



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**REGULEERITAVATE ALALIS- JA
VAHELDUVVOOLU VÄLJUNDITEGA LABORI
TOITEALLIKA DISAINIMINE**

**DESIGN OF A LABORATORY POWER SUPPLY WITH
VARIABLE DIRECT AND ALTERNATING CURRENT
OUTPUTS**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Andres Pärnpuu

Üliõpilaskood 185975 EAAB

Juhendaja: Martin Jaanus, vanemlektor

Tallinn 2021

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.

"....." 2021

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2021

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2021 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Andres Pärnpuu,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Reguleeritavate alalis- ja vahelduvvoolu väljunditega labori toiteallika disainimine“, mille juhendaja on Martin Jaanus,

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.

_____ (kuupäev)

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

<i>Autor:</i> Andres Pärnpuu	<i>Lõputöö liik:</i> Bakalaureusetöö
<i>Töö pealkiri:</i> Reguleeritavate alalis- ja vahelduvvoolu väljunditega labori toiteallika disainimine	
<i>Kuupäev:</i> 13.05.2021	113 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja:</i> vanemlektor Martin Jaanus	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Lõputöö põhieesmärk on disainida labori toiteallikas, koostada toiteallika prototüüp ja koostada tehniline dokumentatsioon seadme osade kohta. Lõputöö sisu algab seadme disaini lähtekohaks võetud disainikriteeriumide ja kujundatud disaini kavandi kirjeldusega. Põhilise mahu moodustab seadme trafo, elektroonikamoodulite ja kere põhjalik tehniline kirjeldus. Töö lõppeb seadme disainikriteeriumidele vastavuse analüüsiga. Töö tulemus on funktsionaalne ja põhjalikult dokumenteeritud toiteallika prototüüp.</p>	
<i>Märksõnad:</i> toiteallikas, jõuelektroonika, elektroonika disain, prototüüpimine, bakalaureusetöö.	

ABSTRACT

<i>Author:</i> Andres Pärnpuu	<i>Type of work:</i> Bachelor's Thesis
<i>Title:</i> Design of a laboratory power supply with variable direct and alternatig current outputs	
<i>Date:</i> 13.05.2021	113 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor of the thesis:</i> senior lecturer Martin Jaanus	
<i>Abstract:</i> <p>The main objective of this thesis is to design a laboratory bench power supply, to assemble a prototype of the device and to compile a technical documentation of the device's modules. The thesis begins with a description of the design requirements set as a starting point of the design process. The design criteria are expanded on by creating an initial general design of the device. The thesis' main content is comprised of the technical documentation of the device's transformer, electronics modules, and enclosure. The work done in this thesis is summarised in an analysis of the prototype's compliance with the design criteria set in the beginning of the thesis. This thesis' end result is a functional and thoroughly documented prototype of the designed power supply.</p>	
<i>Keywords:</i> power supply, power electronics, electronics design, prototyping, bachelor's thesis.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Reguleeritavate alalis- ja vahelduvvoolu väljunditega labori toiteallika disainimine
Lõputöö teema inglise keeles:	Design of a laboratory power supply with variable direct and alternating current outputs
Üliõpilane:	Andres Pärnpuu, 185975 EAAB
Eriala:	Elektroenergeetika ja mehhatroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Martin Jaanus
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	13.09.2021
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2021

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Labori toiteallikas ei ole mitte midagi uut ja selles töös rakendatavad meetodid ei ole midagi enneolematut. Elektroonikaseadmete disainimist õpetatakse mehhatroonika erialal minimaalselt. Selle töö eesmärk on harjutada elektroonika disaini põhitõdesid läbi reaalse seadme disainimise ja prototüüpimise. Selle töö tegemise peamine põhjus on autori isiklik vajadus disainitava seadme järele ja huvi jõuelektroonika valdkonnas õpitud teadmiste laiendamise ja kinnistamise järele praktilise kogemusega. Disaini ja prototüüpimise dokumentatsioon on esmalt vajalik seadme pikaajalise kasutamise ja hilisema modifitseerimise hõlbustamiseks, kuid võib olla ka kasulik mõnel kursusel näidismaterjalina kasutamiseks.

2. Töö eesmärk

Lõputöö eesmärk on disainida ja valmis ehitada toiteallikas, millel on:

- Alalisvoolu väljund: vahemikus 0 V kuni 24 V reguleeritava väljundpinge ja vahemikus 0 A kuni 3 A reguleeritava väljundvoolupiiririkuga.
- Vahelduvvoolu väljund: vahemikus 0 V kuni 230 V reguleeritava väljundpingega ning 1 A väljundvooluga.
- Mõõteriistad väljundpinge, -voolu ja -võimsuse mõõtmiseks.

Disainitav toiteallikas peab olema kasutajale ohutu ja sisaldama kaitseahelaid ülekuumenemise, ülekoormuse ja lühise eest kaitsmiseks kummalgi väljundil.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Eelnimetatud toiteallika ehitamise peamised etapid on järgmised:

1. Trafo parameetrite katseline määramine, trafo ümbermähkimine
2. Võrgu sisendi disainimine, ehitamine, katsetamine
3. Toitemuunduri disainimine, ehitamine, seadistamine, katsetamine
4. Mõõteahelate disainimine, ehitamine, justeerimine
5. Kere disainimine, seadme täielik koostamine

4. Lähteandmed

Disaini aluseks on teoreetilised teadmised, mis osaliselt pärinevad teatmeteostest ja ülikooli kursustelt, osaliselt elektroonikakomponenditootjate rakendusdokumentidest. Komponentide valik toimub tootjate andmelehtedes parameetrite kohta leiduva info kõrvutamisel disaini nõuetega. Lähtepunktiks disainiparameetrite valikul on kitsaskohad, mis õppeprojektina disainitud toiteallika prototüübi katsetamisel avaldusid.

5. Uurimismeetodid

Elektroonikaskeemide disainimise hõlbustamiseks kasutatakse peamiselt simulatsioonitarkvara LTspice XVII. Elektriahelate skeemid erinevate moodulite kohta kujundatakse välja tarkvaras DipTrace. Moodulite ehitamise käigus tehakse katsetusi ja mõõtmisi jooksvatele disainiküsimustele lahenduste leidmiseks ning töö käigus ilmnenud funktsionaalsusprobleemide kõrvaldamiseks.

6. Graafiline osa

Olulisimad lõputöö graafilised osad on joonised moodulite elektriskeemide kohta (trafo mähiste skeem, võrgutoite sisendi ja alaldite, alalisvoolumuunduri ja mõõteseadmete mooduli elektriskeemid, komponentide paigutuse joonised). Töö põhiosas esitatakse skeemiosade kirjelduste juures vastaval kohal olulisi väljalõiked eelnimetatud põhijoonistest. Põhiosa lõike illustreerivad pildid reaalsest osadest.

Peamiste jooniste loetelu:

- Trafo mähiste elektriskeem
- võrgutoite sisendi ja alaldite mooduli elektriskeem
- alalisvoolumuunduri elektriskeem
- mõõteseadmete ja väljundite lülitamise mooduli elektriskeem
- Kere koostu ja detailide joonised

7. Töö struktuur

Kirjeldatud on töö struktuuri peatüki alampeatüki tasemel.

1. Disainikriteeriumide püstitamine
 - 1.1. Disainikriteeriumid
 - 1.2. Vajalikud moodulid
2. Seadme moodulite disain ja teostus
 - 1.1. Trafo:
 - 1.2. Toite sisendi ja alaldite moodul:
 - 1.3. Alalisvoolumuunduri moodul:
 - 1.4. Mõõteseadmete/väljundite moodul:
 - 1.5. Kere:
3. Tulemuste analüüs:
 - 3.1. Seadme reaalse toimimise kirjeldus.
 - 3.2. Seadme üldine ülevaade kasutaja seisukohast

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Disainimise käigus kasutatakse skeemide koostamisel abimaterjalidena elektroonika-komponenditootjate rakendusdokumente, mis käsitlevad elektroonikakomponentide kasutamist. Elektroonikakomponentide valikul kasutatakse informatsiooni komponentide andmelehtedest.

9. Töö etapid ja ajakava

Järgneb loetelu töö etappidest ja ajakava nende täitmiseks.

- Disaininõuete esitamine. (30.11.2020)
- Trafo hankimine, sobivuse hindamine, übermähkimine (20.12.2020)
- Võrgutoite sisendi/alaldite mooduli disainimine, ehitamine (31.01.2021)
- Alalisvoolumuunduri mooduli disainimine, ehitamine ja seadistamine (28.02.2021)
- Mõõteseadmete/väljundite mooduli disainimine, ehitamine ja seadistamine (21.03.2021)
- Kere disainimine (25.03.2021)
- Mikrokontrolleri programmeerimine (31.03.2021)
- Lõputöö esialgne kirjutamine, juhendajaga konsulteerimine (10.04.2021)
- Seadme lõplik koostamine (15.04.2021)
- Lõputöös vajalike paranduste tegemine, juhendajaga konsulteerimine (30.04.2021)
- Lõplik versioon valmis (10.05.2021)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
SISSEJUHATUS	11
1 DISAINIKRITEERIUMIDE PÜSTITAMINE	12
1.1 Disaininõuded aparaadile	12
1.2 Funktsionaalsuse saavutamiseks vajalikud moodulid	13
1.2.1 Aparaadi moodulite koosseis	13
2 APARAADI OSADE DISAIN JA TEOSTUS	15
2.1 Trafo	15
2.1.1 Trafo toorik	15
2.1.2 trafo uurimine ja katsetamine	15
2.1.3 Trafo ümbermähkimine disaininõuetele vastavaks	16
2.1.4 Ümbermähitud trafo nimiparameetrid	19
2.1.5 Ümbermähkimise lõpptulemus	22
2.2 Toite sisendi moodul	24
2.2.1 Toite sisend	24
2.2.2 Häiringufilter	25
2.2.3 Käivitusahel	31
2.2.4 Alaldid	32
2.2.5 Viivitusahel	34
2.2.6 Sisetoite ja käivitussignaali väljund	35
2.2.7 Toite sisendi kokkuvõte	36
2.3 Alalisvoolumuunduri moodul	38
2.3.1 Sisetoite kohalik muundamine	38
2.3.2 Kontroller ja lülitusahel	40
2.3.3 Muunduri jõuahel	43
2.3.4 Tagasisideahelad	44
2.3.5 Võimsuskaod muunduri jõuahelas	50
2.3.6 Alalisvoolumuuduri mooduli kokkuvõte	52
2.4 Mõõteseadmete ja väljundite moodul	54
2.4.1 Mooduli toide	54
2.4.2 Mikrokontroller	56
2.4.3 Vahelduvvoolusuuruste andurid	57
2.4.4 Alalisvoolusuuruste andurid	58

2.4.5 Väljundid	60
2.4.6 Andurite lugemine	61
2.4.7 Arvutused mõõtepunktidega	62
2.4.8 Mõõtmistulemuste näitamine	64
2.4.9 Mõõtmistulemuste arvutamine	66
2.4.10 Mõõteseadmete mooduli kokkuvõte.....	69
2.5 Kere.....	70
2.5.1 Väline kest.....	70
2.5.2 Trükkplaatide kandurid.....	71
2.5.3 Trafo kandur	72
2.5.4 Kere detailide valmistamine	73
2.5.5 Kere koost	74
2.5.6 Täiustusvajadused kere juures	76
3 VALMIS APARAADI ANALÜÜS.....	77
3.1 Aparaaadi vastavus disainikriteeriumidele.....	77
3.1.1 Toite sisend	77
3.1.2 Väljundid	78
3.1.3 Mõõteseadmed	78
3.1.4 Kaitseahelad	79
3.1.5 Kere kaitseaste	80
3.1.6 Disaininõuetele vastavuse kokkuvõte	80
KOKKUVÕTE	81
SUMMARY.....	82
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	83
LISA 1: Mikrokontrolleri programmi lähtekood.....	87

GRAAFILISED MATERJALID

Elektriskeemide joonised:

„Toite sisendi mooduli elektriskeem“

„Alalisvoolumuunduri elektriskeem“

„Mõõteseadmete ja väljundite mooduli elektriskeem“

Tehnilised joonised:

„Kere põhjakoost“

„Trafo kronstein“

„Trükkplaadikandur“

„Korpuse kaas“

„Aparaadi koostujoonis“

SISSEJUHATUS

Reguleeritava väljundiga labori toiteallikas on seade, mille funktsioon on olla elektrilistoidet vajavate katsetuste juures toiteallikaks. Selle seadme funktsioon on võtta elektrienergiat elektrivõrgust ja muundada seda nii, et see oleks katseskeemile sobivat liiki (alalisvool/vahelduvvool) ja sobivate parameetritega (õigel pingetasemel). Labori toiteallika väljundid peavad olema elektrivõrgust galvaaniliselt eraldatud, selleks et tagada seadme kasutaja ohutus. Töö autoril on isiklik vajadus universaalse toiteallika järele, millel on sujuvalt reguleeritava pingega alalis- ja vahelduvvoolu väljundid ning selle töö raames disainitakse ja ehitatakse selline seade.

Toiteallikas ehitatakse ise, kuna turul ei ole mõistliku hinnaga saadaval ühte soovitatavate parameetritega toiteallikat ja autor ei soovi alalisvoolu ja vahelduvvoolu väljundi saamiseks kahte erinevat seadet. Autoril on isiklik vajadus toiteallika järele, millel on sujuvalt varieeritava kuni 24 V väljundpingega alalisvoolu väljund ja kuni 230 V pingeni sujuvalt varieeritav vahelduvvoolu väljund.

Töös kirjeldatakse põhjalikult seadme elektroonikamoodulite tööpõhimõtteid ning dokumenteeritakse seadme osade ehitus ning elektroonikamoodulite elektriskeemid kirjelduste ja jooniste kujul. Bakalaureusetöö jääb toiteallika kasutajale aktuaalseks tehnilise dokumentatsioonina, mis on vajalik seadme kasutamise, hooldamise ja remondi otstarbel.

Elektriahelate disainil ja töötamise uurimisel kasutatakse arvutitarkvara LTspice XVII. Elektriskeemid koostatakse arvutiprogrammi DipTrace abil. Mehaanikaosade disainil kasutatakse disainitarkvara Autodesk Inventor.

Selle töö põhieesmärk on teostada kõik seadme disaini- ja prototüüpimisprotsessi sammud nii, et lõpptulemusena valmib kasutatav ja ohutu toiteallikas. Disainiprotsessi alguses peab püstitama disainikriteeriumid, mida valmis aparaat peab võimalikult lähedaselt täitma. Disainiprotsessi alguses kavandatakse, mis meetoditega disainikriteeriumite täitmine saavutatakse ning millistest osadest seade koosnema peab. Seadme vajalikud elektroonikamoodulid ja kest disainitakse ja ehitatakse valmis. Valmishitatud prototüüpi uuritakse ja hinnatakse selle vastavust kavandamisfaasis püstitatud kriteeriumidele.

1 DISAINIKRITEERIUMIDE PÜSTITAMINE

Selles peatükis formuleeritakse nõuded, millele peab valmistatav toiteallikas vastama. Kriteeriumite alusel kavandatakse nõuete täitmiseks vajalikud moodulid ja seadme moodulite struktuur.

1.1 Disaininõuded aparaadile

Toite sisend peab olema 230 V 50 Hz vahelduvvooluvõrgust. Toite sisendil peab olema häiringufilter võrgu kaitsmiseks aparaadi genereeritava kõrgsageduslike häiringute eest. Toite sisendil peab olema liigpingepiirik võrgust tulevate ja ka aparaadi enda genereeritud transientpingete piiramiseks. Aparaati peab saama sisse ja välja lülitada esipaneelil paikneva lüliti abil. Sisselülitusel ei tohi tekkida seadme maksimaalsest voolutarbest enam kui 3 korda suuremat hetkelist käivitusvoolu.

Alalisvoolu väljundi pinge peab olema sujuvalt varieeritav vahemikus 0 V kuni 24 V. Alalisvoolu väljundi maksimaalne koormusvool peab olema 3 A. Väljundvoolul peab olema vahemikus 0 A kuni 3 A sujuvalt varieeritav piirik, mis väldib voolu kasvamist suuremaks seadistatud piirist. Väljundpinget ja voolupiirikut peab saama varieerida esipaneelil paiknevatest reguleernuppudest. Alalisvoolu väljundit peab saama sisse ja välja lülitada esipaneelil paiknevast lülitist.

Vahelduvvoolu väljundi efektiivpinge peab olema sujuvalt varieeritav vahemikus 0 V kuni 230 V. Vahelduvvoolu väljundi voolu maksimaalne efektiivväärtus peab olema 1 A. Väljundpinget peab saama varieerida esipaneelil paiknevast reguleernupust. Vahelduvvoolu väljundit peab saama sisse ja välja lülitada esipaneelil paiknevast lülitist.

Mõõteseadmed peavad võimaldama näidata aparaadi alalisvooluväljundi pinget, voolu ja võimsust ning vahelduvvooluväljundi pinge efektiivväärtust, voolu efektiivväärtust ja aktiivvõimsuse väärtust. Mõõteseadmete näitu näidatakse esipaneelil paiknevatel osutmõõteriistadel.

Ülekoormuskaitse peab ära hoidma seadme osade ülekuumenemise pikaajalisel (>15 min) tugeval koormamisel. Alalisvoolu väljundi voolupiirik peab piirama alalisvoolu väljundi maksimaalse koormusvoolu sellistesse piiridesse, mille juures alalisvoolu väljundi teostamiseks vajalike moodulite komponendid üle ei kuumene. Vahelduvvoolu väljundi kaitsmiseks ülekoormuse eest tuleb luua süsteem, mis lülitab väljundi automaatselt välja juhul kui väljundvool ületab maksimumi. Moodulid, mille

ülekuumenemist võib eeldada seadme väljundite tugeval koormamisel, peavad olema varustatud termostaatidega, mis võimaldavad seadme väljundeid välja lülitada niikauaks kuni ülekuumenenud moodul jahtub. Ülekoormuskaitse taastamine ei tohi nõuda aparaadi korpuse lahtivõtmist.

