud joonisel 4.13.



Joonis 4.13 Koormusvool ja -pinge, kui koormus on $3 \times 40 \Omega$ ja pinge on seatud 260 V: a) stabiliseerunud olek, b) sujuv käivitus

Juhtimisel tekkinud siinus on mõnevõrra puhtam ning see jõuab maksimumpingeni rahulikumalt. Avatud ahelaga juhtimise korral olid siinuse tipuosas minimaalsed moonutused, kuid juhitud süsteemi korral on need eemaldatud.



Joonis 4.14 Koormusvool ja -pinge, kui koormus on $3 \times 40 \Omega$ ja pinge on seatud 100 V: a) stabiliseerunud olek, b) sujuv käivitus

Simuleeritud katse andis aimu, et juhitud süsteem suudab edukalt väljastada pinget siinussignaali kordajaga kuni 1.

Süsteemi juhtimise tõestamiseks katsetatakse ka madalamat pinget, seades pinge väärtuseks 100 V. Tekkinud graafik on esitatud joonisel 4.14.

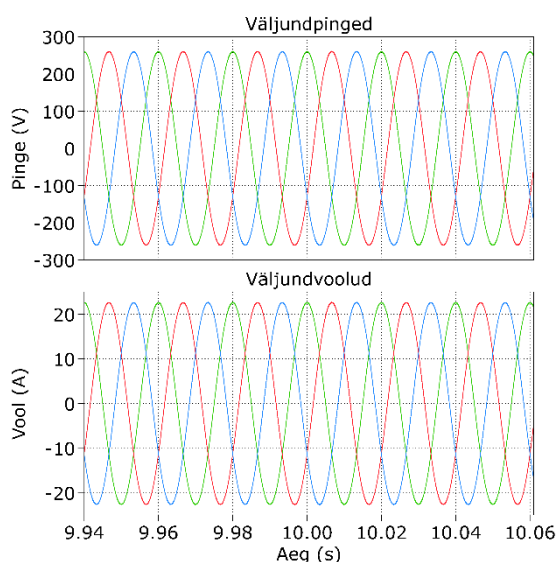
Seadme teoreetilist maksimumvõimsust väljastavat takistit saab arvutada kasutades Ohmi seadust. Lisaks tuleb leida pinge RMS väärtus, sest eelnevad suurused olid amplituudväärtused. Seda saab teha valemiga:

$$U_{RMS} = \frac{U_{AMP}}{\sqrt{2}} \quad (4.7)$$

Sellest tulenevalt vastab faasi korral 260 V amplituudile 184 V RMS pinge.

Kasutades seda väärtust ja maksimaalset voolu, saadakse seadme maksimaalne võimsus kui koormus on $3 \times 11.5 \Omega$.

Arvutatud juht valideeritakse simulatsiooniga ning tulemus on nähtav joonisel 4.15. Jooniselt on näha, et vool ja pinge on vastavalt 184 V RMS ja 16 A RMS.



Joonis 4.15 Koormusvool ja -pinge maksimaalse vaheldi võimsuse korral

Vaheldi maksimumvõimsuse määramiseks kasutatakse järgnevat valemit:

$$P = 3U_f I_f \cos\varphi, \quad (4.8)$$

kus P – aktiivvõimsus, W,

U_f – RMS faasipinge, V,

I_f – RMS faasi voolutugevus, A,

$\cos\varphi$ – võimsustegur.

Kuna vaheldi väljastav vaid aktiivvõimsust, siis $\cos\varphi = 1$ ning valem taandub:

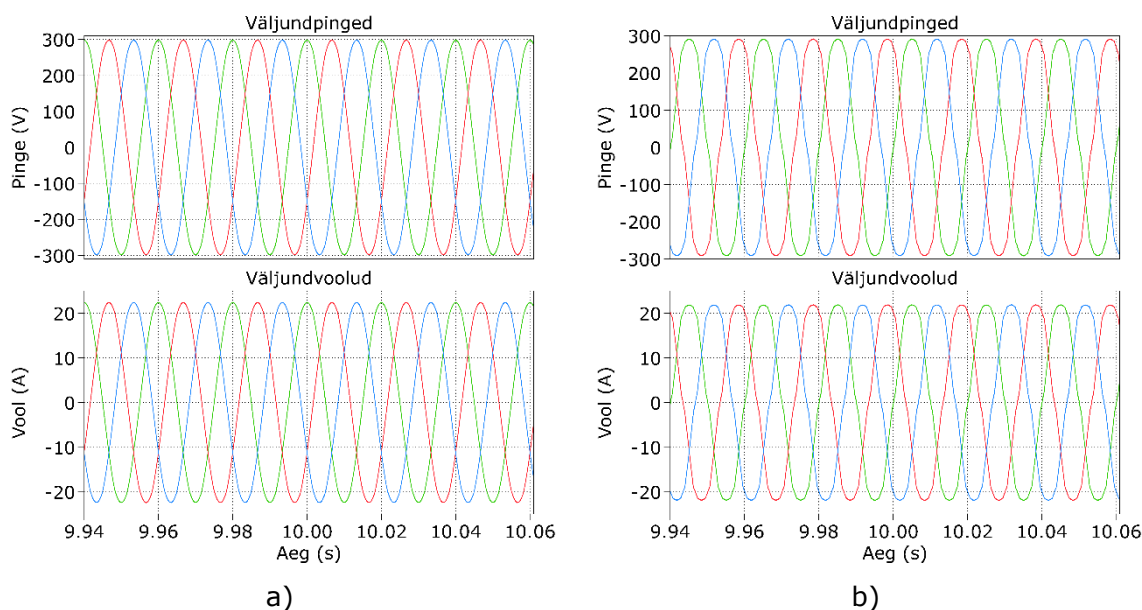
$$P = 3U_f I_f \quad (4.9)$$

Kasutades valemit tuleb maksimaalseks võimsuseks 8,832 kW, kui mitte minna üle siinussignaali kordaja 1.

Edaspidi vaadeldakse ka juhtu, kus kordaja ei ole piiratud 1-ga. Selleks suurendati PI regulaatori limiite ning eemaldati SPWM plokkidesse siseneva signaali võimendustegur.

Esmalt alustati $3 \times 40 \Omega$ koormusega ning hakati vaikselt juhtumises tõstma seadistatud väljundpinge väärtust. Maksimaalseks pingeks mida süsteem lubas sisestada, osutus 300 V. 310 V korral muutus süsteem ebastabiilseks ning programm seiskus. Seda nii antud koormuse kui ka teiste koormuste korral.

Järgnevalt reguleeriti ka avatud ahelaga süsteemi siinussignaali kordajat nii, et saavutatakse sama suur pinge maksimumväärtus. Maksimaalne kordaja, mida simulatsioon lubas sisestada oli 1,342, peale mida süsteem seiskus. Antud kordajaga saavutati ka peaaegu tagasisidestatud süsteemiga võrdne pinge. Tulemused on kõrvutatud joonisel 4.16. Takistus on antud juhul $3 \times 13.3 \Omega$, mille korral peaks olema voolu RMS väärtus 16 A.



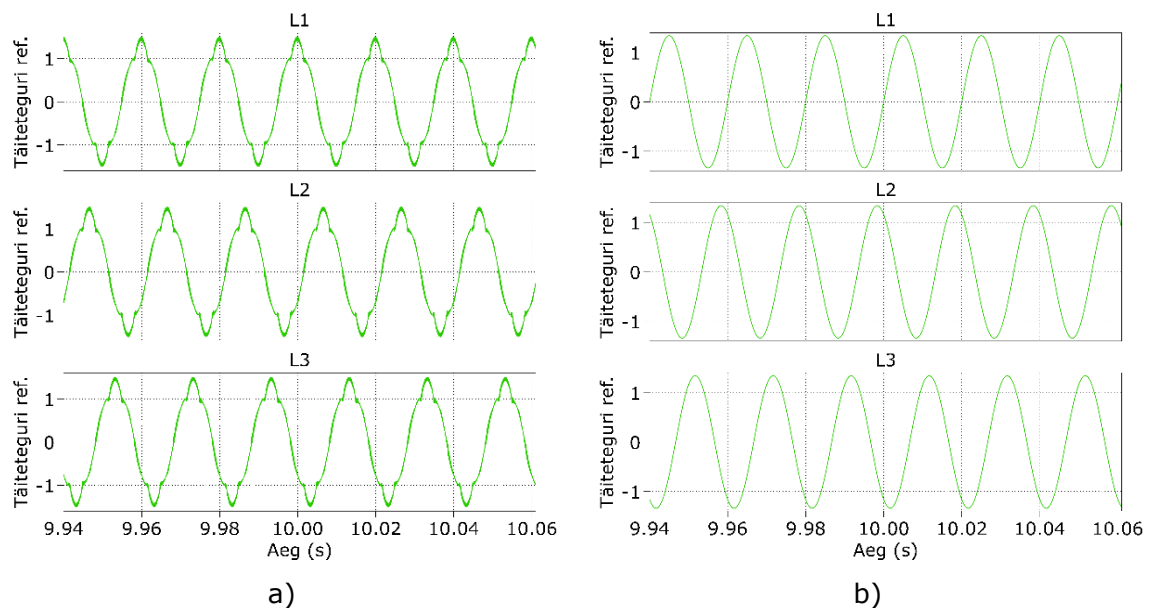
Joonis 4.16 Koormusvool ja -pinge, kui koormus on $3 \times 13.3 \Omega$ ja pinge on seatud 300 V: a) tagasisidestatud süsteemi püsiolek, b) avatud ahelaga süsteemi püsiolek, kui siinussignaali kordaja on 1,342

Jooniselt 4.16 on näha, et vaheldit saab kasutada edukalt ka suurema siinussignaali kordajaga kui 1, mis tõstab seadme maksimumvõimsust. Avatud ahelaga süsteemi korral on naha siinuse moonutust, kuid suletud süsteemi puhul moonutus puudub. Moonutuse erinevus tuleneb referentsignaali kujust, mis edastatakse PWM plokki. (vt

joonis 4.17)

Sarnase kujuga moonutus püsib ka teiste koormuste korral ning tagasisidestatud süsteemi korral püsib puhas siinuseline pinge.

Simulatsioonist tuleb välja, et vaheldit saab edukalt kasutada ka suurema siinussignaali kordajaga ning sellest tulenevalt on vaheldi maksimumvõimsus suurem kui eelnevalt määratletud. Vaheldi maksimaalne võimsus on 10,18 kW, mis on oodatud võimsusele suhteliselt lähedal.



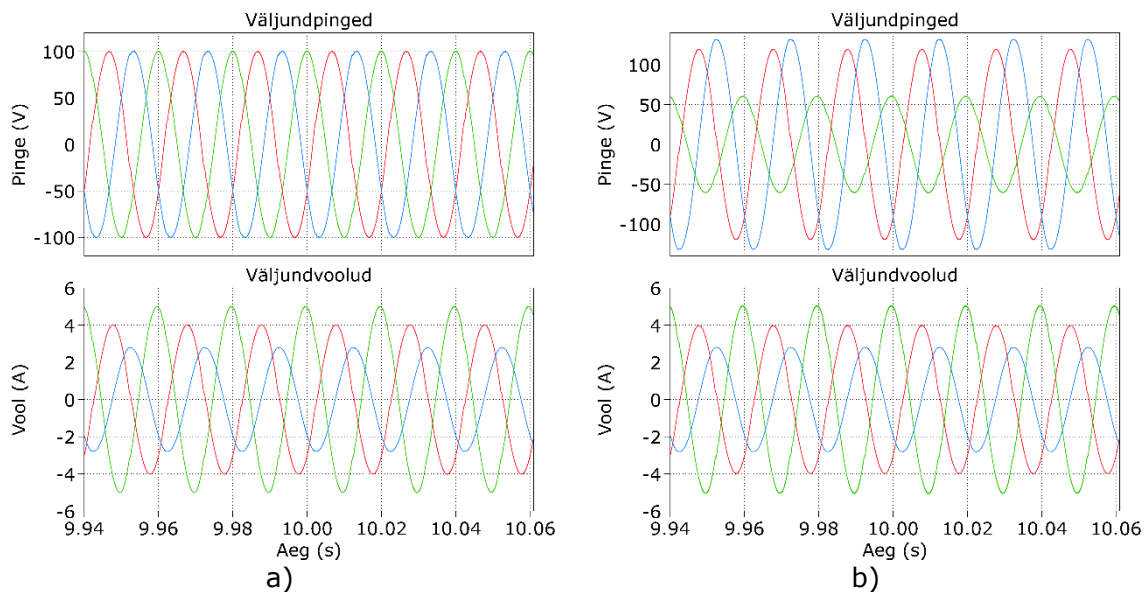
Joonis 4.17 Modulatsiooni referentssignaaliid, kui koormus on $3 \times 13.3 \Omega$ ja pinge on seatud 300 V: a) tagasisidestatud süsteem, b) Avatud ahelaga süsteem

4.5.2 Asümmeetriline koormus

Asümmeetrilise koormuse testimiseks seati simuleerimiskeskonnas väljundi iga faasi takistus erineva väärtusega - 12Ω , 30Ω ning 47Ω . Pinge juhtimissüsteemis oli seatud 100 V peale. Antud koormused faasides andisid väljundisse korrektse vähete häiringutega siinuse (vt joonis 4.18), seda nii juhul kui neutraal oli süsteemi ühendatud kui ka selle puudumisel. Graafikul näitab roheline esimest, punane teist ning sinine kolmandat faasi.

Asünkroonse koormuse korral mõjutab neutraali ühendamise pingeid, kuid mitte voole. Neutraali ühendamata jätmise muudab väljundpinge konstantseks üle kõikide faaside. Ühendades neutraali, jaguneb pinge vastavalt koormuste suurustele. Mida suurem on

koormus, seda suurem on koormusele edastatav pinge.

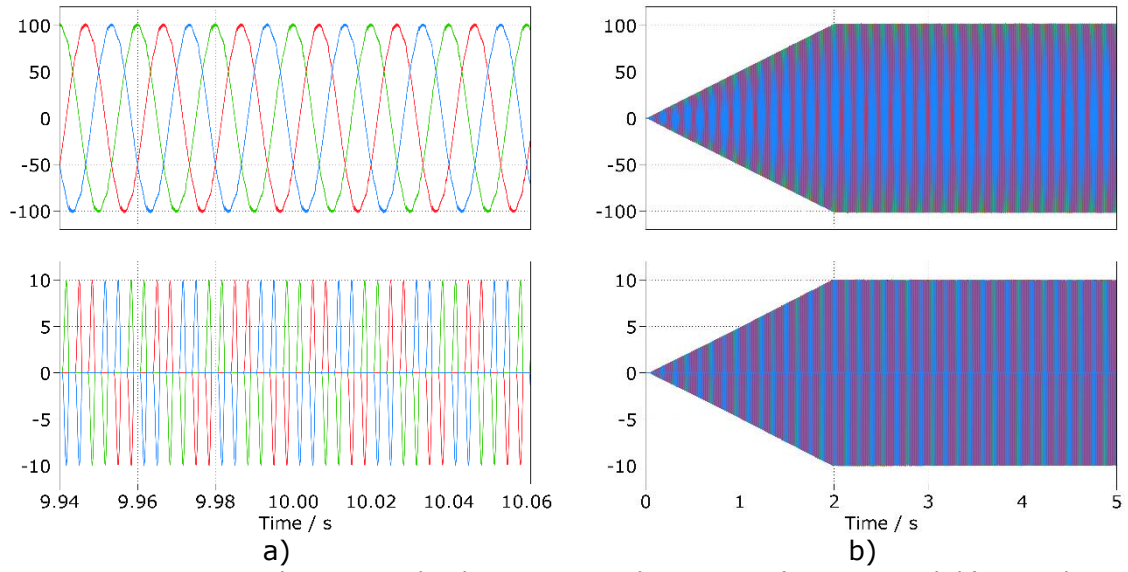


Joonis 4.18 Koormusvool ja -pinge, kui koormus on 12 Ω , 30 Ω , 47 Ω ja pinge on seatud 300 V: a) ühendamata neutraaliga, b) ühendatud neutraaliga

4.5.3 Mittelineaarne koormus

Mittelineaarse koormuse testimiseks lisati simulatsiooni väljundisse dioodalaldi, mille külge oli ühendatud omakorda mahtvuslik koormus.

Antud juhul tekkinud pingete ja voolude graafik on esitatud joonisel 4.19, kui mahtvusliku koormuse takisti on 60 Ω , kondensaatori mahtvus 0,3 mF on ning pinge on seatud 100 V peale. Jooniselt on näha, et pinge saavutab vähese häiringuga siinuselise püsiseisundi isegi voolu pulsatsioonide korral. Voolu pulsatsioonid muutuvad korrapärasteks. Sujuva käivituse puudumisel tõuseks käivitades vool üle 16 A, seda ka väiksemate pingete korral.



Joonis 4.19 Koormusvool ja -pinge, kui koormus mittelineaarne: a) püsiseisund, b) sujuv käivitus

5. PROTOTÜÜBI EHITAMINE

Inverteri prototüübi ehitamiseks leiti, et vaja oleks LC-filtrit, andureid, uusi sisend/väljund ühendusi. Nende ehitust ja valikut on kirjeldatud allpool.

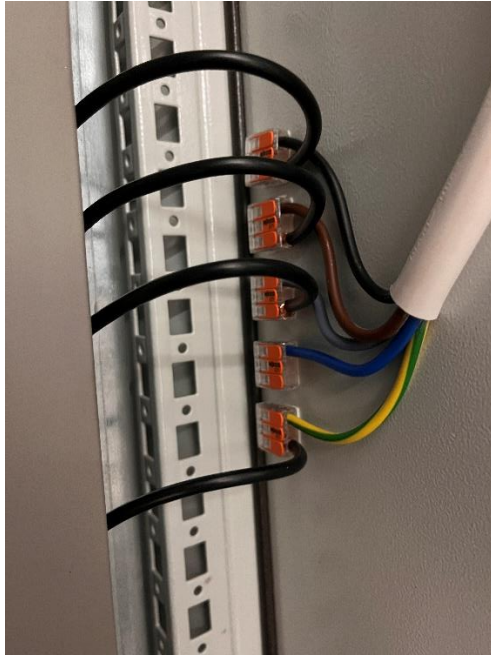
Sisend- ja väljundjuhtmed asendati väliselt jõupistikutega (vt joonis 5.1), et vähendada juhtmete hulka, mis masina transpordil võiks ette jääda. Sisendis kasutati isast pistikut ning väljundis emast, et tagada ohutus. Abitoite sisend jäi hetkeseisuga väljaulatuvaks juhtmeks.