Lühisekaitse peab ära hoidma väljundite lühistumisel väljundvoolu piiramatut kasvu ja sellest tulenevad purunemised seadme sees. Lühisekaitse peab aparaadi eraldama elektrivõrgust seadme rikke tõttu seadmesisese lühise tekkimisel. Lühisekaitse taastamine võib nõuda aparaadi korpuse lahtivõtmist.

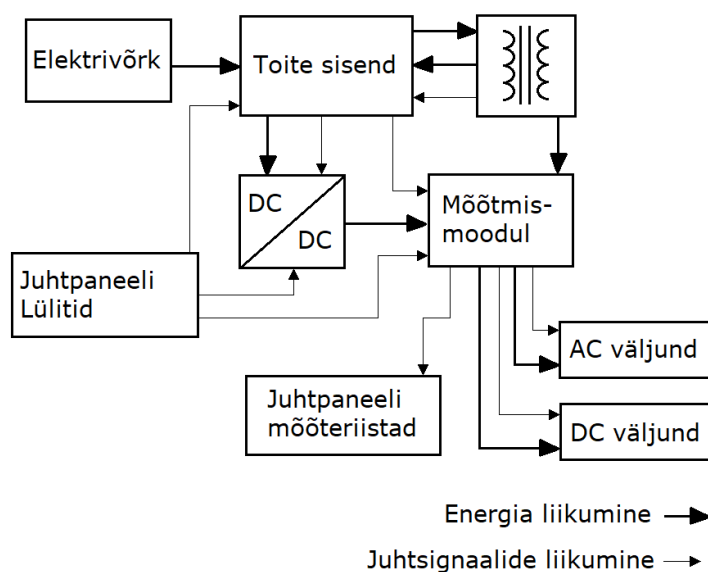
Korpuse kaitseaste peab olema piisav seadme ohutuks kasutamiseks tubastes tingimustes. Suletud korpuse korral ei tohi olla võimalik kasutaja paljakäsi kokkupuutumine seadmesiseste ohtlike osadega. Korpuse disain peab vastama vähemalt IEC 60529 kaitseastmele IP 20.

1.2 Funktsionaalsuse saavutamiseks vajalikud moodulid

Selles alampeatükis kirjeldatakse toiteallika moodulite koosseis ja kirjeldatakse seadmesiseseid mooduleid.

1.2.1 Aparaaadi moodulite koosseis

Seadme ühendamiseks elektrivõrku on vaja toite sisendi moodulit, millel on



liigpingepiirik, võrgufilter, sisselülitusreele ja seadmesiseseks kasutamiseks vajalike alalisvoolu toidete alaldid, ja filtrid. Kuna väljundina on nõutud sujuvalt varieeritavat vahelduvpinget, tuleb kasutada aparaaadis ühe toitemuundurina võrgutrafo. Kuna võrgutrafo on vajalik, võib seda kasutada ka primaarse muundurina pinge langetamiseks alalisvoolumuunduri jaoks. Varieeritav alalisvoolu väljund saadakse

Joonis 1.1: Aparaaadi moodulite plokk skeem

impulsstoitemuunduri abil aparaadisisesest alalisvoolu toitest. Väljundparameetreid mõõdetakse ja väljundeid lülitatakse mõõtmismoodulis, millel on andurid väljundite voolude ja pingete mõõtmiseks. Moodulite koosseisu kujutab Joonis 1.1.

Trafo on vajalik kuna nõutud on varieeritava pingega vahelduvvoolu väljund. Aparaadi väljunditele esitatud galvaani-lise eralduse nõude tõttu peavad trafol olema eraldatud primaar ja sekundaarmähised.

Primaarmähis ühendatakse elektrivõrku läbi toite sisendi mooduli. Vajalik on sekundaarmähis, millelt saab sisendmooduli alaldite ja silukondensaatorite abil 12 V pingel alalisvoolutoite aparaadisiseseks kasutamiseks ja 35 V pingel toite alalisvoolumuunduri jaoks. Varieeritava vahelduvpingega väljundi saamiseks on vaja eraldi sekundaarmähist kommuteerimispinnaga, millelt on eemaldatud mähise isolatsioon. Vahelduv-vooluväljundi mähise kommuteerimispinnal saab käepideme abil liigutada kontakti, millega varieeritakse trafo väljundi pinget.

Toite sisendi moodulis on aparaadi elektrivõrguga ühendamiseks vajalikud osad. Aparaadi kaitsmiseks elektrivõrgu transientpingeimpulsside eest on vajalik pingepiirav liigpingepiirik. Aparaadi rikke korral elektrivõrgust eraldamiseks ja tuleohutuse tagamiseks on moodulil sulavkaitsmed. Aparaadi sisse ja välja lülitamiseks on vajalik kahe poolusega relee. Relee kontakte kaitstakse sädemesummutitega. Sisselülitusel trafo ja alaldite käivitusvoolu piiramiseks on vajalik sujuvkäivitustakisti, mis lühistatakse viivitusega peale aparaadi sisselülitamist. Viivitusahela antavat käivitussignaali kasutatakse ka teiste moodulite juures.

Alalisvoolumuunduri moodul koosneb täielikult pinget langetava impulsstoitemuunduri osadest. Moodulil on impulssmuunduri kontrolleri, lülituselemendid, muunduri väljundfilter, pinge ja voolu tagasisideahelad, voolupiiriku ja pinge varieerimiseks vajalikud ahelad ja teised abiahelad.

Mõõteseadmete ja väljundite moodul sisaldab aparaadi väljundite jälgimiseks ja lülitamiseks vajalikke osi. Moodulis on pingetrafo ja voolutrafo vahelduvvoolu väljundparameetrite mõõtmiseks. Vahelduvvooluväljundi lühisekaitse jaoks on väljundmoodulil sulavkaitse. Alalispinge mõõtmiseks on väljundmoodulil pingejagur ja alalisvoolu mõõtmiseks Halli efektil põhinev vooluandur. Anduritegamõõdetavate suuruste jälgimiseks ja mõõteriistadel näitamiseks kasutatakse mikrokontrollerit. Mikrokontroller on ka osa vahelduvvooluväljundi koormuskaitsest, lülitades vahelduvvooluväljundi välja kui väljundvool on liiga suur. Kummagi väljundi lülitamise võimaldamiseks on väljundite moodulil oma relee.

2 APARAADI OSADE DISAIN JA TEOSTUS

Selles peatükis esitatakse põhjalik tehniline dokumentatsioon seadmesiseste moodulite ja seadme kere disaini kohta. Kirjeldatakse trafot, toite sisendi moodulit, alalisvoolumuunduri moodulit ning mõõteseadmete ja väljundite moodulit. Kirjeldatakse ka kere detaile.

2.1 Trafo

Selles alampeatükis kirjeldatakse, milline trafo valiti seadme sees kasutamiseks, ning milliseid modifikatsioone sellega tehti, et tagada trafo vastavus disainikriteeriumitele.

2.1.1 Trafo toorik

Aparaadis kasutamiseks ostetud autotrafo (Joonis 2.1) ei ole komplektne. Trafol puudub kest ja ühendusklemmide plaat, kuid olemas on põhjaplaat ja toroidtrafo kandurid ning kontaktratta mehhanism koos reguleernupuga. Reguleernupp on kinnitatud kontaktratta kandurile pronksist distantspuksiga, mis ei ole originaalne. Olemasolevate osade disaini ning trafo gabariitmõõtmete järgi on autori hinnangul tegemist Nõukogude Liidus toodetud laboratoorse autotrafoga *ЛАТР-2М* (ЛАТР – laboratoorne autotransformaator, reguleeritav). Foto autotrafost täies kompleksuses on esitatud joonisel 2.2. Seda tüüpi autotrafo lubatav nimivool on kasutusjuhendi [1] järgi 2 A.



Joonis 2.1: Trafo algne seisukord

2.1.2 trafo uurimine ja katsetamine

Ehitatava aparadi sees ei saa kasutada autotrafot, kuna see ei võimalda väljundite galvaanilist eraldust elektrivõrgust. Autotrafo tuleb ümber mähkida primaar- ja sekundaar-mähistega eraldustrafoks. Trafo olemasolev mähis on heas korras ja võimaldab ümbermähkimise eel katseliselt uurida trafo keerupinget. Samuti on võimalik see säilitada primaarmähisena.



Joonis 2.2: Originaalkomplektsuses trafo
ЛАТР-2М. [2]

Trafo disainimisel on oluline trafo südamiku pingekonstant. See on suurus, mille väärtust mõjutavad trafo südamiku mõõtmed, südamiku materjali magneetumise küllastuspiir, rakendatava elektrivoolu sagedus ja inseneri poolt aktsepteeritav magneetimisvoolu tugevus [3]. Kuna selles töös ei disainita trafot tühjalt kohalt, vaid adapteeritakse olemasolev trafo uude kasutusse, ei ole mõtet kõiki nimetatud parameetreid uurima hakata, kuna võimalikud valikud on juba trafo disaininud inseneri poolt tehtud. Trafo ümbermähkimiseks tuleb vaid katseliselt määrata trafo pingekonstandi väärtus toitepinge 230 V 50 Hz korral, mille juures seda trafot aparadi koosseisus kasutama hakatakse.

Pingekonstandi katse: Trafo südamikule mähiti ajutine sekundaarmähis 23 keeruga. Ajutise mõõtemähise väljundpinget mõõdeti tühijooksul. Teades ajutise mähise keerdude arvu ja ajutisel mähisel mõõdetud pinget, on võimalik arvutada keerdude arvu pingeühiku kohta, ehk trafo südamiku pingekonstanti. Valemi 2.1 järgi arvutatud pingekonstandi abil on võimalik välja arvutada ümbermähkimise käigus juurde mähitavate mähiste keerdude arve.

$$\frac{23 \text{ keerdu}}{10.5 \text{ V}} = 2.19 \frac{\text{keerdu}}{\text{V}} \approx 2.2 \frac{\text{keerdu}}{\text{V}} \quad (2.1)$$

2.1.3 Trafo ümbermähkimine disaininõuetele vastavaks

Arvutused: Trafole oli vaja mähkida üks sekundaarmähis aparadi sisetoidete jaoks ja teine varieeritava vahelduvvooluväljundi saamiseks. Aparadis kasutatavad sisetoided on alalispingetega 12 V ja 35 V. Nende pingete saavutamiseks peavad trafo mähise nimipinged olema sellised, et nimetatud väärtused on võrdsed amplituudpingega. Mähiste nimipinged on arvutatud valemitega 2.2 ja 2.3.

$$\frac{12 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 8.5 \text{ V} \approx 9 \text{ V} \quad (2.2)$$

$$\frac{35 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 24.75 \text{ V} \approx 25 \text{ V} \quad (2.3)$$

Nende väärtuste järgi on valemites 2.4 ja 2.5 arvutatud mähiste vajalikud keerdude arvud.

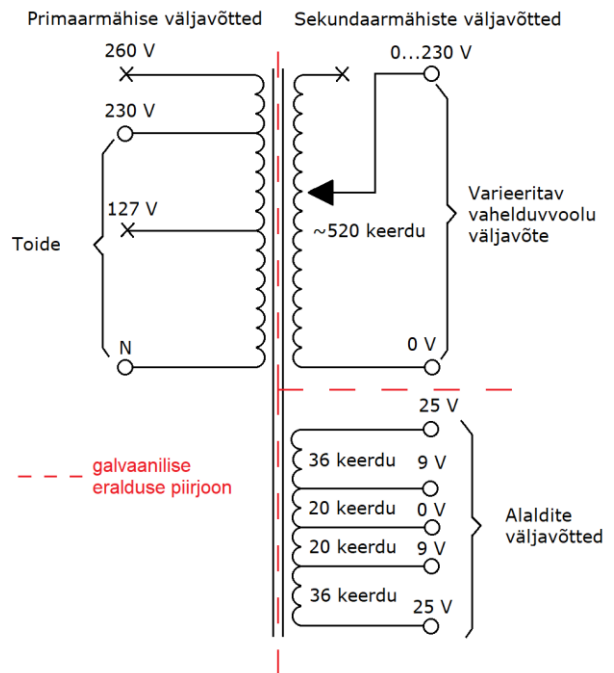
$$9 \text{ V} \cdot \frac{2.2 \text{ keerdu}}{V} = 19.8 \text{ keerdu} \approx \mathbf{20 \text{ keerdu}} \quad (2.4)$$

$$25 \text{ V} \cdot \frac{2.2 \text{ keerdu}}{V} = 55 \text{ keerdu} \approx \mathbf{56 \text{ keerdu}} \quad (2.5)$$

Primaarmähis on trafo originaalne mähis. See on mähitud mähiseraadist läbimõõduga 0.4 mm. Primaarmähisel on trafo juhendi [1] järgi 590 keerdu. Primaarmähisel on neli kohtkindlat väljavõtet (Joonis 2.3): neutraalpunkt, 127 V, 220 V ja 250 V. Tegemist oli autotrafo mähisega ja seetõttu on mähiseraadilt eemaldatud isolatsioonilakk kommutatsioonirõngana mööda trafo ülaserva. Selle mähise isoleerimiseks mähibi mähisele täies ulatuses peale kuumakindel polüümiidteip.

Sisetoidete sekundaarmähis: Sisetoidete sekundaarmähiselt saadakse sisendmooduli alaldite toiteks väljundpinged 9 V ja 25 V. Mähisel on kokku 112 keerdu, mis paiknevad sümmeetriliselt ümber keskväljavõtte (Joonis 2.3). Keskväljavõttest mõlemas suunas on 20 keeru kaugusel 9 V väljavõtte ja mähise kummaski otsas on 25 V väljavõtte. Väljavõtteid on kokku viis. Mähis on mähitud 0.7 mm läbimõõduga mähiseraadist, et võimaldada alalisvoolumuunduri toiteks 3 A koormusvoolu mähisel.

Et võimaldada trafo ülekuumenemise tuvastamist ja trafot ülekuumenemise eest kaitsta, on sekundaarmähise ja primaarmähise vahele paigaldatud 70 °C lülituspunktiga normaalselt suletud kontaktiga termostaatlüliti (Joonis 2.4). Lüliti kontaktide avanemist kasutatakse teistes moodulites trafo ülekuumenemise signaalina, mille peale trafo vabastatakse koormusest. Trafo koormuskaitseahelat kirjeldatakse täpsemalt muunduri ja mõõteseadmete mooduli alampeatükides ning valmis seadme analüüsi peatükis.



Joonis 2.3: Ümbermähitud trafo mähiste skeem



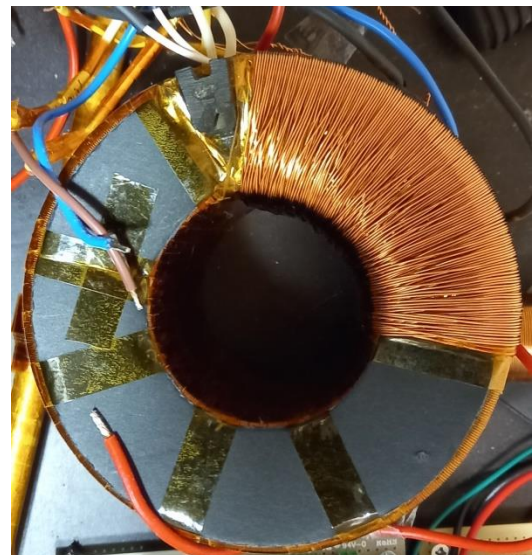
Joonis 2.4: Termos-
taatlüliti mähise
keerdude vahel

Valmis mähisele on täies ulatuses peale mähitud isoleeriv kiht kuumakindlat polüümiidteipi. Kuna eelnevalt kirjeldatud sekundaarmähis ei kata trafo südamikku täies mahus, on primaarmähise katmata ülakihi peale teibitud sekundaarmähise traadiga sarnase paksusega papist leht. Joonis 2.5 kujutab vahelduvvoolu väljundi sekundaarmähist mähkimis-protsessi ajal ja näha on ka täitepapp mähise all. Täitepapp on vajalik kõige peale mähitava vahelduvvooluväljundi sekundaarmähise ülapinna tasapinnalisuse tagamiseks. Nimetatud mähise ülapind peab olema tasapinnaline, et võimaldada kommutatsioonipinna tekitamist mähisele.

Vahelduvvooluväljundi sekundaarmähis on mähitud teiste mähiste peale. Mähis on mähitud 0.5 mm mähisetraadist ning katab kogu trafo toroidsüdamikul leiduva mähkimispinna. Mähisel on üks ots kasutuses väljavõtteks ja teine ots isoleeritud. Mähise teine väljavõte on varieeritava väljundiga kontaktiratas, mis ühendub mähise keerdudega kommutatsioonipinnal. (Joonis 2.3)

Sellel mähisel on suurusjärgus 510 kuni 530 keerdu. Selle mähise mähkimisel ei olnud keerdude arv eelnevalt arvatud, kuna teada oli, et originaalsele primaarmähisele sarnase läbimõõduga mähisetraati kasutades tuleb mähkida trafo südamikku ligikaudu samasugusel määral kattev mähis, kui eesmärk on võrgupingel väljund.

Selle mähise ülaserivas on eemaldatud isolatsiooniga kommutatsioonipind, millel saab liigutada trafo varieeritava väljundi kontaktratas, saavutades kontakti mähise erinevate keerdudega ja varieerides pinget mähise otsväljavõtte ja . Mähise keerud on trafo ülapinnal epoksiidliimiga kokku liimitud, selleks et kontaktratta liikumine eemaldatud isolatsiooniga mähisekeerduid liigutada ja omavahel kokku lühistada ei saaks.



Joonis 2.5: Vahelduvvooluväljundi
sekundaarmähis mähkimisprotsessi ajal ja
täitepapp mähise all

2.1.4 Übermähitud trafo nimiparameetrid

Trafo primaarmähis on mähitud 0.4 mm läbimõõduga mähisetraadist ja originaalis ette nähtud nimivoolule kuni 2 A. Trafo primaarmähise aktiivtakistus on 13 Ω. Kuna übermähitud kujul ei ole primaarmähis enam trafo kõige välimine ja kõige paremini jahutatav kiht, vaid pealmised mähised isoleerivad selle ümbritsevast õhust, olles ise täiendavad soojusallikad, siis saab primaarmähist koormata hinnanguliselt poole väiksema vooluga, ehk kuni 1 A. Primaarmähis on originaalis ette nähtud töötama 220 V vahelduvvooluga, kuid töötamine 230 V pingel ei põhjusta trafo südamikuküllastumist. Seega trafo maksimaalne näivvõimsus saab olla 230 VA.

Sisetoidete sekundaarmähis on mähitud 0,7 mm läbimõõduga mähisetraadist ja selle aktiivtakistused on järgmised: 9 V mähise aktiivtakistus on ligikaudu 0,2 Ω ja 25 V mähise aktiivtakistus 0,5 Ω. Kuna 9 V ja 25 V mähised on ühise tsentripunktiga, siis 25 V mähise pingelang koormusel mõjutab ka 9 V mähise pinget, kuid sellega on arvestatud selle pingega toidetavate moodulite disainil.

Vahelduvvooluväljundi sekundaarmähis on mähitud 0,5 mm läbimõõduga mähisetraadist, selle aktiivtakistus on 10 Ω. Primaarmähisest veidi jämedama mähisetraadiga mähitud sekundaarmähise südamikule mahutamiseks oli probleeme. Vajaliku 230V väljundpinge saavutamiseks tuli mähised paigutada nii suurele pinnale, et kontaktrattaga ei ole võimalik mähise esimeste keerdudega kontakti saavutada. Seetõttu on madalaim väljundpinge 6 V.

Rauaskaod trafo südamikus: autotrafo kasutusjuhendist [1] on teada, et originaalse trafo tühijooksuvool oli 0,3 A ja tühijooksu võimsuskadu 15 W. Aktiivtakistus autotrafo mähise osal, millele ühendatakse 220 V toide, on 13 Ω. Võimalik on välja arvutada tühijooksu vaseskadu autotrafo mähises ligikaudu 1.2 W (valem 2.6).

$$P_{Cu_0} = (0.3 \text{ A})^2 \cdot 13 \Omega = 1.17 \text{ W} \quad (2.6)$$

P_{Cu_0} – Primaarmähise tühijooksu vaseskadu

Kuna tühijooksukadu on rauaskao ja äsja arvatud vaseskao summa, siis rauaskadu trafo südamikus on ligikaudu 13.9 W (valem 2.7).

$$P_{Fe} = 15 \text{ W} - 1.17 \text{ W} = 13.83 \text{ W} \quad (2.7)$$

P_{Fe} – Trafo rauaskadu

Kuna ümbermähitud trafo primaarmähisena kasutatakse autotrafo originaalset mähist, trafo südamik on endine ja trafo toitepinge on sarnane originaalsele, siis võib hinnata ka ümbermähitud trafo rauaskaoks 13.9 W. Südamiku rauaskadu on sõltuv ainult võrgupingest ja esineb terve aja kui trafo on võrku ühendatud. Kuigi primaarmähise vaseskadu varieerub koormusega, on selle alampiiriks südamiku 0.3 A magneetimisvoolu põhjustatav 1.2 W soojuskadu primaarmähise aktiivtakistusel, kuna südamiku magneetimisvool on sarnaselt rauaskaole sõltuv ainult võrgupingest ja kulgeb primaarmähises alati kui trafo on sisse lülitatud.

Vaseskaod mähistel trafo koormamise korral: Kui sisetoidete sekundaarmähise 25 V väljavõtet koormatakse 3 A vooluga, siis avaldub sisetoidete mähise 0.5 Ω aktiivtakistusel vaseskadu 4,5 W (valem 2.8).

$$P_{Cu_2} = (3 \text{ A})^2 \cdot 0,5 \Omega = 4,5 \text{ W} \quad (2.8)$$

P_{Cu_2} – Sisetoidete sekundaarmähise vaseskadu täiskoormusel

Sisetoidete sekundaarmähise 9 V mähist ei koormata kunagi märkimisväärselt ja algandmete täpsust arvestades on selle koormuse mõju kadudele tühiselt väike.

Vahelduvvoolu väljundi sekundaarmähise koormamisel 1 A vooluga avaldub vahelduvvooluväljundi sekundaarmähise aktiivtakistusel 10 Ω vaseskadu 10 W (valem 2.9).

$$P_{Cu_3} = (1 \text{ A})^2 \cdot 10 \Omega = 10 \text{ W} \quad (2.9)$$

P_{Cu_3} – Vahelduvvoolu väljundi sekundaarmähise vaseskadu täiskoormusel

Primaarmähisel tekib sekundaarmähiste eelnimetatud koormuste korral vool, mis moodustub südamiku magneetimisvoolust ja sekundaarmähiste primaarmähisele kanduvast koormusest. Magneetimisvool on oma olemuselt induktiivne, ehk pingest hilistuv ja selleks võib lugeda trafo tühijooksuvoolu 0.3 A. Sekundaarmähiste koormustest tekib primaarmähisele aktiivkoormus, ehk pingega faasis koormusvool. Sekundaarmähiste koormusvoolud kanduvad primaarmähisele suhtes konkreetse mähisepaari ülekandekonstandiga.

Kõige lihtsam on üle kanda vahelduvvoolu väljundi sekundaarmähise koormust, sest trafo ülekandekonstant sellele mähisele on 1. Sellest jäeldub, et sekundaarmähise koormamisel 1 A koormusega tekib ka primaarmähisele koormusvool 1 A (valem 2.10).

$$I_{Prim_3} = \frac{1 \text{ A}}{1} = \mathbf{1 \text{ A}} \quad (2.10)$$

I_{Prim_3} – Primaarmähisele üle kanduv koormusvool vahelduvvoolu sekundaarmähise koormamisest

Sisetoidete sekundaarmähise ülekandekonstant on võrdne pingete suhtega primaar- ja sekundaarmähisel. Ülekandekonstant sekundaarmähiselt primaarmähisele on 9,2 (valem 2.11).

$$k_{31} = \frac{230 \text{ V}}{25 \text{ V}} = 9.2 \quad (2.11)$$

k_{31} – Trafo ülekandekonstant sisetoidete sekundaarmähiselt primaarmähisele

Sekundaarmähise koormamisel vooluga 3 A kandub primaarmähisele vool ligikaudu 0,33 A (valem 2.12).

$$I_{Prim_2} = \frac{3 \text{ A}}{9.2} \approx \mathbf{0,326 \text{ A}} \quad (2.12)$$

I_{Prim_2} – Primaarmähisele üle kanduv koormusvool sisetoidete sekundaarmähise koormamisest

Sekundaarmähiselt primaarmähisele ülekanduv summaarne koormusvool on 1,33 A. Primaarmähise maksimaalse koormusvoolu arvutamiseks tuleb sellele veel lisada 90° faasinihkega magneetimisvool 0,3 A, mis on sõltumatu koormusest. Primaarmähise koormusvool maksimaalsel koormusel on ligikaudu 1,37 A (valem 2.13).

$$I_{Prim} = \sqrt{(0,3 \text{ A})^2 + (1,33 \text{ A})^2} \approx \mathbf{1,363 \text{ A}} \quad (2.13)$$

I_{Prim} – Primaarmähise maksimaalne voolutugevus normaaltalitusel

Primaarmähise vaseskaod maksimaalsel koormusvoolul on ligikaudu 24,2 W (valem 2.14).

$$P_{Cu_1} = (1.363 \text{ A})^2 \cdot 13 \Omega \approx \mathbf{24,17 \text{ W}} \quad (2.14)$$

P_{Cu_1} – Primaarmähise summaarsed vaseskaod sekundaarmähiste maksimaalsel koormamisel

Summaarsed kaod trafo maksimaalsel koormamisel avalduvad südamiku rauaskadude ja mähiste vaseskadude summana. Summaarsed kaod trafo maksimumkoormusel on 52,5 W (valem 2.15).

$$P_{kadu} = P_{Fe} + P_{Cu_1} + P_{Cu_2} + P_{Cu_3} = 13,83 \text{ W} + 24,17 \text{ W} + 4,5 \text{ W} + 10 \text{ W} = 52,5 \text{ W} \quad (2.15)$$

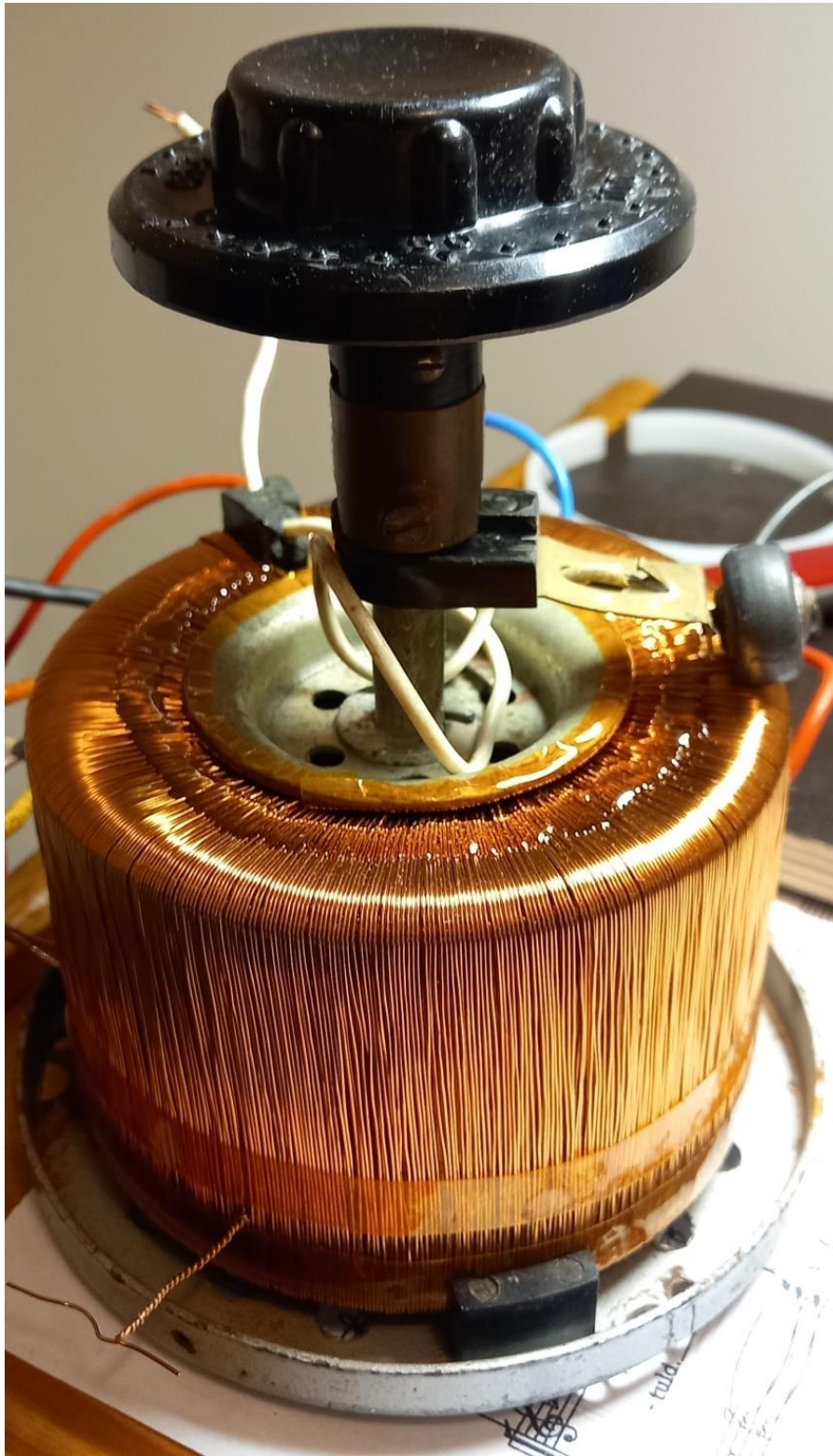
P_{kadu} – Trafo maksimaalne summaarne kaovõimsus

Tuleb märgata, et maksimaalne koormusvool ületab trafo koormusele hinnanguliselt seatud piiri. Aparaaadi alalis- ja vahelduvvoolu väljundeid ei saa pikaajaliselt üheaegselt koormata. Arvutatud koormusvoolu juures on võimsuskad suured ja on oht trafo ülekuumenemisele. Seetõttu lisati temperatuuri jälgimiseks trafosse kaitsetermostaat ja trafo temperatuuri piiramiseks kaitseahel, mis vabastab ülekuumenenud trafo koormusest.

2.1.5 Ümbermähkimise lõpptulemus

Ümbermähkimise tulemusena valmis trafo (Joonis 2.6), mis töötab võrgupingel ja millel on võrgust galvaaniliselt eraldatud väljundid. Trafo väljundid: 9 V; 25 V, 3 A; 6 V ... 230 V, 1 A.

Selliste parameetritega trafo sobib kasutamiseks aparaaadi osana, kuna vastab peamistele disainikriteeriumidele. Trafo ei võimalda vahelduv-voolu väljundi pinget reguleerimist alates 0 V, kuid see ei ole suur puudujääk ja piiratud tööaja tingimustes ei olnud võimalik paremat tulemust saavutada.



Joonis 2.6: Trafo peale übermähkimist. Foto tegemise ajal ei olnud veel sekundaarmähise jätkukohad joodetud ega isoleeritud, fotol on näha üks jätkukohtadest.

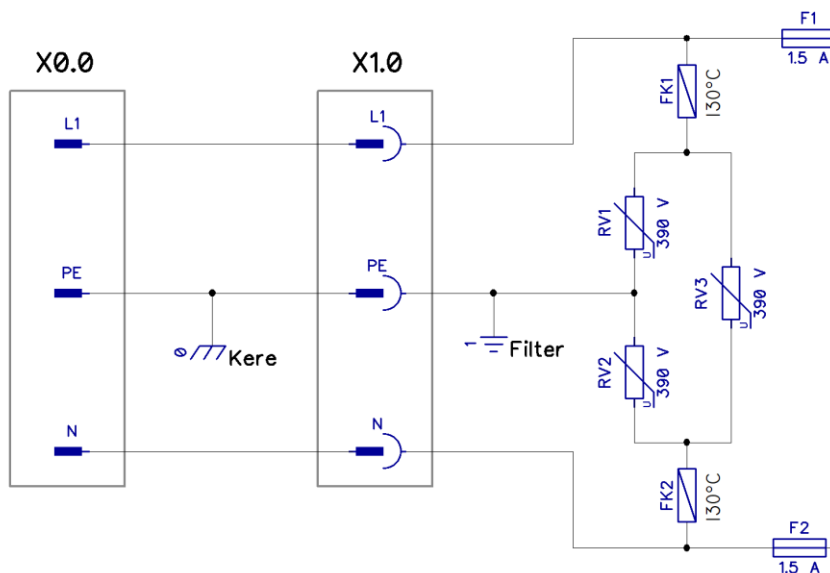
2.2 Toite sisendi moodul

Selles alampeatükis kirjeldatakse toite sisendi moodulit, kasutades illustatsioonidena väljalõikeid toite sisendi mooduli elektriskeemist töö graafilises osas. Parema ülevaatlikkuse huvides on soovituslik uurida selle peatükiga paralleelselt mooduli terviklikku elektriskeemi joonisel „Toite sisendi elektriskeem“.

2.2.1 Toite sisend

Toide elektrivõrgust siseneb aparati läbi korpuse tagaseinas paikneva IEC C14 toitepesa X0.0 (Joonis 2.7), toitepesa juures ühendub kaitsemaandusjuht kerega. Kõik toitejuhid sisenevad toite sisendi moodulile terminalplokki X1.0 kaudu.

Liigpingepiiriku varistorid RV1, RV2 ja RV3 on ühendatud toite sisendi faasijuhi, neutraalijuhi ja kaitsemaandusjuhi vahele. Kasutatavad varistorid on rakenduspinge ga ligikaudu 390 V. Arvestades, et maksimaalse lubatava võrgupinge 253 V korral on pinge amplituudväärtus ligikaudu 367 V, jääb varistori rakenduspunkt normaalsest võrgupinge piirist kõrgemale.



Joonis 2.7: väljalõige jooniselt „Toite sisendi elektriskeem“: Toite sisend aparati ja sisendmooduli liigpingepiirik

Pingeimpulsside esinemisel töö-

juhtidel varistorid rakenduvad ja juhivad impulsi energia kaitsemaandusjuhile, piirates aparati jõudva impulsi maksimumpinget ja summutades pingepulsi energia.

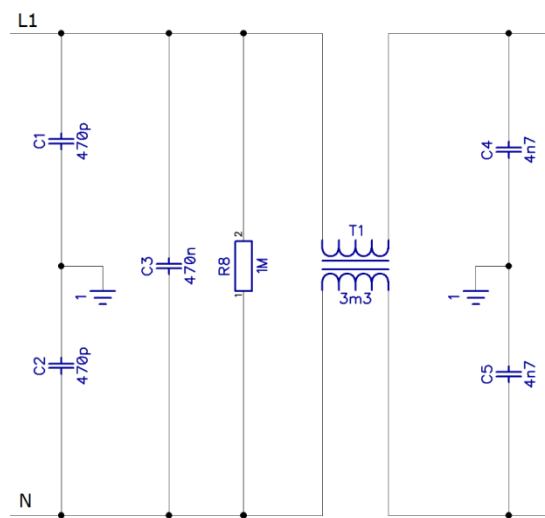
Kuna **varistorid vananevad** kasutuses ja nende rakenduspinge väheneb vananemisega, siis võib tekkida olukord, kus varistorid hakkavad rakenduma võrgupinge juures. Sellel juhul varistorid kuumenevad ja muutuvad tuleohtlikuks. Kuumenemise eest kaitseks on pingepiiriku varistoridega kokkupuutes termokaitsmed FK1 ja FK2, mis lahutavad varistorid jäävalt seadme toite tööjuhtidest juhul kui varistoride temperatuur kasvab üle 130 °C.