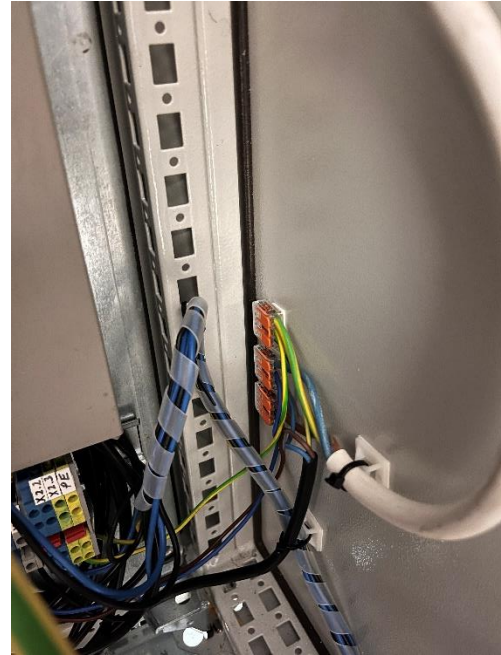
Joonis 5.1 Paigaldatud jõupistikud

Seadme küljest eemaldati lisa maandusjuhe, mis ei omanud antud süsteemi korral eesmärki, sest maandus on terviklikult ühenduses sisendi maandusega.

Inverteri üldsüsteemi ühendati pistikud ja abitoite sisend kasutades Wago klemme. Ühendused on välja toodud joonisel 5.2. Sisendi neutraali süsteemis ei kasutatud, kuid jäeti võimalus vajadusel kergesti neutraali juhtmeid ühendada.



a)



b)

Joonis 5.2 Sisendite ühendamine süsteemi a) põhitoide; b) ühefaasiline abitoide

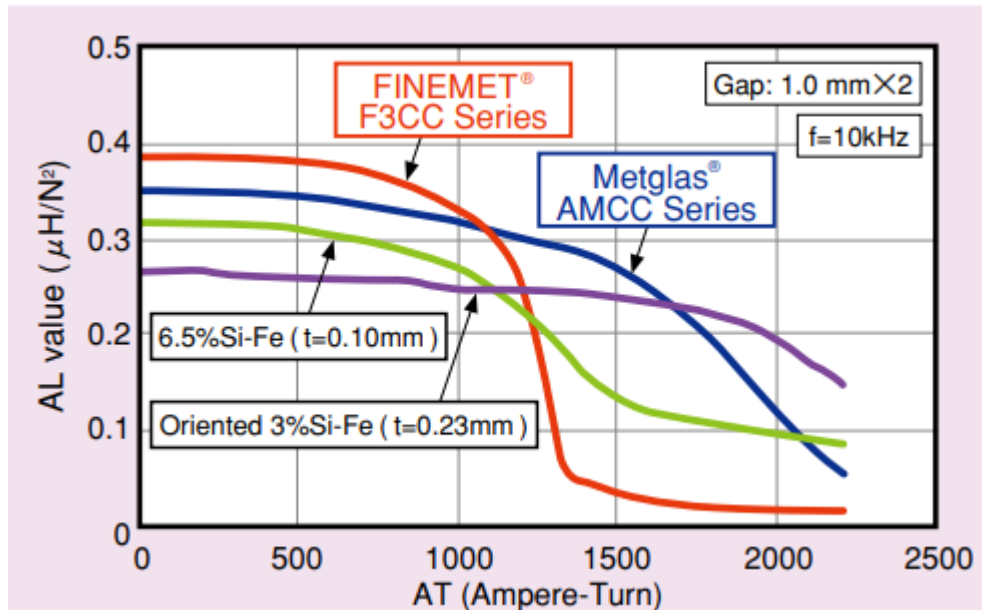
5.1 Filtri praktiline valmistamine ja materjalide valik

Filtri valmistamisel võeti aluseks alapunkti 4.1 arvutused, kus määrati filtri induktiivsus ja mahtuvus vastavalt käsitlevale vaheldile. Need arvutused panid aluse filtri südame, mähiste ja kondensaatorite valikuks ning kujundasid filtri konstruktsiooni vastavalt soovitud jõudlusele ja töötingimustele.

5.1.1 Poolid

Poolid koosnevad suuresti kolmes elemendis – ferriitsüdamik, mähis, rakis.

Ferriitsüdamik otsustati kasutada AMCC seeria ferriitsüdamiku, sest antud südamiku saab kasutada madalaima isoleerituse taseme juures ning selle tõttu on see välistingimuste suhtes minimaalselt mõjutatud. Lisaks on andmelehes välja toodud selle sobivus muunduritele [8]. Antud südamiku seeria valik ei mõjutanud suuresti maksumust võrreldes teiste sarnaste südamikega.



Joonis 5.3 Alalisvoolu superpositsiooni karakteristikud erinevate lõigatud südamikke korral [8]

Südamiku valikul tugineti alljärgnevale valemile [9]:

$$A_L \cdot N^2 = L, \quad (5.1)$$

kus A_L - südamiku omadusi iseloomustav parameeter, H,

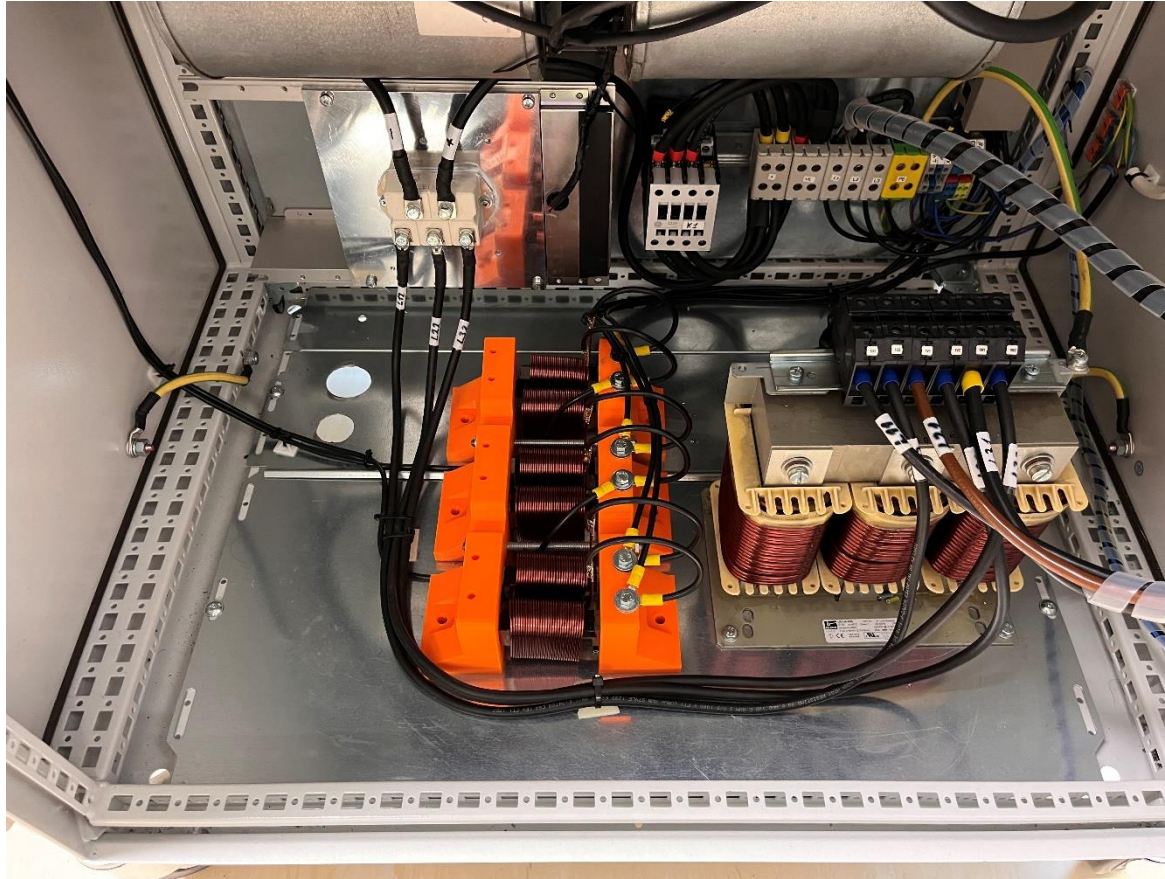
N - keerdude arv,

L - induktiivsus, H.

Esmalt leiti joonise 5.3 alusel algne keerdude arv 1000 AT (amper-keeru) juures. Valitud suurus ei ole piiripealne väärtus ning antud piirkonnas ei toimu järske muutusi, mis võimaldas õhupiluga saada suhteliselt täpse L väärtuse. Muutes õhupilu suurust, muutub valemi 5.1 A_L suurus. Mida suurem on õhupilu, seda väiksem on A_L väärtus. Võttes arvesse maksimaalset voolu 16 A, saadakse jagamistehte abil keerdude arvuks 62.5 keerdud.

Ülikoolis oli olemas 60 keerulised valmis keeratud jäigad mähised. Arvestades keerdude juhtme juhtmekeerdude kogulaiust, valiti sellele vastava suurusega ferriitsüdamik, millele antud juhe peale ära mahuks. Südamikuks valiti AMCC0050.