Aparaadi peakaitsmetena kasutatakse aeglase rakendumiskõveraga 1.5 A nimivooluga sulavkaitsmeid F1 ja F2. Impulsi summutamisel maandusjuhti võivad varistorid lühiajaliselt juhtida kiloampritesse ulatuva suurusega voolusid. Et vältida seadme peakaitsete läbipõlemist lühiajaliste siirete korral, paiknevad varistorid elektriskeemis seadme peakaitsetest toite pool. Sellise paiknemisega ei reageeri seadme toite kaitsmed varistoride tegevusele. Kui varistoride ahelas tekib lühis, peab selle lahutamiseks toime tulema aparadi toitekts kasutatava elektripaigaldise kaitselahuti.

2.2.2 Häiringufilter

Häiringufilter on madalpääsufilter, mille eesmärk on summutada kõrgsagedusliku elektromagnetilise häiringu levikut aparadist elektrivõrku ja võrgust aparadi.

Häiringufiltri ehitus: Alustades võrgutoite sisendile lähimatest komponentidest, on filtri (Joonis 2.8) osad järgmised: kondensaatorid C1, C2 ja C3, Sidestatud mähistega jadadrossel T1 ja kondensaatorid C4 ning C5. Kondensaatori C3 tühjen-damiseks on filtris takisti R3. Kondensaatori C3 tühjendamine on vajalik selleks, et vältida aparadi toitejuhtme seinakontaktist väljatõmbamise järel võimalikku elektrilööki laetud kondensaatorilt C3 toitejuhtme klemmide kaudu.

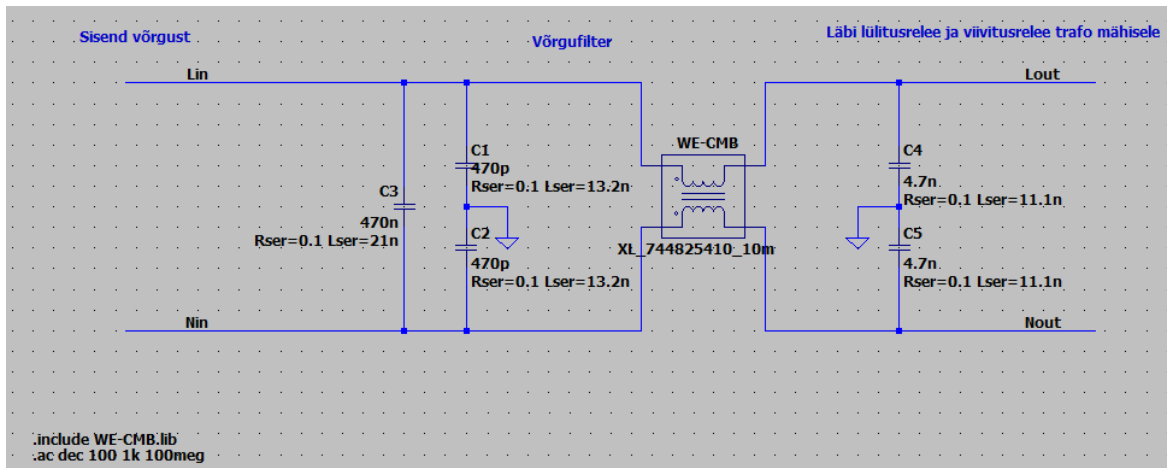


Joonis 2.8: väljalõige jooniselt „Toite sisendi elektriskeem“: Toite sisendi häiringufilter

Filter paikneb toite sisendi mooduli võrgutoite ahelas kohe peale aparadi peakaitseid F1 ja F2 (Joonis 2.7). Kondensaatorid C1 ja C2 on ühendatud toite tööjuhtidelt maandusjuhile, samuti kondensaatorid C4 ja C5. Tööjuhi ja maandusjuhi vahele ühendatud kondensaatorid peavad olema standardi IEC 60384-14 kohaselt Y-klassi tõrkekindlushinnanguga, kuna nende kondensaatorite lühistumisega kaasneb elektrilöögioht [4]. Kasutatavad kondensaatorid on hinnanguga Y1, mis tähendab, et neid võib kasutada kuni 500 V vahelduvpinge juures toite tööjuhi ja kaitsemaanduse vahel ja need kannatavad pingeimpulsse kuni 8 kV[5][6]. Kondensaator C3 on ühendatud toite tööjuhtide vahele. Tööjuhtidevaheline kondensaator peab olema eelnimetatud standardi kohaselt X-klassi tõrkekindlushinnanguga – kuigi kondensaatori rikke korral elektrilöögiohtu ei teki, on kõrgendatud tõrkekindlus tuleohutuse seisukohast siiski vajalik [4]. Kasutatav kondensaator on hinnanguga X2,

mis lubab seda kasutada kuni 275 V vahelduvpinge juures ja tagab, et kondensaator kannatab pingepulsse kuni 2,5 kV [7].

Häiringufiltri simulatsiooniskeem: Häiringufiltri filtreeriva toime hindamiseks kasutati simulatsioonitarkvara LTspice XVII. Tarkvaras koostati simulatsiooniskeem (Joonis 2.9), millele lisati häiringufiltri komponendid. Simulatsiooni tõepärasuse parandamiseks lisati filtri kondensaatoritele lisaks nimisuurustele ka ka parasiitsed komponendid.



Joonis 2.9: Häiringufiltri simulatsiooniskeem. Skeemis ei ole tühjendustakistit R3, kuna sellel ei ole märgatavat filtreerivat toimet. Skeemil on kondensaatorite väärtused märgitud järgneva seaduspärasuse alusel:

C3: 470p – mahtuvus 470 pF,
 Rser=0.1 – jadatakistus 0.1 Ω,
 Lser = 21n – jadainduktiivsus 21 nH.

Parasiitkomponentide määramine: Asümmeetrilise häiringu filtreerimiseks kasutatava sidestatud drosselina saab lihtsustatud simuleerimise korral kasutada simulatsioonis trafo mudelit. Skeemis realselt kasutatava komponendi tootja on oma filterkomponentide kataloogis kättesaadavaks teinud ka LTspice'i mudelid, seetõttu on filtri simulatsioonil kasutatud tootja mudelit [8]. Simulatsioonil on võetud eelduseks, et komponenditootja mudel sisaldab kõiki vajalikke parasiitkomponente ja on reaalse komponendi täpne representatsioon.

Kondensaatorite jadatakistuse väärtuste kohta tõsiseltvõetavaid allikaid ei ole, seetõttu on kõigi kondensaatorite jadatakistuseks hinnatud 0.1Ω . Jadatakistus on hinnanguliselt väike, kuna kõik kondensaatorid on paber- või fooliumkondensaatorid, millele on iseloomulik madal sisetakistus.

Jadainduktiivsused on arvatud kondensaatorite andmelehtedes esitatud omaresonantsisageduste järgi. Kondensaatori C3 tooteseeria andmelehes ([9], detaili kood: PHE840MY6470MD14R06L2) on omaresonantsisageduseks märgitud 1,6 MHz. Kondensaatorite C4 ja C5 andmelehes [6] on nende omaresonantsisageduseks märgitud 22 MHz. Kondensaatorite C1 ja C2 andmelehe [5] järgi on nende omaresonantsisagedus 64 MHz.

Jadainduktiivsuse suhe omaresonantsisagedusse ja kondensaatori mahtuvusse on esitatud üldvalemis 2.16.

$$L_{Ser} = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad (2.16)$$

Muutujad valemis 2.16 on järgmised:

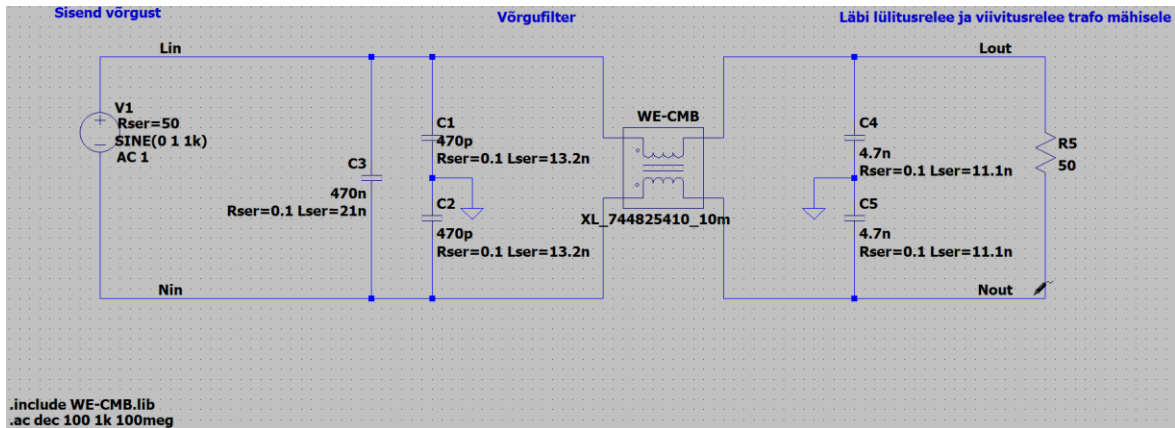
L_{Ser} – jadainduktiivsus

f – omaresonantsisagedus

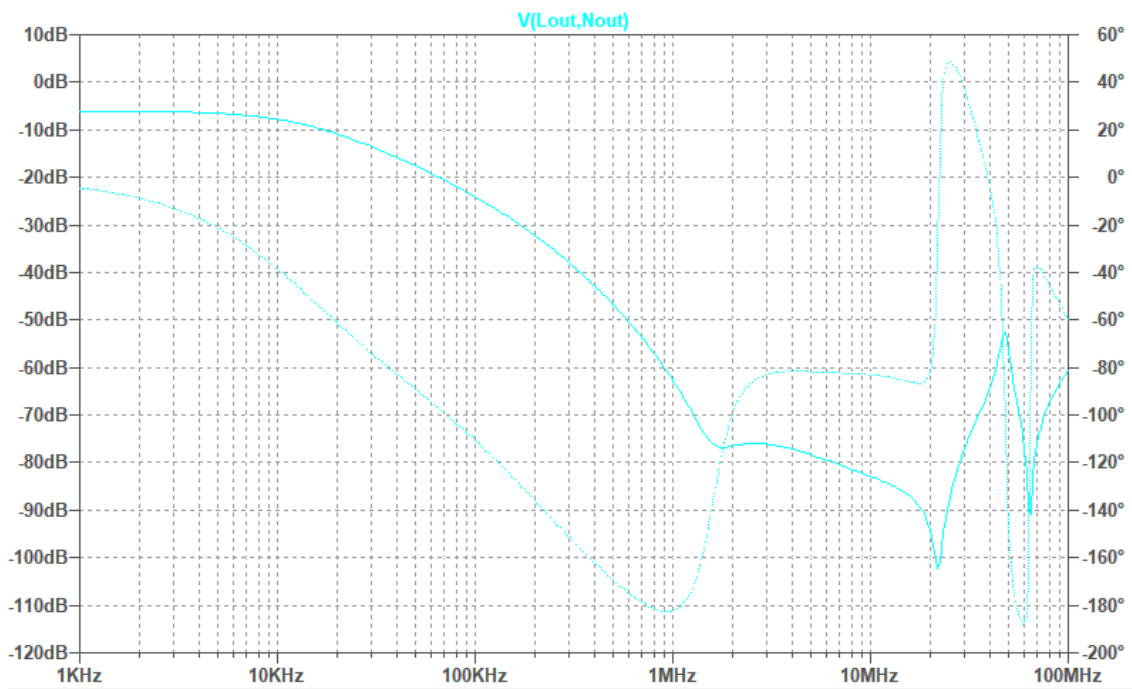
C – kondensaatori mahtuvus

Valemi 2.16 järgi on kondensaatori C3 jadainduktiivsus 21 nH, kondensaatorite C4 ja C5 jadainduktiivsus 11,1 nH ning kondensaatorite C1 ja C2 jadainduktiivsus 13,2 nH.

Sümmeetrilise häiringu simulatsioon: Sümmeetriline häiring – elektromagnetiline häiring, mille vool läbi seadme toitejuhtide ühelt tööjuhilt teisele. Selle häiringu voolud on tööjuhtidel võrdsed aga vastassuunalised, ehk sümmeetrilised [10]. Sümmeetrilise häiringu simuleerimiseks lisati simulatsiooniskeemile 50Ω sisetakistusega häiringuallikas V1 filtri sisendi tööjuhtide vahele ja 50Ω koormus R5 filtri väljundi tööjuhtide vahele (Joonis 2.11). Simulatsiooniprogrammi abil koostati filtri ülekandeteguri kohta Bode diagramm (Joonis 2.10) sagedusvahemikus 1 kHz kuni 100 Mhz. Diagrammi sisendsuurus on häiringuallika V1 pinge ja väljundsuurus on pingelang koormustakistil R5. Oluline on märkida, et kirjeldatud mõõtmismeetodi puhul on häiringuallika sisetakistuse ja koormustakisti tõttu mõõtmiskeemi ülekanne -6 dB kogu sagedusvahemikus. See tähendab, et saadud Bode diagrammi pinge ülekande karakteristik on 6 dB allpool filtri põhjustatavast ülekande karakteristikust ja graafiku lugemisel tuleb sellega arvestada.



Joonis 2.11: Sümmeetrilise häingu simulatsiooniskeem häinguallika V1 ja koormustakistiga R5



Joonis 2.10: Sümmeetrilise häingu simulatsiooni Bode diagramm

tugev joon – pingelekanne häinguallikalt koormustakistile

nõrk joon – filtri põhjustatav faasinihe ülekantavas signaalis

Bode diagrammilt on näha, et filtri põlvpunkt (madalaima sagedusega poolus - esimene punkt, milles filter põhjustab -3 dB ülekande) on sagedusel 13.7 kHz ja sellest sagedusest alates hakkab filtri ülekande vähenema. Vähenemine vahemikus 10 kHz kuni 1 MHz on kõvera karakteristikuga, kuna filtris kasutatava drosseli sagedusarakteristikud ei ole lineaarsed [11]. Ülekande langus on lauge

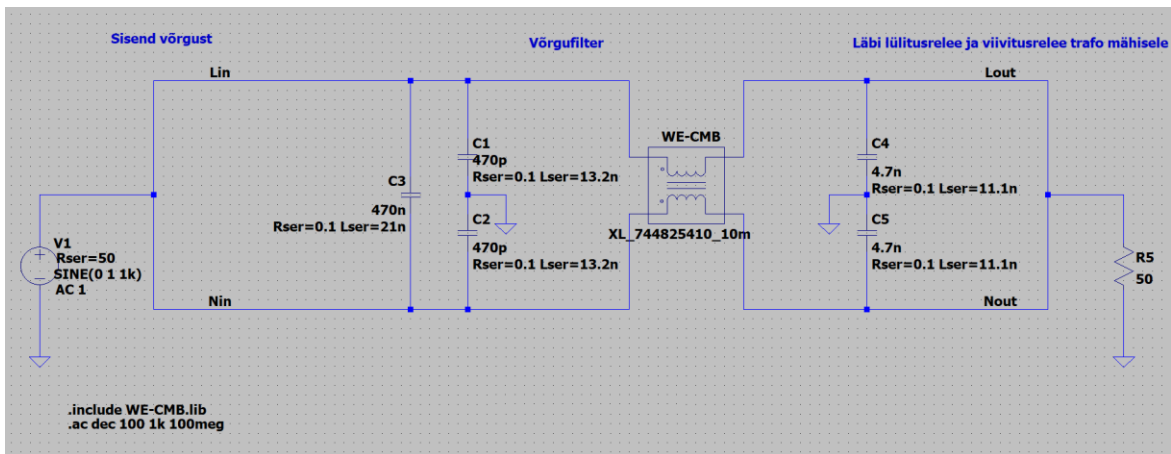
(<20 dB/dec), kuna filtris on asümmeetrilise häiringu filtreerimiseks kasutatud ainult kondensaatorit C3. Selle kondensaatori ja häiringuallika sisetakistuse vahel moodustub RC-filtri, mis põhjustaks 20 dB/dec langusega karakteristik, kuid ülekande langust vähendab jadadrosseli mõju. Filter oleks parema summutusega ja järsema ülekande langusega kui selle koostamisel oleks kasutatud ka sidestamata jadadrosseid.

Sagedusel 1,6 MHz on ülekande diagrammil nullpunkt, kuna kondensaator C3 läheb oma jadainduktiivsusega resonantsi ja filtri mastaabis lakkab kõrgematel sagedustel kondensaatorina mõjumast. Kuna jadadrossel, mis madalamatel sagedustel sümmeetrilisele häiringule mõju ei avalda, hakkab sagedusel 1 MHz summutama ka sümmeetrilist häiringut [11], siis kondensaatori C3 resonantsipunktist kõrgemate sageduste poole ei hakka ülekande karakteristik mitte tõusma, vaid jätkub samal tasemel, saavutades summutava mõju platoo ülekande magnituudi juures -70 dB kuni -80 dB sagedusvahemikus 2 MHz kuni 30 MHz.