Süsteemi ühendatud valmis poolid on nähtavad joonisel 5.4.



Joonis 5.4 Süsteemi ühendatud poolid

5.1.1.1 Rakis

Poolide hoidmiseks kasutati 3D-prinditud rakist. Selle valmistamiseks loodi SOLIDWORKS-is esmalt mudel, vastavalt ferriitsüdamiku ning kinnitusvahendite mõõtudele. Mõlema poole kinnitused olid tehtud samasugused, et vähendada veavõimalust kokkupanekul ning lihtsustades printimisetappi.

Rakise materjaliks sai valitud olemasolev PET-G termoplastne polümeer, mis on tavapärasest PLA-st tugevam ning sulab kõrgema temperatuuri juures. Selle sulamistemperatuur andmelehe järgi on 220-250°C [10]

Disainil arvestati, et ferriitsüdamikud kinnitatakse kaablivitsadega ning selle tõttu lisati igasse pesasse tsoon selle jaoks, kuid lõplikul versioonil ei olnud võimalik lisada kaablivitsu, sest mähis oli liiga täpsete sisemõõtmetega.

Esialgsete plaanide kohaselt pidid rakist ühes tükis hoidma poldid M8 poldid, kuid kuna

olemas oli vaid M8 keermelatt, siis valmistati kinnitusvardad sellest.

5.1.2 Kondensaatorid

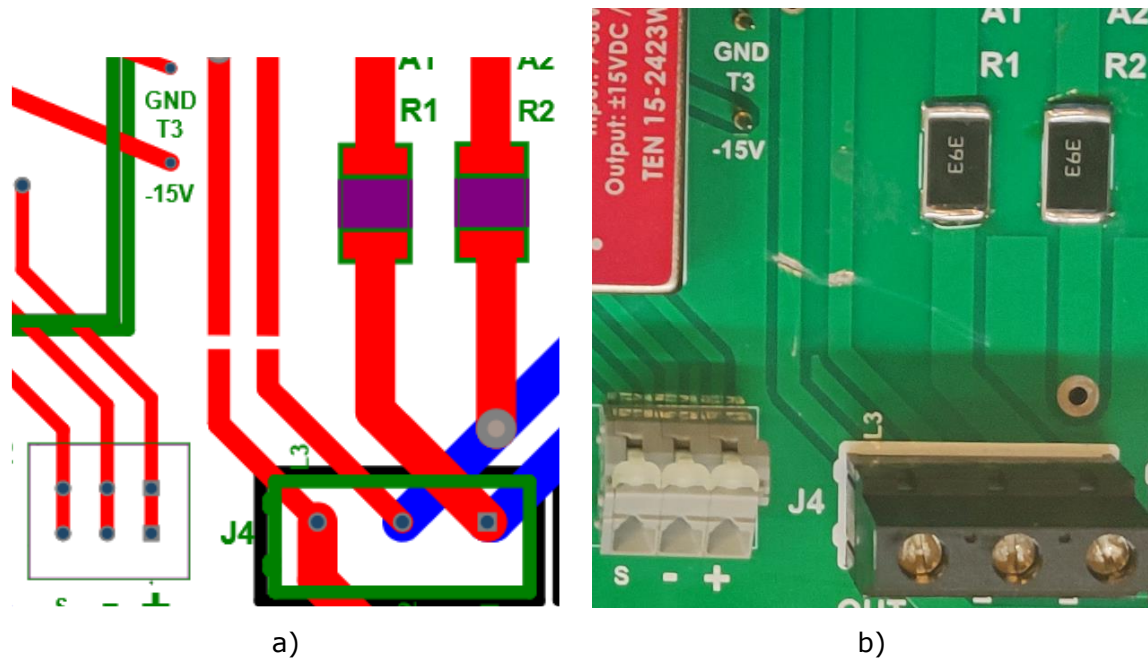
Kondensaatorite valikul võeti aluseks alapeatüki 4.1 arvutused, kuid kuna koolis oli maha kantud prototüüp plaadil olemas kolm kondensaatorit, mis olid suurema mahtuvusega (60 μF , mis on 55.1 μF suurem arvutatust), kuid piisava võimsusega, siis võeti taaskasutusse need.

Suurema mahtuvusega kondensaatoritel on omad plussid ja miinused. Positiivseks saaduseks on stabiilsem pinge ning kondensaator suudab vastu pidada suurematele voolu pulsatsioonidele. Suurema kondensaatori korral on negatiivseks küljeks aga see, et kondensaator tarbib esmasel laadumisel rohkem energiat ning enamasti tõstab see suurust ja maksumust. [11]

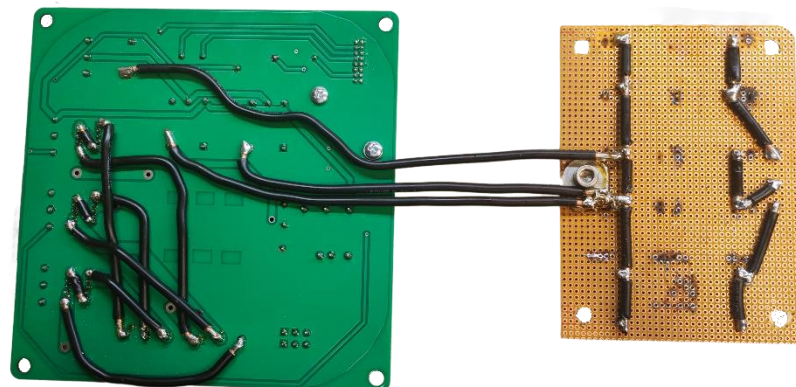
5.2 Andurite valik ja integreerimine süsteemi

Süsteemi juhtimiseks ja hindamiseks oli vaja 3 pingeandurit ja 3 vooluandurit. Nendeks valiti suuremalt jaolt olemasolevad pingeandurid LV 25-P [12] ning vooluandurid LV 25-P [13], mis suutsid mõõta piisava suurusega pinget ja voolu.

Esialgse disaini kohaselt pidid pingeandurid mõõtma 400 V-st liinipinget, mitte faasipinget ning selle tõttu ühendati need lisa 4 trükkplaadil liinipinget mõõtma. Pingeanduri valitud primaartakisti on mõeldud mõõtma kuni 400 V pinget, mis on tunduvalt madalam maksimaalset liinipingest, mida disainitud vaheldi võimaldab välja anda. Selle tõttu tehti trükkplaadil muudatused, kus pingeandurite takistita mõõteklemmi rajad lõhuti terava noaga (vt joonis 5.5) ning anduri klemmidele, mille rajad lõhuti, joodeti külge neutraaljuhe (vt joonis 5.6). Muudatus võimaldas mõõta kuni 400 V faasipinget, sobib süsteemi.



Joonis 5.5 Trükkplaadi radade katkestus: a) skemaatikal, b) reaalsel trükkplaadil



Joonis 5.6 Trükkplaadi külge lisajuhtmete jootmine

Lisaks eelnevale muudatusele lisati trükkplaadi tagumisele küljele 6 mm² juhtmed, mis suurendasid voolu läbilaskevõimet läbi vooluandurite (vt joonis 5.6). Esialgse disaini puhul jäid trükkplaadi rajad liiga kitsaks, sest nende laiuse määras maksimaalne suurus, mida vooluandurid klemmid võimaldasid. Suuremate radade korral oleks tekkinud ülekate radade vahel, mis ei tohtinud olla ühenduses. Antud probleemi ei oleks lahendanud ka trükkplaadi mõlemale küljele juhtmete lisamine.

Andurite kasutamiseks tuli pingeaduritele lisada nii primaar kui ka sekundaartakistused. Vooluanduritel tuli valida sobiv keerdude arv. Nende arvutuskäik

ja valik on välja toodud alapeatükis 5.2.1 ning 5.2.2, mis vastasid kasutatud lahendusele.

5.2.1 Pinge anduri takistused

Pingeanduri LV 25-P andmelehe [12] järgi tuleb anduri primaarpoole vool viia maksimaalselt 10 mA-ni. Selleks tuleb valida sobiv takistus. Andmelehes on mainitud, et anduri enda sisetakistus on $R_p = 250 \Omega$. Võttes aluseks maksimaalse seadistatava pinge (400 V), siis saab arvutada primaartakistuse järgneva valemiga:

$$R_1 = \frac{U_{\max}}{10^{-2}} - R_p, \quad (5.2)$$

kus R_1 – primaartakistus, Ω ,

U_{\max} – maksimaalne mõõdetav pinge, V,

R_p – anduri sisetakistus, Ω .

Arvutuste tulemusena peab primaartakistus olema vähemalt 39.75 k Ω .

Saadud takistuse väärtus kombineeriti kokku kahest jadamisi takistusest, sest täpse väärtusega takistust ei olnud saadaval (tarneaeg oli liiga pikk). Esimene takisti valiti 39 k Ω ning teine takisti 750 Ω .

Andmelehe järgselt on anduri sekundaarpoole vool kuni 25 mA. Soovides väljundit kuni 5 V, tuleb rakendada Ohmi seadust vastava takistuse leidmiseks, seega:

$$R_2 = \frac{U_s}{I_{SN}}, \quad (5.3)$$

kus R_2 – sekundaartakistus, Ω ,

U_s – maksimaalne signaali pinge, V,

I_{SN} – sekundaarpoole nominaal RMS vool, A.