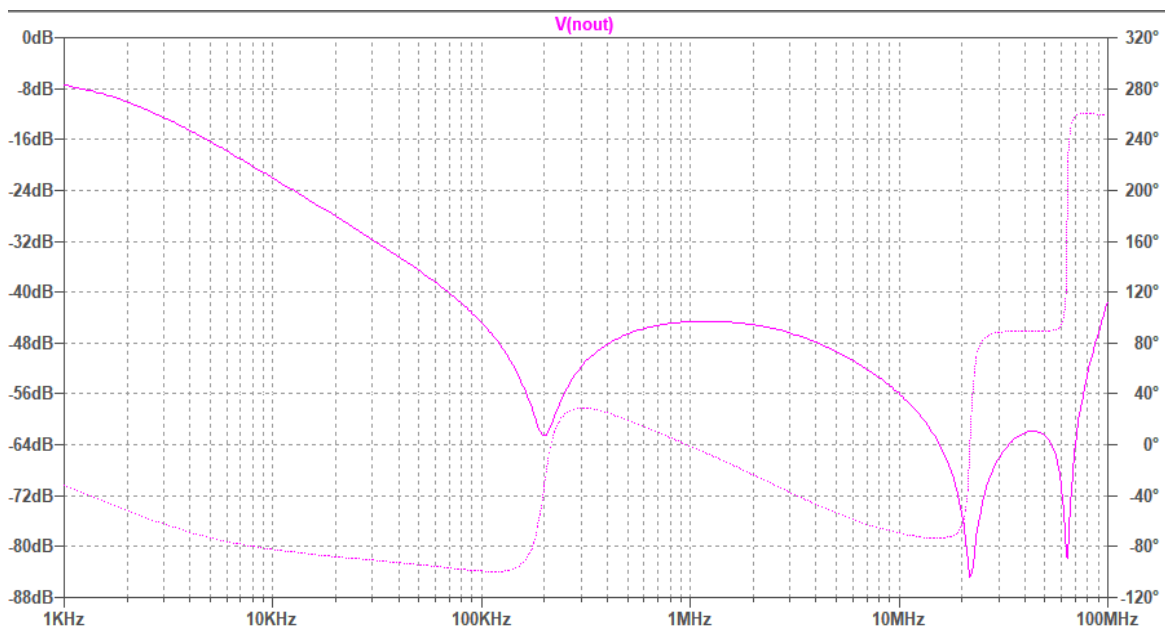
Sagedusel 22 MHz on ülekande diagrammil teine nullpunkt. Kondensaatorid C4 ja C5 lähevad sellel sagedusel omaresonantsi ja lakkab nende mahtuvuslik summutav mõju filtri ülekandele. Kuigi tööjuhtidelt maasse ühendatud kondensaatorid on kasutuses asümmeetrilise häiringu filtreerimiseks, on need toitejuhtme tööjuhtide vahele jadamisi ühendatud kondensaatorid, millel on mõningane mõju ka sümmeetrilisele häiringule. Ülekande karakteristik tõuseb sageduselt 22 MHz kuni sageduseni 48 MHz, kus on poolus, mis suunab karakteristik järele madalama ülekande poole. See on ilmselt kondensaatorite C1 ja C2 vooluresonants kondensaatorite C3, C4 ja C5 jadainduktiivsustega (arvutuslikult esineb see sagedusel ~50 MHz, kuid ka jadadrossel võib mõju avaldada), mis vähendab nende võimet sellel sageduselt häiringuid filtreerida. Vooluresonantsi punktist kõrgemal sagedusel ülekande karakteristik langeb.

Sagedusel 64 MHz on karakteristik kolmas nullpunkt kondensaatorite C1 ja C2 omaresonantsi tõttu. Sellest punktist kõrgemate sageduste poole hakkab filtri ülekande karakteristik üha kasvama, ehk väheneb summutav toime.

Asümmeetrilise häiringu simulatsioon: Asümmeetriline häiring – elektromagneetiline häiring, mille vool kulgeb toite tööjuhtide paari kaudu läbi seadme mahtuvusliku sidestuse maandusjuhile. Selle häiringu voolud on tööjuhtidel võrdsed ja samasuunalised, tööjuhtide suhtes asümmeetrilised [10]. Sümmeetrilise häiringu simuleerimiseks ühendati simulatsiooniskeemis kokku filtri sisendi tööjuhid omavahel ja filtri väljundi tööjuhid omavahel. Simulatsiooniskeemile lisati $50\ \Omega$ sisetakistusega häiringuallikas V1 filtri sisendi tööjuhtide ja maa vahele, ning $50\ \Omega$ koormus R5 filtri väljundi tööjuhtidelt maasse (Joonis 2.12). Simulatsiooniprogrammi abil koostati filtri ülekandeteguri



Joonis 2.12: Asümmeetrilise häiringu simulatsiooniskeem



Joonis 2.13: Asümmeetrilise häiringu simulatsiooni Bode diagramm

tugev joon – pinge ülekannete häiringuallikalt koormustakistile.

nõrk joon – filtri põhjustatav faasinuhe ülekantavale signaalile

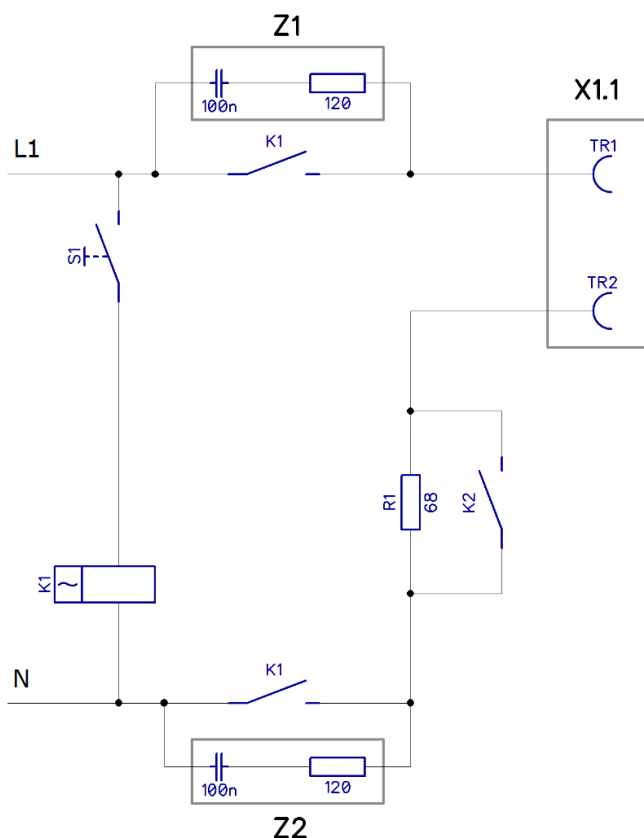
kohta Bode diagramm (Joonis 2.13) sagedusvahemikus 1 kHz kuni 100 Mhz. Diagrammi sisendsuurus on häiringuallika V1 pinge maa suhtes ja väljundsuuruseks pingelang koormustakistil R5 Oluline on märkida, et ka selle mõõtmismeetodi puhul on Häiringuallika sisetakistuse ja koormustakisti tõttu mõõtmiskeemi ülekanne -6 dB kogu sagedusvahemikus. See tähendab, et saadud Bode diagrammi pinge ülekande karakteristik on 6 dB allpool filtri põhjustatavast ülekande karakteristikust ja graafiku lugemisel tuleb sellega arvestada. Bode diagrammilt on näha, et filtri põlvepunkt on sagedusel 1.6 kHz ja sealt algab ülekandefunktsiooni langus 20 dB/dec.

Sagedusel 200 kHz on jadadrosseli mudelil suurim summutav mõju. Sealt kõrgema sageduse poole drosseli mõju asümmeetrilisele häiringule väheneb, kuid kondensaatorid C1 ja C2 ning C4 ja C5 omavad endiselt filtreerivat toimet. Sagedusvahemikus 200 kHz kuni 22 MHz on filtri ülekanne suurusjärgus -38 dB ja vahemikus 22 MHz kuni 64 MHz on ülekanne suurusjärgus -56 dB.

Sagedusel 22 MHz lähevad omaresonantsi kondensaatorid C4 ja C5 ning lõppeb nende filtreeriv mõju. See tekitab Bode diagrammile nullkoha ja sealt suuremate sageduste

suunas filtri ülekande karakteristik enam ei lange.

Sagedusel 64 MHz lähevad omaresonantsi kondensaatorid C1 ja C2 ning lõppeb nende filtreeriv toime. Kondensaatorite omaresonants tekitab teise nullkoha ja filtri ülekande karakteristik hakkab sellest punktist kõrgemate sageduste poole kerkima ning filtreeriv mõju vähenema.



Joonis 2.14: väljalõige jooniselt „Toite sisendi elektriskeem“: käivitusahel toite sisendi moodulil

2.2.3 Käivitusahel

Käivitusahel sisselülitamisel:

Käivitusahelat kujutab Joonis 2.14. Aparaaadi sisselülitamisel ühendab esipaneelil paiknev lüliti S1 käivitusrelee K1 mähise võrgutoitele, mille tagajärjel relee kontaktid sulguvad. Relee K1 kontaktide sulgumine ühendab

terminalplokki X1.1 klemmid võrgutoitele jadamisi volupiirdetakistiga R1. Aparaadis on terminalplokile X1.1 ühendatud trafo primaarmähis. Takisti R1 takistus 68Ω koos trafo primaarmähise aktiivtakistusega 13Ω piirab aparadi poolt põhjustatava maksimaalse võima-liku käivitusvoolu efektiivväärtuse alla 3 A (valem 2.17).

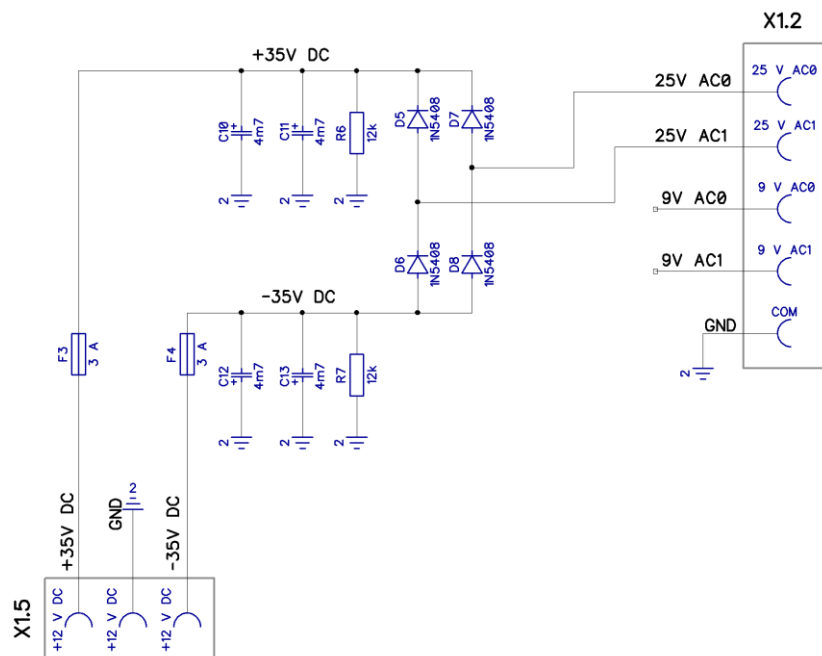
$$\frac{230 \text{ V}}{81 \Omega} \approx 2,83 \text{ A} \quad (2.17)$$

Peale trafo käivitumist lühistab lühiajalise viivituse järel rele K2 kontakt käivitustakisti R1. Relee K2 mähis on viivitusahelas, viivitusahela toimimist kirjeldatakse täpsemalt viivitusahela punktis.

Käivitusahel väljalülitamisel: Lülitil S1 lahutamisel katkeb käivitusrelee K1 mähise toide ja rele kontaktid avanevad, lahutades trafo elektrivõrgust. Kuna aparadi koormuse all väljalülitamine võib põhjustada rele K1 kontaktide vahel sädelahenduse ja erodeerida kontaktmaterjali, on võimalik rele kontaktide kasulik tööaja lühenemine. Et vähendada tekkivat sädelahendust rele kontaktide vahel ja seeläbi pikendada kontaktide kasutusiga, on kontaktidega paralleelsed sädemesummutid Z1 ja Z2, mis on ühises kesta paikneva jadatakistiga kondensaatorid. Sädemesummutid piiravad trafo primaarmähise puisteinduktiivsuse põhjustatavat pingepulssi väljalülitusel, võimaldades trafo primaarvoolu sujuvat langemist nullini ja vähendades niimoodi sädelahendust rele kontaktide vahel.

2.2.4 Alaldid

Alalisvoolumuunduri alaldi (Joonis 2.15) saab toite trafo 25 V väljavõtetelt. Trafo väljavõtted sisenevad toite sisendi moodulile terminalplokki X1.2 kaudu. Alaldi koosneb diodidest D5, D6, D7 ja D8. Alaldi on kasutatud 3 A nimivooluga diodeid 1N5408. Alaldi väljundis on silukondensaatorid C10, C11, C12 ja C13

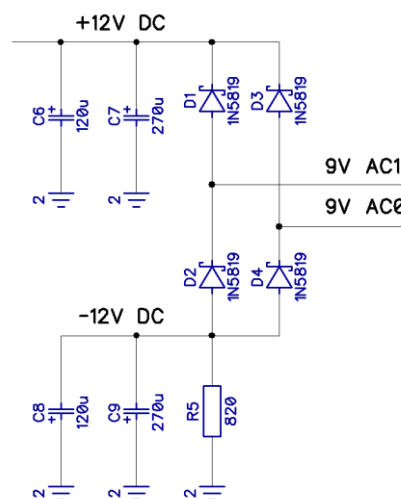


Joonis 2.15: väljalõige jooniselt „Toite sisendi elektriskeem“: alalisvoolumuunduri alaldi toite sisendi moodulil

tühjendustakistitega R6 ja R7. Silukondensaatorite nimiväärtus on 4,7 mF. Filterkondensaatorite maapunkt tähisega GND ja indeksiga 2 on ühendatud trafo sisetoidete sekundaarmähise keskväljavõttega ja on galvaaniliselt eraldatud elektrivõrgust. Alaldi filterkondensaatorid siluvad alaldi väljundpinged tasemele ligikaudu +35 V ja -35 V eraldatud maapunkti suhtes.

Kuna alaldi väljund on alguseks alalisvoolu-muunduri jõuahelale, on alaldi väljund kaitstud sulavkaitsmetega F3 ja F4. Kaitsmete nimivool on 3 A. Alalisvoolumuundur kasutab ainult alaldi positiivse pinge väljundit, negatiivse pinge väljund on kasutamata. Alalisvoolumuunduri toitejuhtmed ühenduvad toite sisendi moodulil terminalplokile X1.5.

Sisetoite alaldit kujutab Joonis 2.16. Sisetoite alaldi on ehituselt sarnane alalisvoolumuunduri alaldile. Alaldi koosneb diodidest D1, D2, D3 ja D4. Alaldi koostamisel on kasutatud 1 A nimivooluga Schottky diode 1N5819. Alaldi saab toite trafo 9 V väljavõtetelt terminalplokile X1.2 kaudu (Joonis 2.15). Alaldi väljundis on filterkondensaatorid C6, C7, C8 ja C9. Kondensaatoritel C8 ja C9 tühjendustakisti R5. Kondensaatorite C6 ja C7 tühjendustakistina mõjub viivitusahel. Sisetoite alaldi filterkondensaatorid siluvad alaldi väljundid tasemele +12 V ja -12 V eraldatud maapunkti suhtes. Sisetoite alaldi maapunkt on ühine 35 V alaldi maapunktiga. Kummagi väljundi silukondensaatoriteks on 120 μ F ja 270 μ F nimiväärtusega kondensaatoritest moodustatud paar.



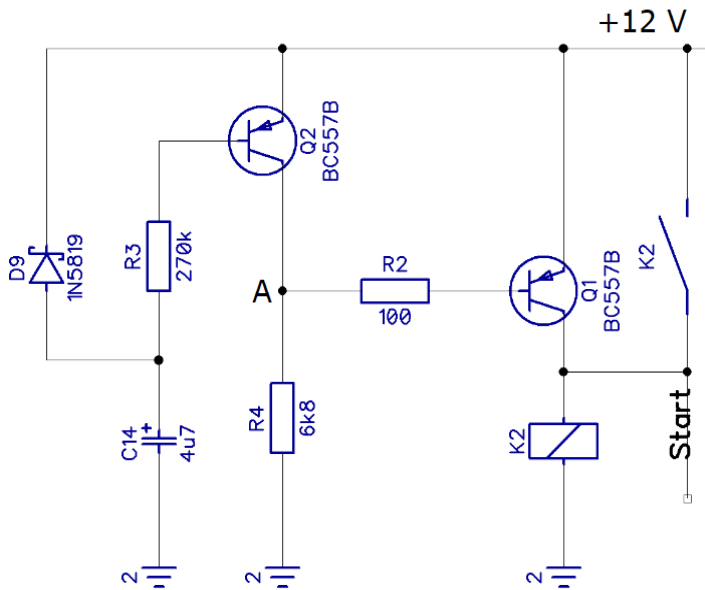
Joonis 2.16: väljalõige jooniselt

„Toite sisendi elektriskeem“:

Sisetoite alaldi toite sisendi

moodulil

+12 V väljundit kasutatakse toite sisendi mooduli viivitusahela ning mõõteseadmete ja väljundite mooduli toiteks. -12 V väljund on kasutuseta.



Joonis 2.17: väljalõige jooniselt „Toite sisendi elektriskeem“: toite sisendi mooduli viivitusahel

kõrge, et transistori Q1 baasiahelas voolu kulgeda ei saa, seega ei saa transistor Q1 juhtida voolu ka läbi rele K2 mähise, mis paikneb transistori kollektoriahelas.

Takisti R3 ja kondensaatori C14 väärtused on valitud sellised, et ajastuskondensaatori täielik laadumine võtab aega mitu sekundit (valem 2.18).

$$t = 5 \cdot (4,7 \text{ uF} \cdot 270 \text{ k}\Omega) = 6,345 \text{ s} \quad (2.18)$$

t – Ajastuskondensaatori laadimisaeg: $5 \cdot RC$

Ajastuskondensaatori laadumise ajal väheneb selle laadimisvool ja ühtlasi transistori Q2 baasivool pidevalt. Ühel hetkel väheneb transistori Q2 baasivool piisavalt, et transistor väljub küllastumusest ja selle kollektorivool läbi takisti R4 hakkab vähenema. Transistori Q2 kollektorivoolu vähenemisel väheneb ka sõlmpunkti A pinge ja punkti A langedes 0,7 V võrra alla toitepinge hakkab läbi takistite R2 ja R4 kulgema transistori Q1 baasivool. Transistori Q2 kollektorivoolu vähenemine viib selleni, et transistor Q1 saavutab vajaliku baasivoolu, et oma kollektoriahelas rele K2 mähise tõmbevoolu ületada.

2.2.5 Viivitusahel

Viivitusahel käivitumisel:

viivitusahela skeemi kujutab Joonis 2.17. viivitusahel rakendub aparaadi käivitamisel. Trafo hakkab peale aparaadi käivitamist toitma alaldeid ning viivitusahel saab +12 V toite. Toite saavutamisest alates hakkab viivitusahela transistori Q2 baasiahelas läbi takisti R3 kulgema ajastuskondensaatori C14 laadimisvool. Kuna transistoril Q2 on olemas baasivool, siis kulgeb ka transistori kollektoriahelas vool läbi takisti R4. Transistori Q2 kollektorivool hoiab takistite R4 ja R2 ühise sõlmpunkti A pinge piisavalt

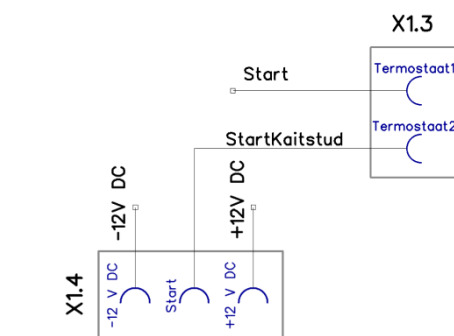
Tõmbevoolu saavutamisel sulgub relee kontakt, mis lukustab relee sisselülitatud olekusse, ühendades otse selle mähisele +12 V toite ja vabastades transistori Q1 koormusest. Samal hetkel sulgub ka relee teine kontakt (Joonis 2.14), mis lühistab toite sisendi käivitusahelas paikneva sujuvkäivitustakisti R1 ning ühendab trafo primaarmähise otse elektrivõrku. Relee lülitumise ja lukustumisega antakse ka käivitussignaali, mille saamisel käivituvad teised aparaadi moodulid.

Viivitusahel väljalülitamisel: Aparaadi väljalülitamise korral katkeb alaldite toide. Relee K2 mähise voolutarve tühjendab sisetoite alaldi silukondensaatorid C6 ja C7 (Joonis 2.16). Läbi diodi D9 tühjeneb samal ajal ka ajastuskondensaator C14, valmistudes ette järgmisel sisselülitusel viivituse võimaldamiseks. Ajastuskondensaatori C14 kiire tühjendamine kindlustab, et aparaadi igal käivitusel toimib sujuvkäivitusahel vajaliku viivitusega isegi siis, kui aparaati lülitatakse sisse – välja mitu korda sekundis. Kui relee K2 mähise vool on langenud alla hoidevoolu piiri, siis avanevad relee kontaktid. Oluline on märkida, et sujuvkäivitustakistit lühistav kontakt avaneb veidi hiljem kui aparaadi käivitusrelee K1 (Joonis 2.14) kontaktid, sest relee K2 mähise voolu toidab peale relee K1 väljalülitumist veel sisetoite alaldi kondensaatoritesse salvestatud energia. Viivitusega avanemise tõttu ei vaja relee K2 kontakt kaitset sädelahenduse tekkimise eest.

Kirjeldatud viivitusahela täpne viivitus sõltub kasutatavate komponentide väärtuste varieerumisest. Peamised mõjutegurid on transistoride Q1 ja Q2 võimendustegurid, mis võivad varieeruda samanimeliste komponentide vahel suurtes piirides. Katseliselt selgus, et viivitusahel annab käivitussignaali täpselt 2 s peale aparaadi sisselülitamist, mis on autori hinnangul piisav viivitus selleks, et voolupiirdetakistiga trafo jõuaks täis laadida alaldite filterkondensaatorid ja aparaadi käivitusvool jõuaks väheneda tühijooksuvooluni.

2.2.6 Sisetoite ja käivitussignaali väljund

Väljund on ühendatud toite sisendi mooduli terminalplokile X1.4 (Joonis 2.18). Sisetoite alaldi -12 V ja +12 V väljundid on ühendatud terminalploki klemmidele otse. Käivitussignaali kulgeb enne väljundterminalile jõudmist läbi trafo ülekuumenemise kaitsetermostaadi terminalploki X1.3 kaudu. Kaitsetermostaat on normaalselt suletud kontaktiga, trafo ülekuumenemise korral avaneb kaitsetermostaadi kontakt ja see katkestab

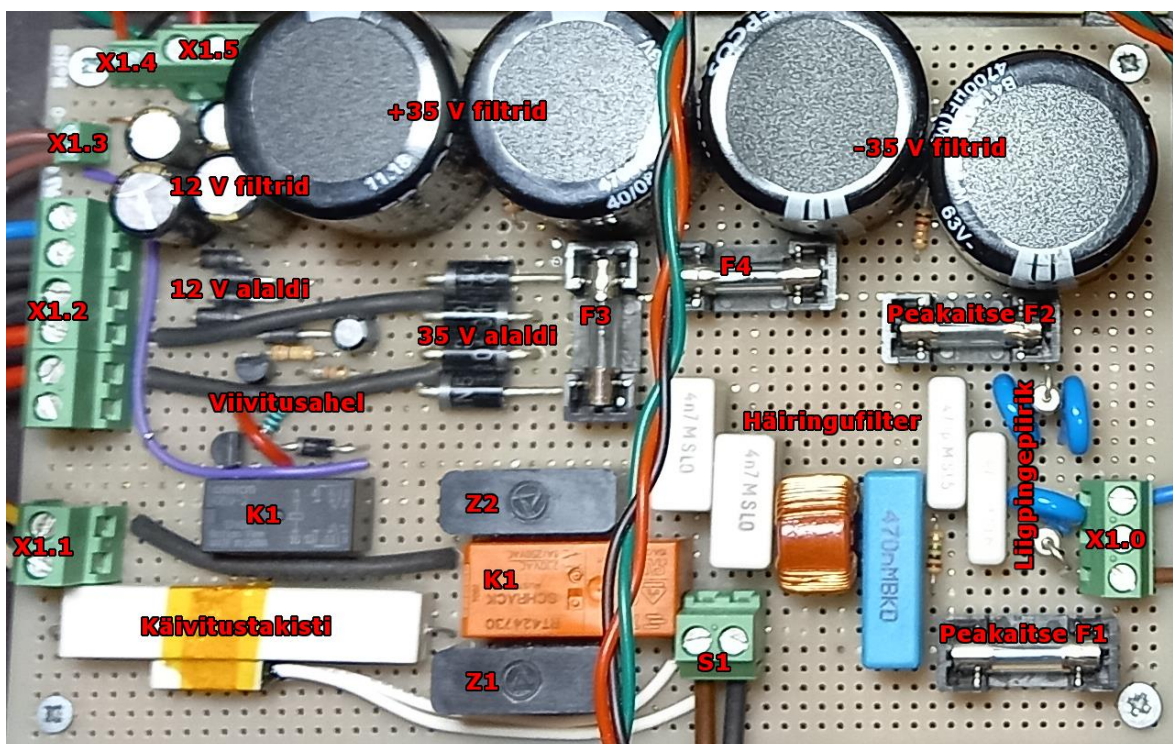


Joonis 2.18: väljalõige jooniselt „Toite sisendi elektriskeem“: toite sisendi mooduli sisetoite ja käivitussignaali väljund

käivitussignaali jõudmise aparaadi ülejäänud moodulitesse. Käivitussignaali kasutavad tööloana alalisvoolumuundur ja väljundite sisselülitusloana mõõteseadmete ja väljundite moodul. Trafo termostaadi lisamine käivitussignaali ahelasse võimaldab vabastada ülekuumenenud trafo koormusest. See on trafo koormuskaitseahel, mida kirjeldatakse täpsemalt kaitseahelate alampeatükis.

2.2.7 Toite sisendi kokkuvõte

Toite sisendi moodulil (Joonis 2.19) on lihtsate elektrotehniliste lahendustega teostatud vajalikud alammoodulid, selleks et lülitada aparaadi trafot vooluvõrku ja toita aparaadisisesid alalisvooluahelaid. Toite sisendi moodulil genereeritakse juhtsignaal, millega antakse teistele moodulitele tööloaba ja selle signaali abil on toite sisendi mooduli ja trafo termostaadi koosmõjus tekitatud trafo ülekoormuse kaitseahel. Moodul on ehitatud ühekihilisele perforreeritud makettplaadile. Toite sisendi moodulil on ka aparaadi peakaitssmed ning alalisvoolumuunduri kaitsmed.



Joonis 2.19: võrgu sisendi moodul. Tähtsamad alamosad on tähistatud

Võrgufiltri toimivus jätab paljuski soovida. Filtri häiringuid summutav mõju on võrreldes professionaalselt disainitud filtritega väike. Filtri mõju sümmeetrilistele ja asümmeetrilistele häiringutele on väga erinev ja filtri ülekandekarakteristikutes on selgelt näha resonantsitipud, mida saaks kondensaatoritele jadatakistuse lisamisega summutada. Filtri paremate filtreerivate omaduste saavutamiseks oleks vaja lisada

filtrisse ka sidestamata drosseleid, kuna ilma nendeta sõltub filtri mõju häiringutele suuresti elektrivõrgu ühenduse sisetakistusest ja häiringuallika sisetakistusest.

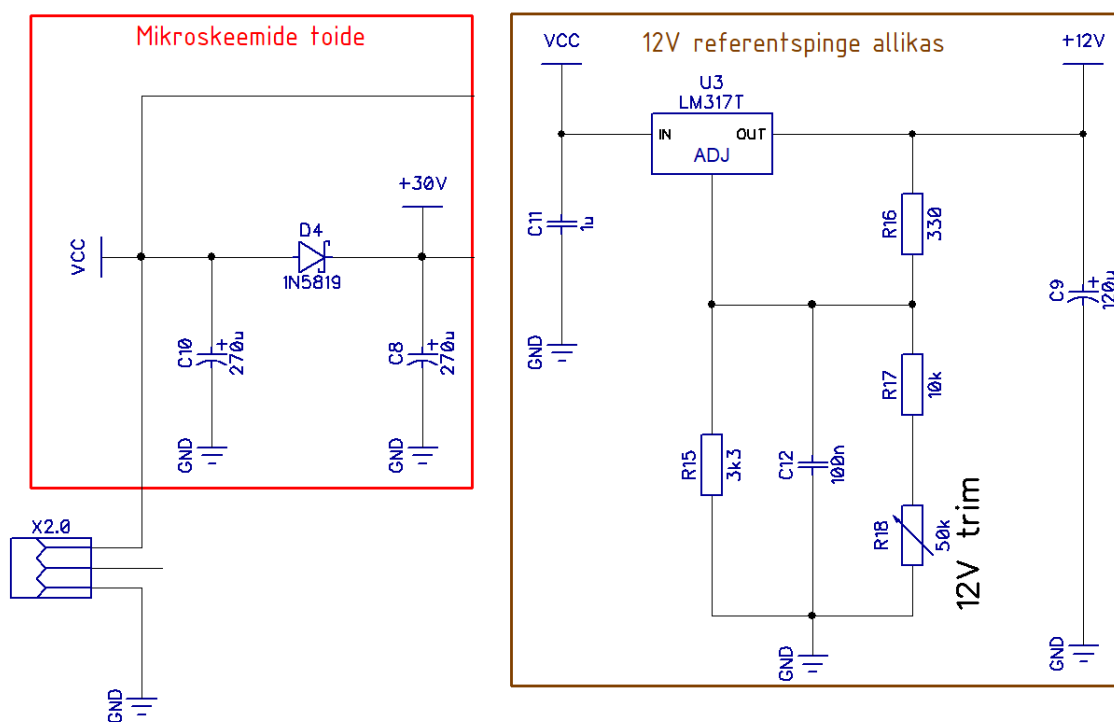
Võrgufilter oli üks esimesi alammooduleid, mis aparadi jaoks disainiti ja selle filtri disainimise ja ehitamise ajal ei olnud selge, millise sagedusspektriga on aparadi genereeritavad elektromagnetilised häiringud. Filtri komponentide valikul arvutati ainult seda, et võrgufilteri Y-kondensaatorite lekkevool kaitsemaandusjuhti ei ületaks 1 mA ja jälgiti, et sidestatud jadadrosseli nimivool oleks piisavalt suur aparadi koormusvoolu drosselist läbi juhtimiseks. Aparadile professionaalsel tasemel toimiva filtri disainimine on liigselt mahukas teema, et see käesolevasse bakalaureusetöösse mahuks.

2.3 Alalisvoolumuunduri moodul

Selles alampeatükis kirjeldatakse alalisvoolumuunduri moodulit, kasutades illustreerimiseks väljalõikeid alalisvoolumuunduri mooduli elektriskeemist töö graafilises osas. Parema ülevaatlikkuse huvides on soovituslik uurida selle peatükiga paralleelselt mooduli terviklikku elektriskeemi joonisel „Alalisvoolumuunduri elektriskeem“. Aparaaadi alalisvoolumuundur on klassikaline pinget langetava topoloogiaga impulss-toitemuundur (ingl *buck converter*). Muunduri ehitamisel on kasutatud kontrollarina spetsiaalset mikroskeemi ja lülitustransistorina väljatransistori.

2.3.1 Sisetoite kohalik muundamine

Integraalskeemide toite filtreerimiseks vajalikud komponendid on paigutatud alalisvoolumuunduri toite sisendi terminalploki lähedusse. Toide 35 V aladilt siseneb muunduri moodulisse terminalploki X2.0 kaudu (Joonis 2.20). Muunduri jõuahela lülitustest tulenevalt tarbib muundur alaldi kondensatoritel voolu ebaühtlaselt. Ebaühtlase voolutarbe silumiseks filtreeritakse muunduri toidet madala sisetakistusega elektrolüüt-kondensatoriga C10. Kondensator C10 on ka referentspinge allikale sisendi filterkondensatoriks. Selleks, et muunduri koormuse mõjul varieeruvat sisendpinget siluda muunduri integraalskeemide toitmiseks sobivaks, on integraalskeemide toitel veel teine kondensator C8. Et vältida võimalust, et jõuahel



Joonis 2.20: Väljalõige jooniselt "Alalisvoolumuunduri elektriskeem": referentspinge allikas ja toite filtreerimine muunduri moodulil

koormab ka kondensaatorit C8, on kondensaator eraldatud jõuahelast diodi D4 abil. Selline ühendus jätab kondensaatorile C8 ainsaks koormuseks muunduri mooduli integraalskeemide toitevoolu. See ühendus võimaldab ka selle, et muundurit juhtivatel integraalskeemid on toite väljalülitamise korral kondensaatori C8 laengu arvelt toitega varustatud kauem kui jõuahel, seega muunduri jõuahel on väljalülitumise ajal kindlasti juhitud kuni energia lõppemiseni +35 V alaldi kondensaatorites.

Referentspinge allikas paikneb toite filtrite juures. Pingeallikas põhineb seadistataval lineaarregulaatoril LM317 (Joonis 2.20, komponent U3). Lisaks elektrolüüt-kondensaatorile C8 on referentspingeallika toite sisendis kõrgsageduslike häiringute silumiseks keraamiline kondensaator C11.

Lineaarregulaatori U3 tagasisideahela moodustavad takistid R15 ja R16, ning tagasisideahelale on häiringukindluse tõstmiseks lisatud häiringufiltri keraamiline kondensaator C12. Takisti R17 ja potentsiomeeter R18 on paralleelühenduses tagasisideahela takistiga R15, ning võimaldavad selle takisti väärtust reguleerida ja seeläbi seadistada lineaarregulaatori väljundpinget. Tagasisidetakistite väärtused on valitud suhteliselt väikesed, selleks et koormata lineaarregulaatorit piisavalt, et võimaldada regulaatoril stabiilset ja tagasisideahelaga seadistatud väljundpinget hoida. Tühijooksu koormus läbi tagasisidetakistite on väljundpinge 12 V korral ligikaudu 3,3 mA. See koormus on regulaatori andmelehes [12] esitatud soovituslikust miinimumkoormusest 3.5 mA väiksem, kuid skeemi katsetuste käigus selgus, et kasutatava väljundpinge juures on tühijooksukoormus piisav, et hoida väljundpinget stabiilsena. Lineaarregulaatori väljundit silub madala sisetakistusega elektrolüüt-kondensaator C9.

Ainus koormus, mida referentspingeallikale avaldatakse on muunduri väljundparameetrite reguleernuppudena kasutatavad 50 k Ω potentsiomeetrid ja pingelangeti signaaliahel. See tähendab, et regulaatorile lisanduv täiendav koormusvool on palju väiksem kui tagasisideahela tühijooksuvool. Sellises olukorras on võimsuskadu lineaarregulaatoril niivõrd väike, et TO-220 korpuses lineaarregulaator ei soojene töö ajal märgatavalt, seetõttu on regulaator muunduri moodulis ilma jahutusradiaatorita.

eraldamist selleks, et vältida jõuahela häiringute kandmist signaaliahelasse. Kuna kirjeldatavas muunduris on kontrolleri kasutuses ainult muundurit juhtiva elemendina, siis kontrolleri jõuahelas suuri volusid ei esine ja mõlemad maaklemmid võib ühendada muunduri mooduli maaga ühe raja kaudu.