Kasutades valemit, tuleb sekundaartakistuse väärtuseks 200 Ω .

Takistustel on oluline roll ka võimsusel, sest vale valiku korral võib takistus läbi põleda. Selleks, et seda ei juhtuks, arvutati neid läbiv võimsus. Pingeanduri rööpahela vool on maksimaalselt 10 mA ning võttes maksimaalsest arvestatud 400 V-st pingest tunduvalt suurem 600 V (kaitse eesmärgil), saadakse valemi 5.4 alusel võimsus 6 W.

$$P = UI$$

(5.4)

Samal viisil leiti mõõtetakistite võimus. Mõõtetakistite ahela maksimaalne vool on 25 mA ning maksimaalne pinge 5 V. Seega takistit läbiv võimsus on 0.125 W. Sellest takistusest valiti suurema võimsusega takisti. Seekord ei olnud hinnaliselt suurt vahet, kas valiti 1 W takisti või 0,5 W takisti, mis on natukene suurem. 1 W takisti valiti põhjusel, sest see oli suurem ning seda on kergem joota trükkplaadile.

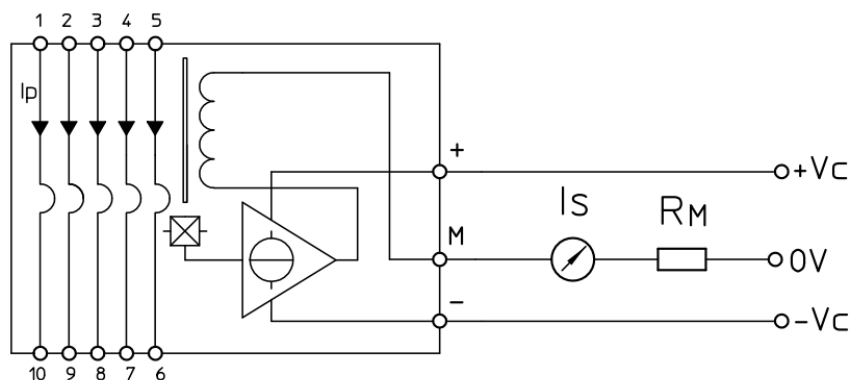
Seega valiti takistused, mille parameetrised võimsus vastasid leitud võimsusele. Valitud takistuste tüüp oli SMD, mis esmalt tundus hea idee, kuid hiljem osutus, et oleks olnud mõistlikum kasutada aukusid nõudvat traattakistit, sest traattakisteid on kergem hiljem vajadusel välja vahetada.

Pingeanduri primaartakistite täpsus valiti 5%, sest antud suuremat muutust on võimalik vajadusel juhtimises välja kalibreerida. Mõõtetakistite täpsus valiti aga 1% nii vooluandurite kui ka pingeandurite korral. Täpsusklassid valiti kõige täpsemad vajalike võimsuste juures.

5.2.2 Vooluanduri keerud

Võrreldes pingeanduriga, polnud vooluanduri puhul vajalik primaartakistuse lisamine, vaid primaarosas tuli valida sobiv ühendusviis, mis määras andurid sees olevate keerdude ühendused. Keerdude ja ühenduste asetus on esitatud joonisel 5.7.

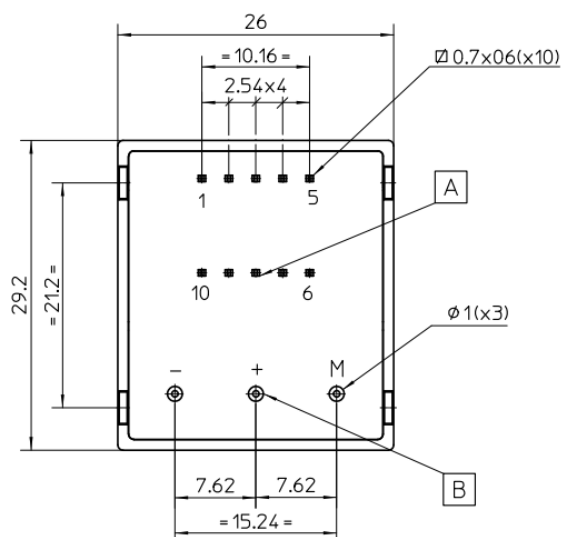
Valitud nominaalvoolule 12 A vastab tabeli 5.1 põhjal kahe primaarkeeruga ühendusviis.



Joonis 5.7 Vooluanduri LA 25-NP ühendusskeem

Tabel 5.1 Vooluanduri voolud ning neile vastavad ühendusviisid (tootjapoolne) [13]

Number of primary turns	Primary current		Nominal output current I_{SN} [mA]	Turns ratio K_N	Primary resistance R_p [m Ω]	Primary insertion inductance L_p [μ H]	Recommended connections
	nominal I_{PN} [A]	maximum I_p [A]					
1	25	36	25	1 / 1000	0.3	0.023	
2	12	18	24	2 / 1000	1.1	0.09	
3	8	12	24	3 / 1000	2.5	0.21	
4	6	9	24	4 / 1000	4.4	0.37	
5	5	7	25	5 / 1000	6.3	0.58	



Joonis 5.8 Vooluanduri LA 25-NP klemmide asetus vaadatuna alt [13]

Trükkplaadi peal veeti rajad vastavalt valitud ühendusviisile ning joonisel 5.8 esitatava klemmiasetuse alusel.

Sekundaartakisti arvutati sarnaselt pinge anduri mõõtetakistile. Vooluanduri puhul on valitud ühendusviisi korral sekundaarpoole vooluks 24 mA, millele vastab 208 Ω takisti. Väikese takistuse erinevuse tõttu valiti takisti sama mis pinge anduril. Seda muudatust andis teha, sest seadme maksimaalne piiratud vool 16 A on madalam vooluanduri maksimaalsest mõõtevoolest.

5.2.3 Andurite kalibreerimine

Korrutades pinge- ja vooluandurite loetud väärtused vastavalt ülekandesuhtele, saadakse pinge ja voolu reaalne väärtus. Reaalsed pinge ja voolu väärtused muudetakse kaheks eraldi vektoriks ning saadetakse edasistesse osadesse. Põhjusel, et reaalses süsteemis esinevad andurite signaalides püsihäiringud, siis lahutatakse antud püsihäiringu suurus maha peale signaalide konverteerimist. Antud püsihäiringud on nähtavad kui kondensaatorite osa on pingestatud, kuid transistorid on suletud olekus.

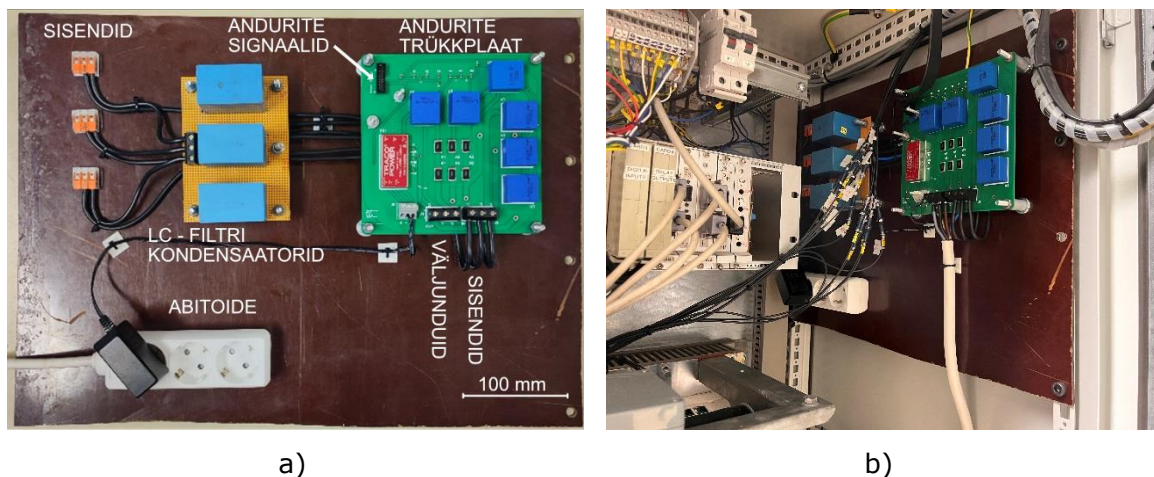
5.3 Tugiplaadi roll ja valmistamine

Tugiplaadi eesmärk oli mahutada vaheldisse skeemi komponendid, mis ei mahtunud põrandapinnale. Nende hulka kuulusid andurite trükkplaat, filtrikondensaatorid, pikendusjuhtme pistikupesad ja ühenduspunktid. Tugiplaadi materjaliks valiti tekstoliit, selleks oli mitmeid põhjuseid: see oli kättesaadav ning omab tugevaid elektriisolatsiooni omadusi, mis olid vajalikud komponentide ohutuks paigutamiseks ja funktsioneerimiseks. Tugiplaat lõigati mõõtu tikksaega ja servadesse puuriti M6 poltide jaoks augud, tagades sellega stabiilse ja kindla kinnituse.

Andurite trükkplaat ja kondensaatorite makettplaat kinnitati seinale samuti M6 poltidega, kuid nende vahele lisati PLA-st 3D-printitud distantspuksid, mis tagasid komponentidele piisava kauguse seinapinnast ning vähendasid võimalikku elektrilist interferentsi. Wago klemmid toimivad oluliste komponentidena kondensaatorite hargnemispunktina, kust juhtmed hargnevad kondensaatoritele ja andurite trükkplaadile, luues sellega korraliku ja struktureeritud ühenduse kõigi komponentide vahel.

Pikendusjuhtme eesmärk oli mitmekülgne, võimaldades nii andurite trükkplaadil oleva pingeallika toitmist adaptri abil kui ka väliste seadmete, näiteks ostsilloskoobi, toitmist. See võimaldab mõõta seadme erinevaid parameetreid, suurendades sellega süsteemi funktsionaalsust ja võimaldades vajalike mõõtmiste tegemist.

Tugiplaat on nähtav joonisel 5.9.



Joonis 5.9 Tugiplaat: a) eraldatuna süsteemist, b) süsteemi lisatuna

5.4 Stendi töö ja katsetulemused

Süsteemi ja filtri toimimist hakati katsetama esialgu madalama pingega kui seade on normaaltingimustes mõeldud toimima. Selleks lisati alaldi väljundklemmidele 50 V pingevaldkaga pinge ning transistoreid juhti läbi avatud ahelaga süsteemi, kasutades selleks siinuselist referentssignaali.

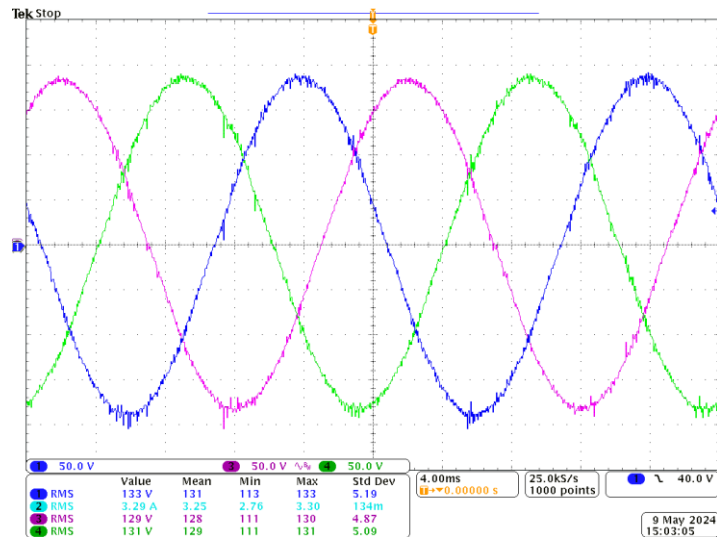
Väljundisse lisati koormus kasutades pikka lahtiste otsadega (ühes otsas pistik, teises lahtised juhtmed) juhtmejuppi, mille külge ühendati tähtühendusse kolm 32 Ω väärtusele seatud muutuvtakistit. Kõigi nende väärtused määrati multimeetriga hetkel, mil need olid süsteemist eraldatud.

Katsete korral koormuse neutraalpunkti süsteemi ei ühendatud.

Koormuse jälgimiseks ühendati koormuse otspunktide külge ostilloskoop, faasipinget mõõtma. Pingeid mõõdeti läbi differentsiaalproovikute.

Vaheldi pingestamisel oli pingeandurite väljundis märgata konstantset suuremat väljundhäiret, mis nihetega kõrvaldati.

Katsetades alustati siinussignaali kordaja tõstmist alates 0.2-st ning liiguti 0.1 võrra suuremaks kuni 1-ni. Seda tehti selleks, et vältida väljundis liigselt kõrget voolu, sest ühe takisti voolutaluvus oli vaid 2.3 A.

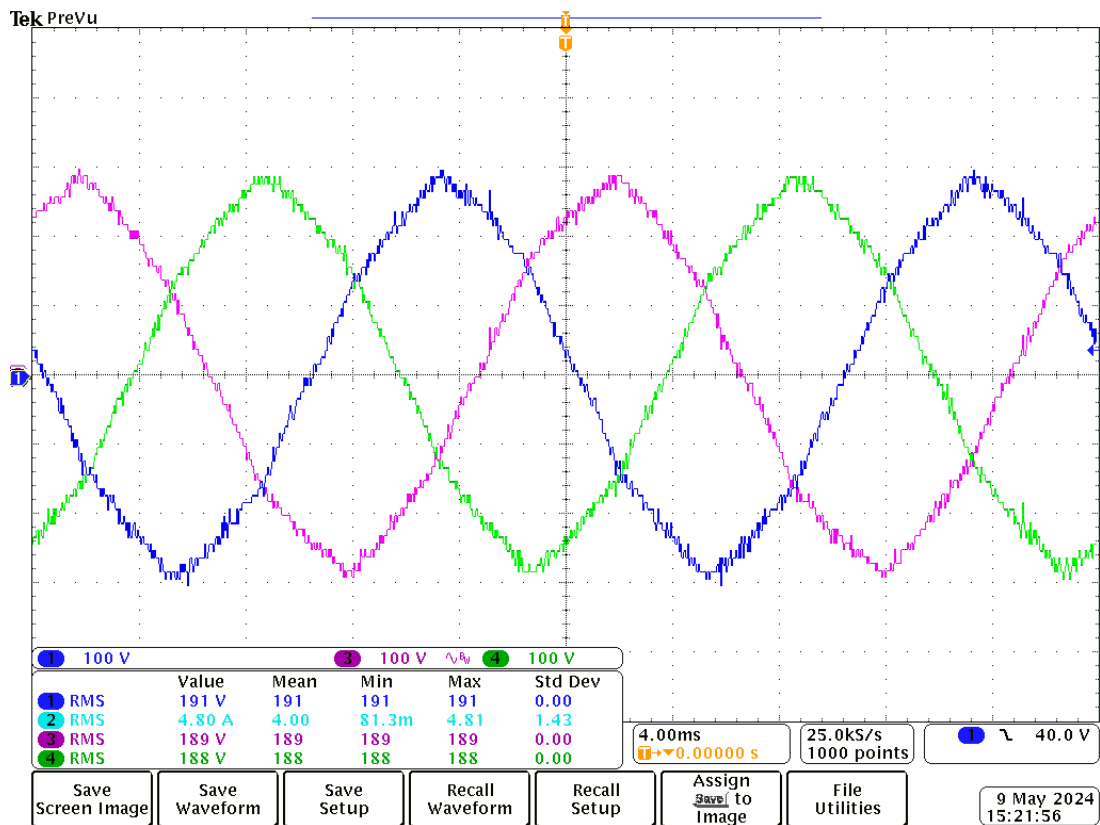


Joonis 5.10 Avatud ahelaga süsteemiga seadme toimimise esimene katsetus

Siinussignaali kordaja 0.7 graafik on välja toodud joonisel 5.10. Jooniselt on näha, et süsteem suudab väljastada siinust ning filter toimib.

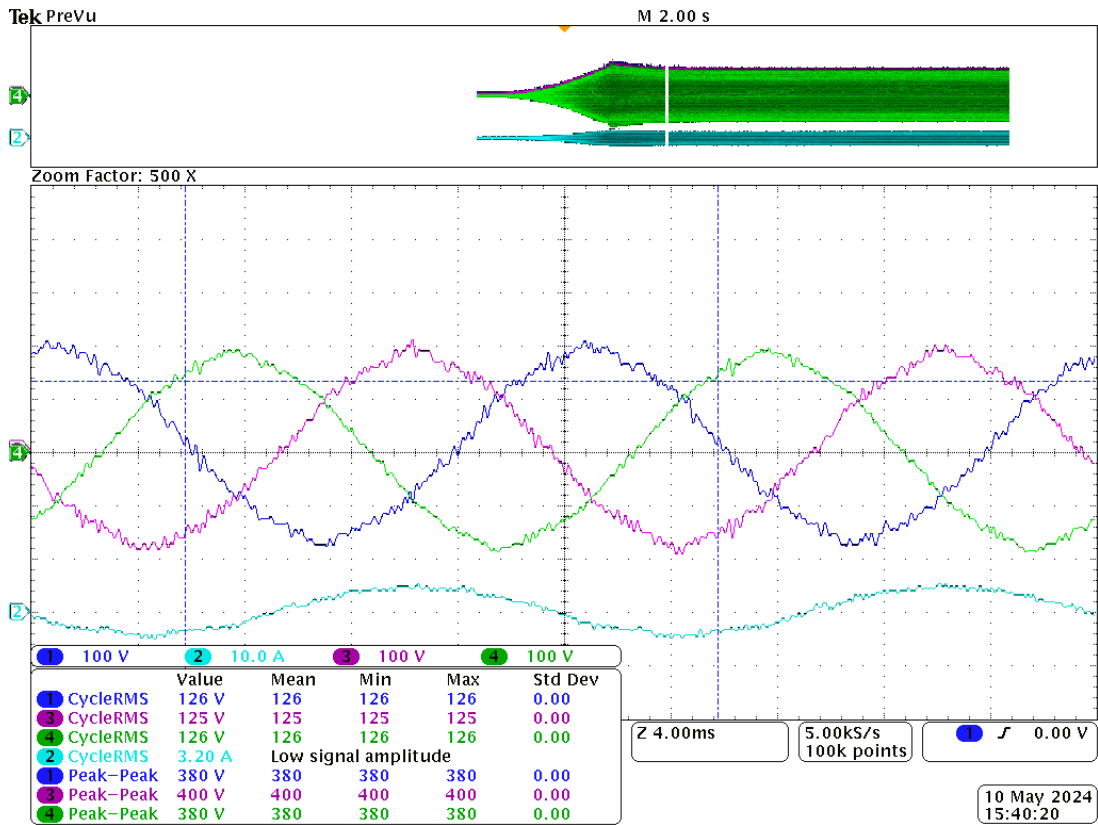
Siin punktis kalibreeriti ka andurid ära vastavalt ossiloskoobi väärtustele.