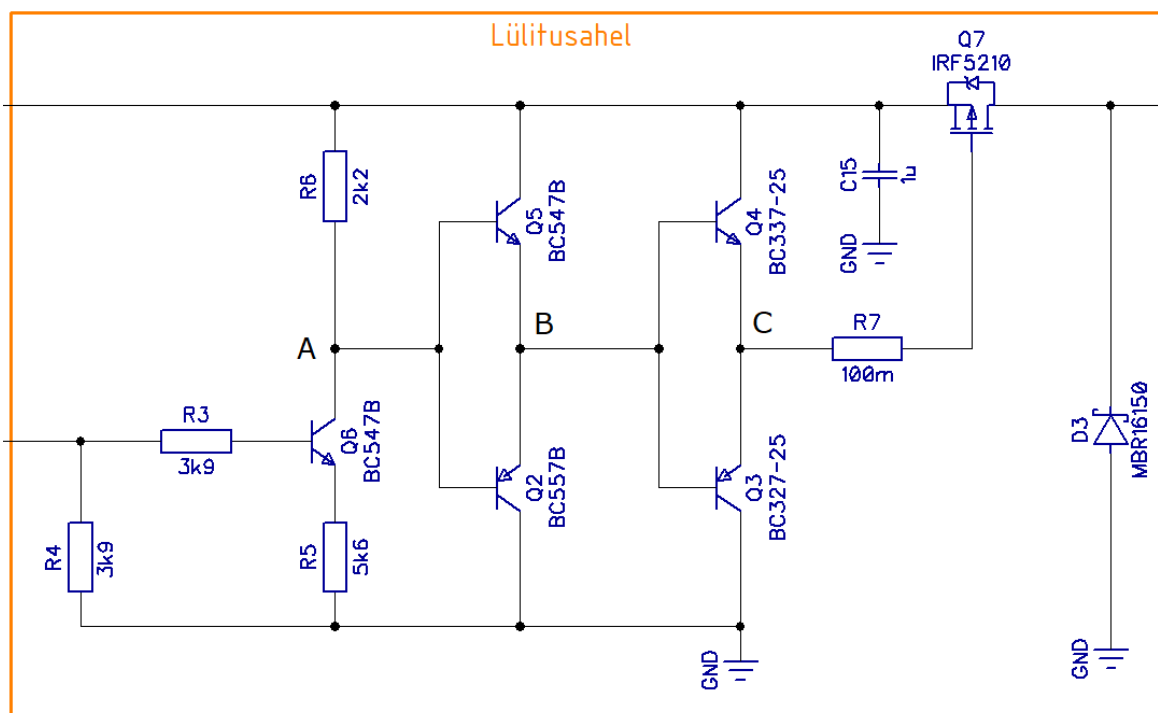
Takisti R2 ühendab toiteallika kontrolleri sisselülitusklemmidele. Kontrolleri sisselülitusklemm on inverteeriva loogikaga [13], seega toitepinge rakendamine sisselülitusklemmidele hoiab kontrolleri väljundi väljalülitatuna. Sisselülitusklemmi pinge saab madalaks tõmmata transistor Q1, mis vajab baasiahelas läbi takisti R15 voolu tekkimiseks ja juhtivasse olekusse minekuks sisselülitussignaali sisendi terminalplokist X2.0. Sisselülitussignaali genereerib toite sisendi mooduli viivitusahel. Kontrolleri saab sisse lülitada alles tööloa signaali saamisega.

Transistor Q1 ei ühenda kontrolleri sisselülitusklemmi otse skeemi maasse, vaid pingelangetusahela takistite kaudu. Normaalses tööolukorras ei ole pingelangetustakistitele mingit toidet ühendatud, seega punkt EN on madalal pingel ja transistor Q1 saab kontrolleri sisse lülitada. Esineb ka olukordi, kus punkti EN pinge võib tõusta muunduri väljundpingeni. Sellises olukorras transistor Q1 ei saa kontrolleri sisselülitusklemmi pinget madalana hoida ja kontrolleri väljund lülitub välja. Transistori baasiahelat tüüritakse signaaliga, mille maksimaalne pinge on 12 V, kuid punkti EN pinge võib tõusta kuni 24 V-ni, hüpoteetiliselt isegi 35 V-ni. Seetõttu on vaja kaitsta transistori Q1 baas-emitter siiret vastassuunalise üle 6 V [14] pinge rakendamisel tekkiva läbilöögi eest, mis igal esinemisel degradeerib transistori. Baas-emitter siirdega parallelselt on ühendatud diodid D8, mis piirab kirjeldatud olukordades maksimaalse vastupinge Schottky diodi päripingele 0,4 V ja kaitseb transistori baas-emitter siiret läbilöögi eest.

Lülitustransistori draivervõimendi on ühendatud muunduri kontrolleri väljundklemmiga. Draivervõimendi (Joonis 2.22) koosneb transistoridest Q2 ... Q6, ja takistitest R3 ... R7.

Kuna muunduri kontrolleri ei tõmba oma väljundklemmi väljalülitumise korral maasse, vaid jätab selle suure takistusega olekusse hõljuma, peab olema kontrolleri väljundklemmil allatõmbetakisti R4. Allatõmbetakisti tõmbab kontrolleri väljalülitatud väljundi maasse, võimaldades lülitustransistori paisu draiveril lülitustransistori välja lülitada.

Võimendi esimene aste modifitseerib kontrolleri antava signaali pingest: kontrolleri väljund on impulsilaiusmodulatsiooni ristküliksignaal vahemikus 0 V kuni 35 V, kuid jõutransistori paisu pinge tohib olla lätte, ehk toite suhtes minimaalselt -20 V [15], ehk skeemi maa suhtes minimaalselt 15 V. Arvestades maksimaalset koormusvoolu 3 A, ei ole lülitustransistori piisavaks sisselülituseks vaja paisu lättest rohkem kui 8 V



Joonis 2.22: Väljalõige jooniselt "Alalisvoolumuunduri elektriskeem": Lülitustransistori paisu draiver ja jõuahela lülituskomponendid

maa poole tüürida. Seetõttu on draiveri esimeses astmes takistitest R6 ja R5 koosnev ning transistoriga Q6 tüüritav pingejagur. Saades kontrolleri kõrge signaali, lülitub transistor Q6 sisse ja tõmbab punkti A (Joonis 2.22) toitepingest maksimaalselt 10 V maa poole, ehk minimaalsele pingetasemele 25 V maa suhtes. Kontrolleri kõrge signaali lõppedes kerkib punkti A pinge uuesti toitepingeni.

Draivervõimendi teine ja kolmas aste on topoloogialt ühesugused, kuid teises astmes on kasutatud transistore BC547 ja BC557 kollektori nimivooluga 100 mA [14][16] ning kolmandas astmes on kasutatud transistore BC337-25 ning BC327-25 kollektori nimivooluga 800 mA [17][18].

Võimendi teise astme väljundpinge (punktis B) järgib sisendpinget (punktis A), jäädes selle maksimumväärtusest ühe baas-emitter siirde pingelangu võrra allapoole ja miinimumväärtusest ülespoole. Niimoodi on punkti B pingetasemed sisselülitatud olekus 25.7 V ja väljalülitatud olekus 34.3 V maa suhtes.

Võimendi kolmanda astme väljundpinge (punktis C) järgib sisendpinget (punktis B), jäädes selle maksimumväärtusest ühe baas-emitter siirde pingelangu võrra allapoole ja miinimumväärtusest ülespoole. Niimoodi on punkti C pingetasemed sisselülitatud olekus 26.4 V ja väljalülitatud olekus 33.6 V maa suhtes. Jõuahela lülitustransistori pais on ühendatud punktiga C läbi takisti R7. Takisti R7 on vajalik selleks, et summutada väljatransistori sisemiste parasiitsete mahtuvuste ja induktiivsuste omavõnkumist ja vältida väljatransistori omavõnkumisest tingitud iseeneslikku sisselülitumist.

Draiveri väljundpinge tasemete korral kujuneb väljatransistori paisu pingeks lätte suhtes väljalülitatud olekus -1.4 V ja sisselülitatud olekus -8.6 V. Väljalülitumisega probleeme ei teki, kuna kasutatud on väljatransistori, mille paisu lävepinge on -2 V kuni -4 V. Sisselülitatud olekus on paisu pinge laetud selle tasemeni, mida koormusvoolu juhtimiseks tarvis ja mitte rohkem. Niimoodi on energiavajadus väljatransistori paisu mahtuvuse ümberlaadimisele iga lülituse korral minimaalne ja väljatransistori lülitused on nii kiired kui sellise draiveriga võimalik.

Katseliselt on selgunud, et väljatransistori sisselülitusaeg on 100 ns ja väljalülitusaeg 150 ns. Arvestades, et reaalne lülitussagedus on 55 kHz ja seetõttu lülitusperiood ligikaudu 20 μ s moodustab sisse- ja väljalülitumise aeg 250 ns lülitusperioodist ligikaudu 1.4 %. Autori hinnangul on selline lülitusaja suhe lülitusperioodi piisavalt väike, et hoida muunduri lülituskadod piisavalt madalad, et muunduri jõuahela lülituskomponendid ei vaja aktiivjahutust.

2.3.3 Muunduri jõuahel

Lülituskomponendid muunduri jõuahelas on väljatransistor IRF5210 (Joonis 2.22, komponent Q7) ja diod MBR16150 (komponent D3). Väljatransistoriga juhitakse energia voolu muunduri väljundfiltrisse ja diod võimaldab väljundfiltri drosseli voolul vabalt joosta perioodidel, millal väljatransistor on välja lülitatud. Väljatransistori maksimaalne lätte-neelu pinge on 100 V ja teoreetiline maksimaalne lubatav voolutugevus lätte ja neelu vahel 40 A [15]. Transistori sisetakistus on 60 m Ω . Transistori vahetus läheduses on transistori lätte ja skeemi maapunkti vahele ühendatud keraamiline kondensaator C15. Kondensaator on seal selleks, et siluda mooduli ühendusjuhtmete ja trükiradade induktiivsuse tekitatavaid häiringuid väljatransistori lättel ning kaitsta väljatransistori siirdepingete eest. Vabajooksudiod on Schottky diod. Diodi maksimaalne vastupinge on 150 V ja pärisuunaline vool 16 A [19]. Diodi iseloomulik päripinge on 0,15 V kuni 0,4 V sõltuvalt temperatuurist ja koormusvoolu 3 A korral on pingelang vastavalt 0,4 V kuni 0,55 V. Päripinge

alumised väärtused on temperatuuri 125 °C korral ning kõrged väärtused 25 °C korral.

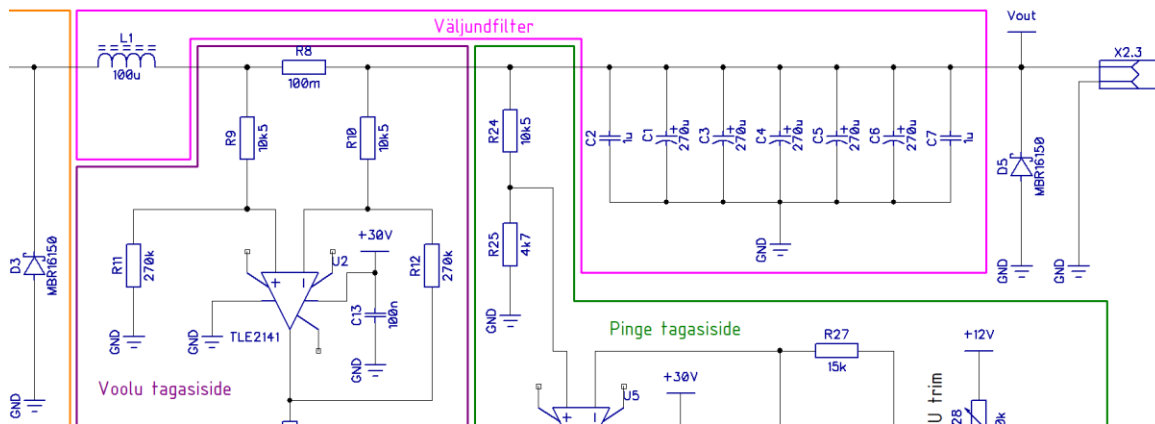
Väljundfilter koosneb 100 uH induktiivsusega drosselist L1 (Joonis 2.23) ja väljundkondensaatoritest C1 ... C7. Lülitustransistori moduleeritav vool kulgeb läbi drosseli ja voolumõõtetakisti R8 väljundkondensaatoritesse ja laeb neid. Drossel silub kondensaatoreid laadivat voolu ning kondensaatorid siluvad väljundpinget. Väljundkondensaatorite kogumahtuvus on 1352 µF, sellest 1350 µF moodustub madala sisetakistusega elektrolüüt-kondensaatoritest ning 2 µF kõrgsageduslike häiringute silumiseks kasutatavatest keraamilistest kondensaatoritest.

Olukorras, kus laetud kondensaatoritega muundur lülitatakse tugevalt induktiivset koormust toitma, võib tekkida resonants koormuse induktiivsuse ja väljundkondensaatorite mahtuvuse vahel. Suure hüveteguriga võnkeringi tekkimise korral hakkab väljundkondensaatorites leidunud energia võnkuma edasi-tagasi väljundkondensaatorite pinge ja induktiivse koormuse voolu vahel. Selline võnkumine ei teki kunagi püsivalt, kuna tagasisideahelate kujundamise käigus on sellise võnkumise tekkimise võimalusega arvestatud ja tagasisideahelad disainitud seda võnkumist mitte võimendama. Paraku on selline võnkumine ohtlik, kuna väljundkondensaatorid on polaarsed elektrolüüt-kondensaatorid, mis ei kannata vastupolaarse pinge rakendamist. Väljundis võnkeringi käivitumisel hakkab induktiivne koormus kondensaatorpatareid vaheldumisi pärisuunas ja vastassuunas laadima. Kondensaatorpatarei kaitseks vastandpolaarse laadimise eest on väljundterminalploki X2.3 vahetus läheduses diod D5. Diod D5 juhib induktiivse koormuse vabajooksuvoolu kondensaatoritest mööda, vältides kondensaatorite vastassuunalise laadimise ja hajutades induktiivpooli ja kondensaatori vahel võnkuvat energiat soojusena.

2.3.4 Tagasisideahelad

Voolu tagasisideahel algab voolumõõtešundist R8 (Joonis 2.23). Voolumõõtešundina kasutatakse 5 W nimivõimsusega takistit, kuna sellel takistil võib koormusvoolu mõjul tekkida arvestatav võimsuskadu. Voolumõõtešunt on paigutatud väljundfiltri drosseli ja kondensaatorite vahele. Seetõttu voolu tagasisideahel ei jälgi otseselt väljundvoolu, vaid jälgib väljundkondensaatorite laadimisvoolu. Selline paigutus on vajalik selleks, et voolu tagasisideahel ei jälgiks väljundis tekkida võivaid võnkumisi, ega võimaldaks muunduril neid võnkumisi võimendada, vaid voolu tagasisideahel jälgiks ainult väljundi poole liikuva energia hulka. Kui voolu tagasisideahel jälgiks otseselt väljundvoolu, siis väljundfiltri juures kirjeldatud induktiivse koormuse võnkeringi esinemise korral ei piiraks voolu tagasisideahel vajalikel hetkedel energia võnkeringi juurde lisamist ning

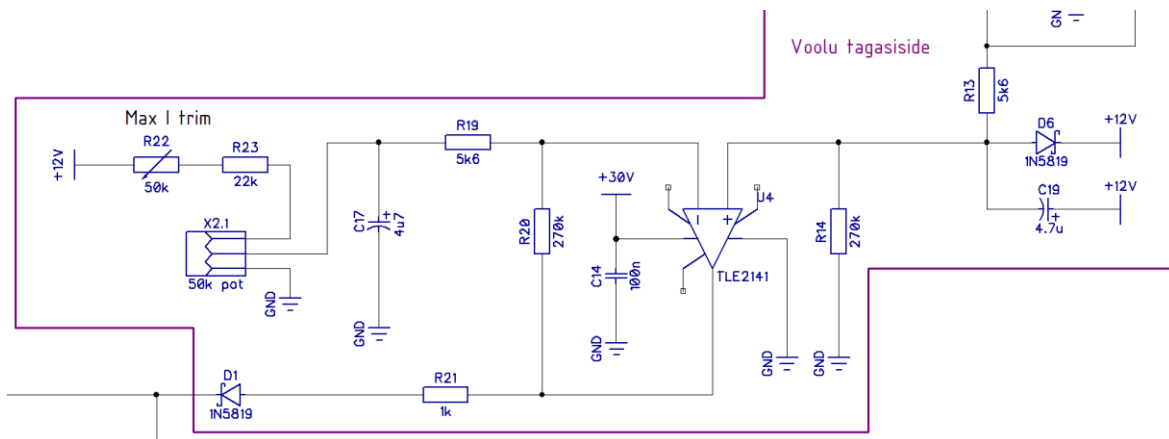
võimaldaks niimoodi pinge tagasisideahelal minna võnkeringiga resonantsi ja sundida muundurit võnkeringi võnkumist ülal hoidma.



Joonis 2.23: väljalõige jooniselt "Alalisvoolumuunduri elektriskeem": alalisvoolumuunduri väljundfilter

Koormusvoolu mõjul takistil tekkivat pingelangu jälgib voolu tagasisideahela esimene aste: diferentsiaalvõimendi topoloogiaga ühendatud operatsioonvõimendi U2. Selle võimendi seavad diferentsiaalvõimendiks takistipaarid R9 ja R11 ning R10 ja R12. Takistipaaride väärtused on valitud nii, et operatsioonvõimendi lahutab voolumõõtesundi skeemil parempoolsel klemmil mõõdetud pingest maha šundi vasakpoolse klemmi pinget, leides šundi pingelangu, võimendab leitud pingelangu ligikaudu 26-kordselt. Operatsioonvõimendi U2 väljundile ilmub šundi pingelang võimendatud kujul.

Voolu tagasisideahela teist astet kujutab Joonis 2.24. Voolu tagasisideahela teises astmes on diferentsiaalvõimendiks ühendatud operatsioonvõimendi U4. Operatsioon-



Joonis 2.24: Väljalõige jooniselt "Alalisvoolumuunduri elektriskeem": Voolu tagasisideahela teine aste

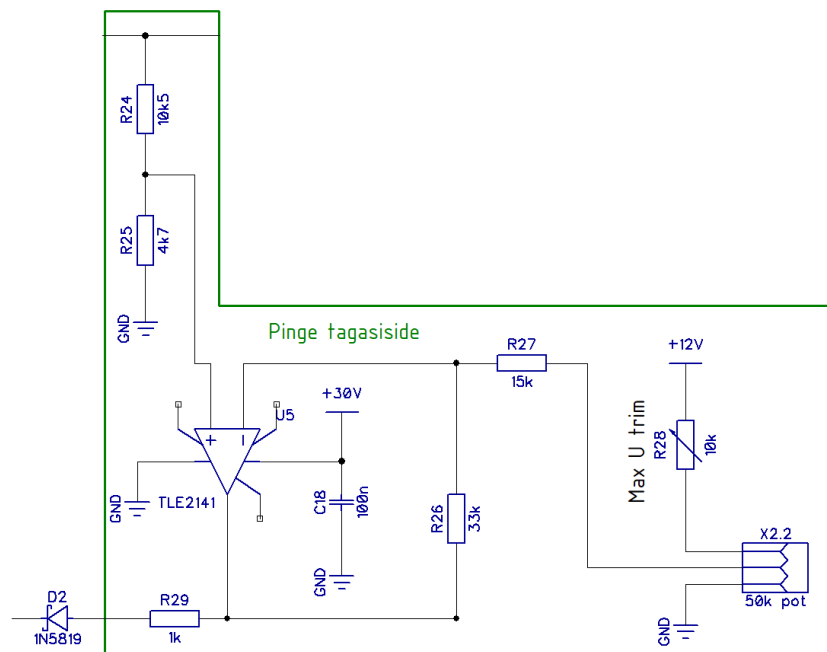
võimendi seadistavad diferentsiaalvõimendiks takistipaarid R19 ja R20, ning R13 ja R14. Läbi takisti R13 siseneb voolu tagasisideahela teise astmesse esimesest astmest võimendatud šundi pingelangu signaal. See signaal silutakse kondensaatoris C19. Kondensaator on ühendatud signaaliahelast 12 V referentspingeallikale, selleks et muunduri sisselülitamise korral kergitada voolu tagasiside signaal kuni kondensaatori laadumiseni kõrgele ja muuta nii muunduri käivitumine sujuvaks. Silutud signaali pinget piiratakse 12,4 V-ni diodiga D6, selleks et kiirendada tagasisideahela reaktsiooni siirdel suurelt väljundvoolult väikesele ja selleks, et kaitsta polaarseid kondensaatorit C19 võimaliku vastupolaarse laadimise eest.