Peale andurite paika seadmist vahetati takistused välja. Uued takistused kannatasid kuni 5 A voolu ning nende suuruseks määrati 40 Ω. Sarnaselt eelmise katsega, katsetati esmalt avatud ahelaga süsteemi. Kordaja 1 korral hakkas siinuse kuju vaikselt moonduma ning selle graafik esitatud joonisel 5.11.

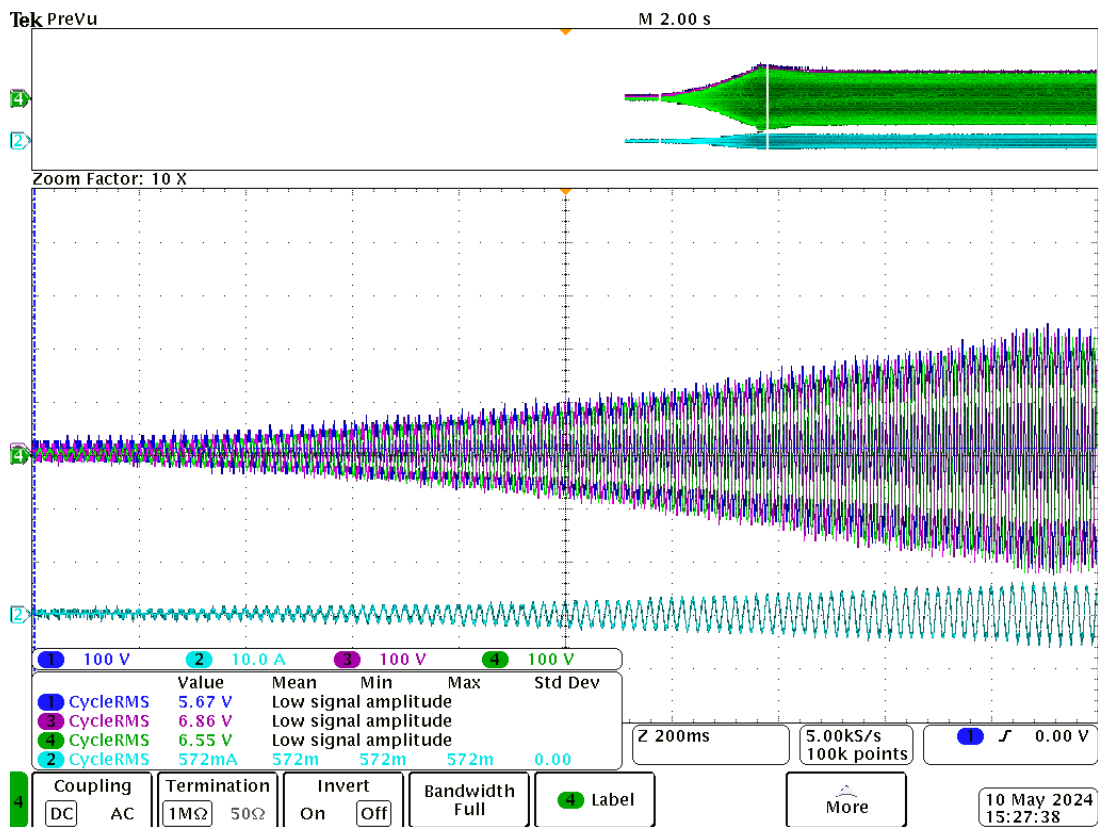


Joonis 5.11 Avatud ahelaga süsteemiga süsteem – $3 \times 40 \Omega$ ning siinussignaali kordaja 1

Teades, et avatud ahelaga süsteem töötab, liiguti edasi tagasisidega süsteele. Esmalt alustati 100 V seadistusest, kuid käivitades tekkis väljundisse liiga suur vooluhüpe ning seadme kaitsealgoritm rakendus. Sellest tulenevalt tuli muuta käivitus sujuvamaks. Sujuvama käivitusega saadi süsteem toimima. Seejärel tõsteti pinge väärtus 200 V peale ning tulemus jäädvustati ossiloskoobiga (vt joonis 5.12).



Joonis 5.12 Koormusvool ja -pinge, kui koormus on $3 \times 40 \Omega$ ja pinge on seatud 200 V



Joonis 5.13 Tagasisidestatud süsteemi käivitus

Joonise 5.12 pinge ja vool on siinuselised, väheste häiringutega. Pinge amplituudväärtus kõikus püsiseisundis 190-200 V vahel, mis vastab seadistatud väärtusele. Lisaks on joonisel 5.13 näha käivitust. Käivitusel puuduvad kõrged hüpped ning vaheldi käivitub ligikaudu kahe sekundiga.

Kasutades valemit 4.9 saab leida juhitud väljundi võimsuse. Väljundvõimsus antud katse korral tuli ligikaudu 1,2 kW, mis on maksimaalsest veel tunduvalt madalam, kuid see on juba piisavalt suur võimsus, mis annab lootust, et seade toimib ka suuremate võimsuste korral. Katsete teostamise ajal puudus töö tegijal kolmefaasiline koormus, mille takistus oleks piisavalt väike ning maksimaalne lubatud vool piisavalt suur, et katsetada suuremaid võimsuseid.

6. KOKKUVÕTE

Antud lõputöö keskendus suuresti vaheldi lõpplüli disainimisele ja ehitamisele. Töö käigus ehitati valmis filter, andurite trükkplaat ning koostati mudel ja juhtimine arvutiprogrammis PLECS. Lisaks muudeti vaheldi juhtmestust kompaktsemaks, vastavalt keskkonnale, kus seda kasutakse.

Filtri valmistamine koosnes filtri parameetrite arvutamisest, komponentide valimisest, rakise disainimisest, õhuvahet tekitamisest ning lõpuks kokkupanekust. Filtri küllastuspiirini katsetega ei jõutud, kuid suuremate võimsuste korral võib see tekkida. Sel juhul tuleks suurendada õhuvahet mõne võrra. Katsete tulemuste põhjal võib väita, et filter töötab, sest väljundsignaalid olid siinuselised.

Trükkplaadi koostamisel arvutati komponentide parameetrid vastavalt voolu ja pingele anduritele ning selle põhjal otsiti vastavate parameetritega komponendid, mis lisati trükkplaadi skeemile. Peale trükkplaadi tellimust tulid välja mõningad probleemid disainis – andurid mõõtsid liinipinget, mitte faasipinget, ja jõuosa rajad olid liiga kitsad. Probleemid kõrvaldati edukalt, jootes trükkplaadile lisajuhtmeid.

PLECS-i mudelit ja juhtimissüsteemi koostati ja parandati kogu lõputöö aja vältel. Esmaste variantide põhjal alustati vaheldi täiendehitust. Sellest tekkis ka trükkplaadi viga. Jõuosa simulatsioon koostati reaalse seadme põhjal, kandes vaheldi kõik jõuosa elemendid mudelisse, mis võimaldas katsetada juhtimist. Internetis leiduvate dq-juhtimiste alusel loodi enda dq-juhtimissüsteem, millele lisati integraatoritega sujuv käivitus. Juhtimissüsteemi loomisel kasutati palju katseeksitusmeetodit, kuna otseselt sellist lõppskeemi interneti allikata põhjal ei eksisteerinud. Juhtimissüsteemi lisati ka PI-regulaatorid, mis esmalt reguleeriti simulatsiooni alusel ning kinnitati reaalse katsetustega. Lõpptulemusel saadi juhtimine toimima ning vaheldi väljastas kasutaja poolt sisestatud väärtuses pinget.

Juhtimissüsteemi integreeriti ka kaitsealgoritmid, mis kaitsevad seadet ülevoolu ning transistoreid ülekuumenemise eest, et tagada seadme ohutu töö.

PLECS-i juhtimissüsteem koostati kasutajaliidese vormis, et juhtimine oleks võimalikult lihtne ja konkreetne.

Lõputöö eesmärgid saavutati ning vaheldi töötab, kuid see nõuab tulevikus veel täiendavaid katsetusi ning seda on võimalik mitmel viisil parandada. Katsetustel tuleks

proovida seadet suurematel võimsustel, mida antud töö käigus teha ei saanud. Juhtimissüsteemi katsetustel jõuti vaid 1,2 kW-ni, mis on suuresti alla teoreetilise maksimumi, 10,18 kW. Lisaks katsetustele saaks antud vaheldil veel paranda andurite kalibratsiooni, PI-regulaatorit ning süsteemile on võimalik lisada veel vektorjuhtimine.

7. SUMMARY

This thesis largely focused on the design and construction of the final stage of the inverter. During the work, a filter was built, a sensor PCB was assembled, and a model was compiled, along with its control system, in the computer program PLECS. Additionally, the wiring of the inverter was made more compact to suit the environment in which it is used.

The fabrication of the filter involved calculating the filter parameters, selecting components, designing the enclosure, creating an air gap, and finally assembly. Saturation testing of the filter's capabilities was not conducted; however, it may occur that at higher power levels it might reach saturation point. In such cases, increasing the air gap slightly would be necessary. Based on the test results, it can be asserted that the filter operates as intended since the output signals were sinusoidal.

When assembling the printed circuit board, the parameters of the components were calculated according to the current and voltage sensors. Components with corresponding parameters were selected and added to the PCB schematic. After ordering the PCB, some design issues emerged – the sensors measured line voltage instead of phase voltage, and the tracks of the power section were too narrow. These issues were successfully resolved by soldering additional wires onto the printed circuit board.

The PLECS model and control system were developed and improved throughout the entire thesis project. Based on initial versions, additional construction of the inverter was initiated. This resulted in an error in the printed circuit board. The model was built based on a real device, incorporating all power stage elements of the inverter into the model to facilitate control testing. Using existing online resources on dq-control as a basis, a custom dq-control system was developed, to which a soft start with integrators was added. In the creation of the control system, extensive trial and error methods were employed, as there was no direct reference for such a final scheme available online. PI-controllers were also integrated into the control system, initially adjusted based on simulations and later confirmed through real-world testing. As a result, the control system was successfully implemented and the output voltage changed according to user input.

Protection algorithms were also integrated into the control system to safeguard the device against overcurrent and the transistors from overheating, ensuring its safe

operation.

The PLECS control system was developed in the form of a user interface. It was meant to be as straightforward and concrete as possible.

The objectives of the thesis were achieved and the inverter is operational. However, further experimentation is necessary in the future and there are several ways to improve it. Testing should be conducted at higher power levels, which was not possible during this work. During the tests of the control system, only 1,2 kW was reached, which is significantly below the theoretical maximum of 10,18 kW. In addition to further testing, improvements could be made to sensor calibration, the PI controller and vector control could be implemented in the system.

KASUTATUD KIRJANDUS

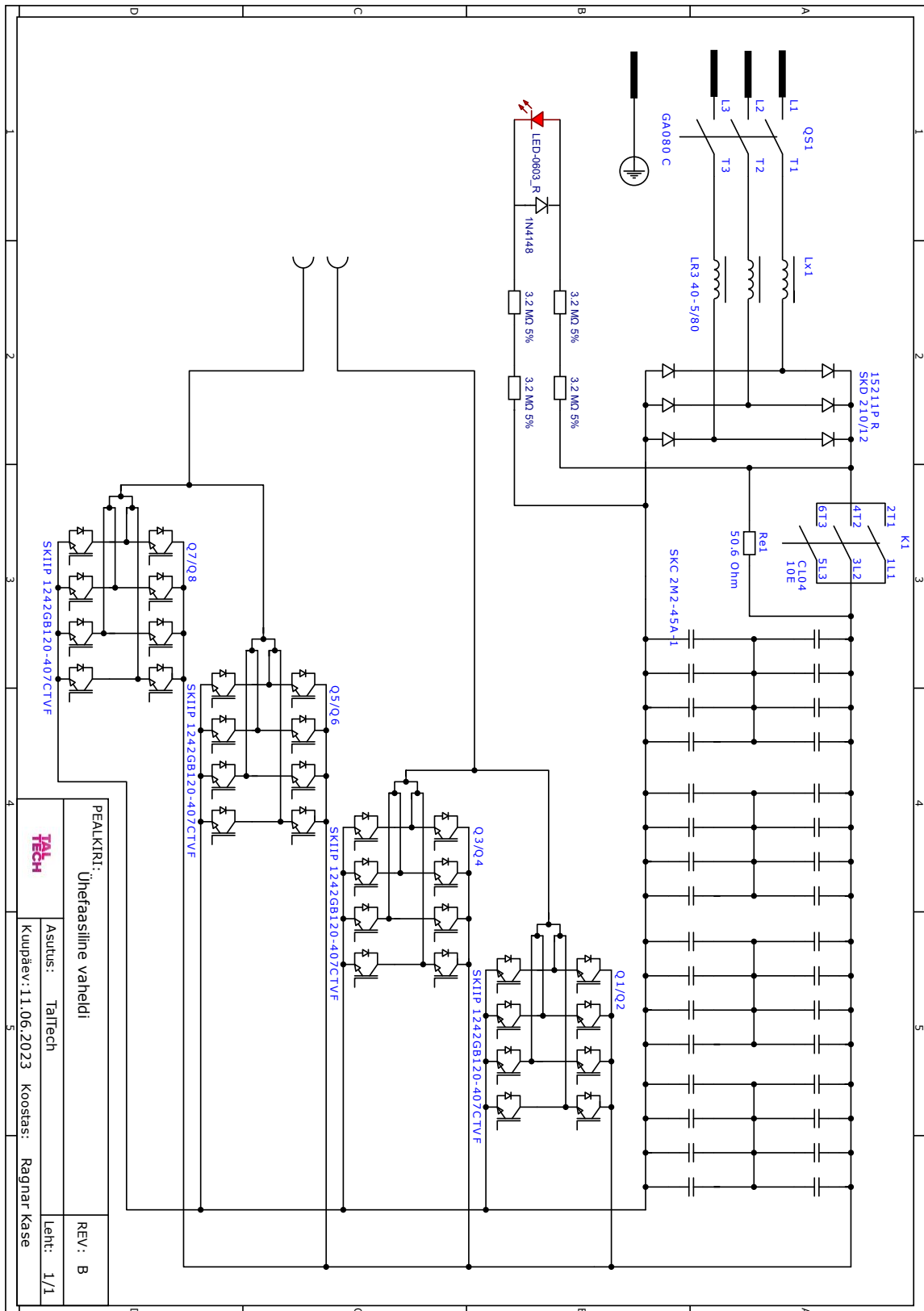
- [1] Panasonic Industry Co., Ltd., "Basic Knowledge of LC Filters," 26. 05. 2020. [Võrguväljaanne]. Available: <https://industrial.panasonic.com/ww/ss/technical/b4>. [Kasutatud 14. 04. 2024].
- [2] P. A. Dahono, A. Purwadi and Qamaruzzaman, "An LC Filter Design Method for Single-phase," 1995. [Võrguväljaanne]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/iel2/3200/9101/00405006.pdf>. [Kasutatud 06. 04. 2024].
- [3] Plexim GmbH, "User Manual," 2012. [Võrguväljaanne]. Available: <https://www.plexim.com/files/plecsmanual.pdf>. [Kasutatud 07. 04. 2024].
- [4] SEMIKRON, "SK integrated intelligent Power PACK halfbridge SKiIP 1242 GB 120 - 407 CTV," 2019. [Võrguväljaanne]. Available: <https://semikronmexico.com.mx/wp-content/uploads/2019/12/SKIIP-1242GB120-407.pdf>. [Kasutatud 14. 04. 2024].
- [5] BLOCK Transformatoren-Elektronik GmbH, "Line reactor, three-phase - LR3 40-5/8," [Võrguväljaanne]. Available: https://www.block.eu/fileadmin/2c9ee487807da57101809a77886f2fde.LR3_40_5_8_EN.pdf. [Kasutatud 06. 04. 2024].
- [6] SEMIKRON, "SKD 210," 11. 05. 2021. [Võrguväljaanne]. Available: <https://www.semikron-danfoss.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skd-210-07913290.pdf>. [Kasutatud 14. 04. 2024].
- [7] J. Hernandez-Alvidrez, "PV-Inverter Dynamic Model Validation and Comparison Under Fault Scenarios Using a Power Hardware-in-the-Loop Testbed," 06. 2018. [Võrguväljaanne]. Available: https://www.researchgate.net/publication/325995213_PV-Inverter_Dynamic_Model_Validation_and_Comparison_Under_Fault_Scenarios_Using_a_Power_Hardware-in-the-Loop_Testbed. [Kasutatud 07 04 2024].
- [8] Hitachi Metals, Ltd., "Metglas® AMCC Series Cut Core; FINEMET® F3CC Series Cut Core," 05. 2017. [Võrguväljaanne]. Available: https://www.mouser.ee/datasheet/2/957/hj_b11_a-1509989.pdf. [Kasutatud 24. 04. 2024].
- [9] S. Zurek, "AL value," 25. 12. 2023. [Võrguväljaanne]. Available: https://www.e-magnetica.pl/doku.php/al_value. [Kasutatud 24. 04. 2024].
- [10] Devil Design Sp. J., "Product card: PET-G filament for 3D printing.," 2016.

[Võrguväljaanne]. Available: https://devildesign.com/download/PET-G_-_product_card.pdf. [Kasutatud 04. 16. 2024].

- [11] Sinbosen, "The Bigger The Capacitor, The Better?," 24. 04. 2019.
[Võrguväljaanne]. Available: <https://www.sinbosen.com/n1838196/The-bigger-the-capacitor-the-better.htm>. [Kasutatud 24. 04. 2024].
- [12] LEM International SA, "Voltage Transducer LV 25-P," 08. 07. 2021.
[Võrguväljaanne]. Available:
https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_25-p.pdf.
[Kasutatud 07. 04. 2024].
- [13] LEM International SA, "Current Transducer LA 25-NP," 09. 11. 2011.
[Võrguväljaanne]. Available:
https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la%2025-np.pdf.
[Kasutatud 07. 04. 2024].

LISAD

Lisa 1 Olemasoleva vaheldi skeem



Lisa 5 Trükkplaadi joonis ilma maandus polügoonideta