Takisti R19 kaudu on voolu tagasisideahela teise astme diferentsiaalvõimendi ühendatud aparadi esipaneelil paikneva voolupiiriku reguleerimise nupu potentsiomeetri väljundiga. Nupu potentsiomeeter on ühendatud terminalploki X2.1 külge. Nupu potentsiomeeter on skeemis pingejagur. Seda toidetakse 12 V referentspingeallikast läbi seadistusrakisti R23 ja seadistuspotentsiomeetri R22, mille väärtustega on seatud muunduri maksimaalse väljundvoolu seadistusvahemik ja täpne seadepunkt. Nupuga varieeritav reguleerimispinge silutakse kondensaatori C17 abil.

Operatsioonvõimendi U4 lahutab silutud voolutugevuse signalist varieeritava reguleerimisväärtuse ja võimendab saadud väärtust ligikaudu 48-kordselt. Operatsioonvõimendi U4 väljundpinge on voolu tagasiside väärtus ja see on ühendatud läbi takisti R21 ja segistidiodi D1 muunduri kontrolleri tagasiside klemmile. Diod D1 on vajalik selleks, et eraldada voolu tagasisideahela väljund kontrolleri tagasiside klemmist juhul kui voolu tagasisideahela signaali pinge on väiksem kui pinge tagasisideahela signaali pinge.

Pinge tagasisideahel Algab pingejagurist, mille moodustavad takistid R25 ja R24 (Joonis 2.25). Pingejagur on ühendatud väljundpinge ja mooduli maapunkti vahele. Pingejaguri väljundit võimendab operatsioonvõimendi U5. Läbi takisti R27 on operatsioonvõimendi sisendile ühendatud väljundpinge reguleernupu potentsiomeetriga varieeritav signaal. Esipaneelil paikneva väljundpinge reguleernupu potentsiomeeter on ühendatud terminalploki X2.2 külge. Reguleernupu potentsiomeeter saab toite 12 V referentspingeallikalt läbi seadistuspotentsiomeetri R28. Seadistuspotentsiomeetriga saab määrata, milline on muunduri maksimaalse väljundpinge seadepunkt.

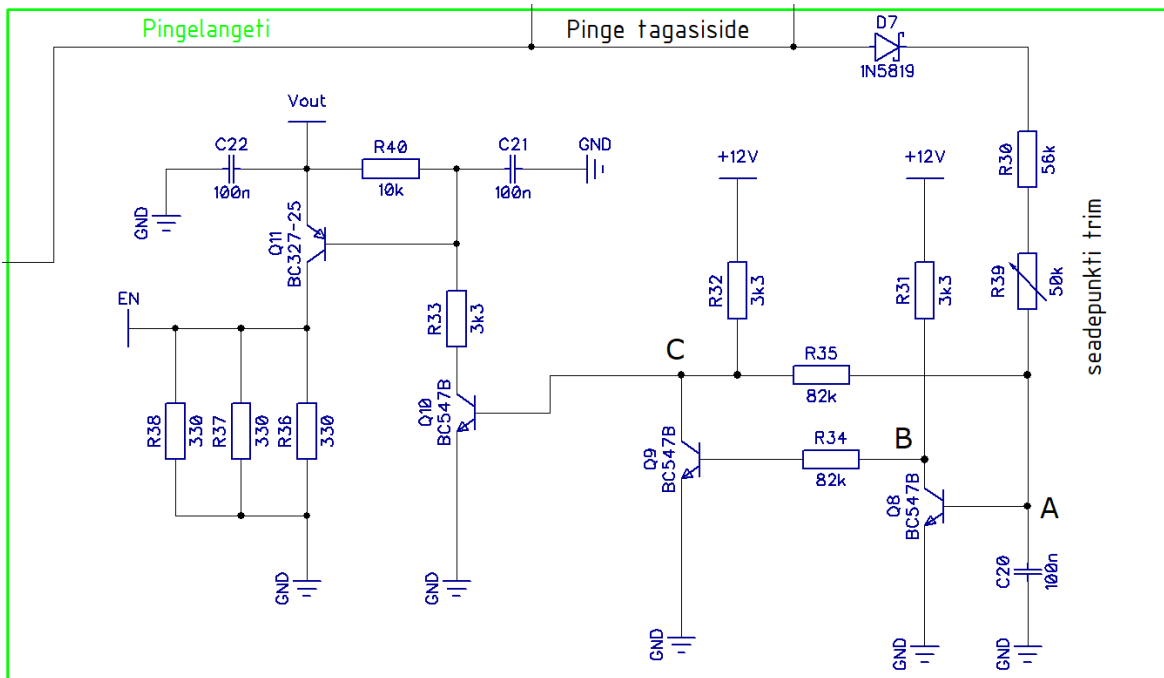
Operatsioonvõimendi U5 lahutab väljundpinge signaalist nupuga varieeritava seadistuspinge signaali ja võimendab saadud väärtust suurusjärgus 2 kuni 3 korda. Operatsioonvõimendi U5 väljund on ühendatud läbi takisti R29 ja segistidiodi D2 muunduri kontrolleri tagasisideklemmiga. Diod D2 on vajalik pinge tagasisideahela väljundi eraldamiseks muunduri kontrolleri tagasisideklemmist juhul kui pinge tagasisideahela väljundpinge on väiksem kui voolu tagasisideahela oma.



Joonis 2.25: väljalõige jooniselt "Alalisvoolumuunduri elektriskeem":
pinge tagasisideahel

Pingelangetit on muundurile vaja selleks, et muunduri väljundpinget oleks võimalik kiiresti madalamaks reguleerida ka juhul kui muunduri väljundile ei ole koormust ühendatud. Pinge tagasisideahela pingejagur koormab muunduri väljundit nii vähe, et väljundkondensaatorite tühjenemiseks kulub mitukümmend sekundit. See tähendab, et ilma koormuseta kuluks pinge väiksemaks reguleerimisele kasutumugavuse seisukohast liiga kaua aega. Pinge langetusahel koormab pinge väiksemaks reguleerimise korral lühiajaliselt muunduri väljundit selleks, et pinge langeks kiiremini.

Pingelangetit kujutab Joonis 2.26. Pingelangetusahela juhtiv element on hüsteresiga lülitusahel (*Schmitt trigger*), mis koosneb diodist D7, takistitest R30 ... R32 ja R34 ... R35, kondensaatorist C20 ning transistoridest Q8 ja Q9. Pingelangetustakistite lülitusahel koosneb võimendustransistorist Q10, takistitest R33 ja R40,



Joonis 2.26: väljalõige jooniselt "Alalisvoolumuunduri elektriskeem": pingelangeti

pingelangetustakistitest R36 ... R38 nimivõimsusega 2 W, kondensaatoritest C21 ja C22 ning lülitustransistorist Q11.

Hüsteresiga lülitusahela sisend jälgib pinge tagasisideahela väljundpinget läbi takisti R30 ja seadistuspotentsiomeetri R39. Lülitusahela sisendit silub häiringukindluse huvides kondensaator C20. Kondensaator C20 väldib hüsteresilüliti rakendumist lühiajaliste häiringuimpulsside tõttu. Normaalolekus on hüsteresilüliti punktides A ja C pinge madal ja punktis B kõrge, sest transistori Q8 baasiahelas ei kulge piisavalt voolu transistori kollektoriahelas märgatava voolu võimaldamiseks ja punkti B pinge madalaks tõmbamiseks. Seetõttu on transistor Q9 sisse lülitatud, kuna punktist B

kulgeb vool läbi takisti R34 transistori Q9 baasiahelasse. Transistor Q9 hoiab sisselülitatud olekus punkti C pinget madalal.

Kui pinget tagasisideahela väljundpinge kerkib nominaalselt 1,5 V tasemelt ligikaudu 2,2 V tasemele, lülitub transistor Q8 piisavalt tugevalt juhtivasse olekusse, et langetada pinget punktis B. See vähendab voolu läbi takisti R34 ja transistori Q9 baasi maasse. Väheneva baasivoolu tõttu väheneb transistori Q9 kollektoriahela vool ja pinget punktis C kerkib. Pinget kerkimine punktis C võimaldab takistil R35 juhtida voolu punktist C punkti A ja niimoodi tugevdada positiivse tagasisidega hüstereesilüliti sisendsignaali. Positiivse tagasiside tõttu toimub ümberlülitumine järsult ja jääb püsima stabiilselt. Positiivne tagasiside langetab ka hüstereesilüliti ümberlülitumispunkti nii, et ümberlülitumine toimub sisendpinge 1,7 V juures. Ümberlülitumise lõpptulemus on see, et transistor Q8 on sisse lülitatud ja hoiab punkti B pinget madalal. Ilma baasivooluta transistor Q9 ei saa juhtida punktist C voolu maasse ja seetõttu kerkib punkti C pinget.

Kuna pingelangetustakistite lülitusahela võimendustransistori Q10 baas on ühendatud punkti C, hakkab transistori Q10 baasiahelas hüstereesilüliti rakendumise peale kulgema vool. Transistor Q10 juhib oma kollektoriahelas läbi takisti R33 transistori Q11 baasivoolu ja lülitab transistori Q11 juhtivasse olekusse. Baasivoolu saavutanud transistor Q11 ühendab oma kollektoriahelas paikevad pingelangetustakistid muunduri väljundiga ja takistid hakkavad väljundit koormama ning väljundi pinget langetama. Ümberlülitusega kerkib punkti EN pinget peaaegu muunduri hetkelise väljundpingeni ja nagu kirjeldatud kontrolleri kirjetavas punktis, lülitab see olukord kontrolleri väljundi välja. Väljalülitust on vaja, et vältida olukorda, kus pingelangetusahel on rakendunud, kuid muundur jätkab mingil põhjusel tööd, kuumutades asjatult pingelangetustakisteid.

Kui väljundpinget langeb piisavalt, et pinget tagasisideahela väljundpinget langeb hüstereesilüliti langenu seadepunktini 1,7 V, jääb transistoril Q8 baasivoolu väheks, et hoida punkti B pinget madalana. Pinget kerkimine punktis B hakkab voolu juhtima läbi takisti R34 transistori Q9 baasile. Baasivoolu tekkimisega hakkab transistor Q9 juhtima voolu punktist C maasse ja punkti C pinget vähendama. See vähendab läbi takisti R35 ka punkti A pinget, kiirendades toimuvat ümberlülitust positiivse tagasisidega. Tagasi algolekusse lülitumisega kerkib hüstereesilüliti ümberlülitumispunkt uuesti ligikaudu 2,2 V-ni, transistor Q10 katkestab transistori Q11 baasivoolu ja transistor Q11 lahutab koormustakistid muunduri väljundist. Punkti EN pinget langeb läbi koormustakistite maapunktilähedasele tasemele ja muunduri kontrolleri saab jälle tööloa.

2.3.5 Võimsuskaod muunduri jõuahelas

Muunduri disainil on oluline arvestada komponentidel tekkiva kaovõimsusega ja selle järgi hinnata komponentide jahutusvajadust. Näiteks komponendikorpuse TO-220 maksimaalseks vabas 25 °C õhus hajuvaks soojusvõimsuseks, mille juures korpuse sees elektroonikakomponent veel üle 150 °C ei kuumene, loetakse 0.5 W kuni 0.7 W. Siiski ei ole elektroonikakomponentidele kasulik kui need kasutuses pidevalt maksimaalse lubatava temperatuurini kuumenevad. Siin punktis on hinnatud muunduri jõuahela komponentidel soojusena hajuvaid kaovõimsusi ja kirjeldatud muunduri disainil tehtud soojustehnilise disaini valikuid.

Jõutransistori juhtivus- ja lülituskaod jõutransistoril avalduvad kahte liiki kaod. Lülituskaod on tingitud sellest, et transistori ümberlülitusteks kulub aega lülitumisaja jooksul läbib transistori vool, samal ajal kui transistori lätte ja neelu vahel on ka pinge. Transistori juhtivuskaod tulenevad sellest, et transistoril on võrreldes juhtmete ja trükiradadega suurem sisetakistus ja sellel tekib märgatav pingelang ja soojuskadu.

Transistori juhtivuskaod avalduvad transistori juhtivusaegse päripinge ja koormusvoolu korrutisena. Transistoril on juhtivuse ajal päripinge, mis esineb transistori sisetakise tõttu. Kasutatava jõutransistori sisetakistus on 60 mΩ [15] ja maksimaalne koormusvool muunduris on 3 A, seega transistori päripinge juhtivuse ajal on 0,18 V ja maksimaalne juhtivuskadu **0,54 W**. Juhtivuskao tegelik väärtus maksimumkoormusel sõltub impulssmodulatsiooni täitetegurist, mis on määratud väljundpingega.

Transistori lülituskadusid maksimumkoormusel 3 A sisselülitumise ajal saab lihtsustatult arvutada sellise mudeli alusel, et transistori sisselülitumisaja jooksul väheneb transistori päripinge lineaarse muutusena toitepingelt 35 V transistori juhtivusperioodi päripingeni 0,18 V ja samal ajal kerkib transistori läbiv vool tasemelt 0 A muunduri väljundfiltri drosseli koormusvooluni 3 A. Lineaarselt muutuvate pinge ja voolu ruutkeskmiste väärtuste korrutis on transistori lülituskao keskmine võimsus lülitusperioodi jooksul. Kuna voolu ja pinge siirded on väljalülitumisel täpselt samade väärtuste vahel, aga teistpidised, on väljalülituse jooksul pinge ja voolu ruutkeskmised väärtused samad kui sisselülitumise ajal ja seetõttu transistori lülitusperioodi võib käsitleda ühe tervikuna, arvestades keskmist kaovõimsust terve lülitusperioodi peale.

Voolu ruutkeskmine väärtus lülitusperioodi jooksul on 1,73 A. Pinge ruutkeskmine väärtus lülitusperioodi jooksul on 20,21 V. Lülituskao võimsuse leidmiseks tuleb lülituse siirde aegne keskmine kaovõimsus korrutada ühe lülitusperioodi jooksul lülituse siireteks kuluva aja ja terve lülitusperioodi suhtega (arvutatud valemis 2.19).

$$P_{\text{lülitus}} = 1,73 \text{ A} \cdot 20,21 \text{ A} \cdot \frac{250 \text{ ns}}{19,3 \mu\text{s}} = 34,96 \text{ W} \cdot 0,00130 = \mathbf{0,45 \text{ W}} \quad (2.19)$$

$P_{\text{lülitus}}$ – lülituskadu jõutransistoril

Lülituskadod esinevad muunduri täiskoormusel töö jooksul alati, välja arvatud juhul kui transistor on pidevalt sisse lülitatud, see olukord esineb juhul kui muunduri väljundpinge on võrdne sisendpingega. Kuna lülitustransistori kaod on liiga suured, et TO-220 kere transistori vabas õhus lubatud temperatuurivahemikus jahutada saaks, on transistor monteeritud radiaatorile.

Vabajooksudiodi võimsuskadu avaldub dioodi päripingelang ja dioodi läbiva voolu korrutisena. Diodi päripingelang temperatuuril 80 °C ja koormusvoolul 3 A on andmelehe [19] andmetele toetaval autori hinnangul 0,45 V. Sellise päripinge korral on dioodi maksimaalne kaovõimsus 1,35 W (valem 2.20). Suur maksimaalne kaovõimsus dioodil on põhjus, miks on kasutatud TO-220 keres dioodi: muunduri jõuahela vabajooksudiodid on monteeritud radiaatorile.

$$P_{\text{diod}} = 3 \text{ A} \cdot 0,45 \text{ V} = \mathbf{1,35 \text{ W}} \quad (2.20)$$

P_{diod} – Muunduri väljundfiltri vabajooksudiodi maksimaalne soojuskadu

Seoses dioodi päripinge negatiivse temperatuurikoefitsendiga tuleb silmas pidada, et mida kõrgem on dioodi temperatuur, seda väiksem on kaovõimsus.

Arvutatud kaovõimsus avalduks dioodil siis, kui diood juhiks terve lülitusperioodi jooksul. Sellist olukorda realselt tekkida ei saa, kuid kirjeldatule lähim situatsioon, mis on võimalik, esineb olukorras, kus muunduri väljund on lühistatud. Sellisel juhul on impulsilaiusmodulatsiooni täitetegur väga madal, kuna muunduri voolupiirik on aktiivne ja väljundpinge lühisel praktiliselt 0 V. Madala täiteteguri korral juhib diood valdava enamuse lülitusperioodi ajast ja selle võimsuskadu läheneb arvutatud 1,35 W-le.

Voolumõõtetakisti võimsuskadu koormusel 3 A on koormusvoolu ruudu ja šundi takistuse korrutis. Võimsuskadu on arvatud valemis 2.21. Kuna võimsuskadu takistil on peaaegu 1 W, on kasutatud suure nimivõimsusega takistit (5 W).

$$P_{\text{šunt}} = (3 \text{ A})^2 \cdot 0,1 \Omega = 0,9 \text{ W} \quad (2.21)$$

$P_{\text{šunt}}$ – Maksimaalne soojuskadu voolumõõtetakistil

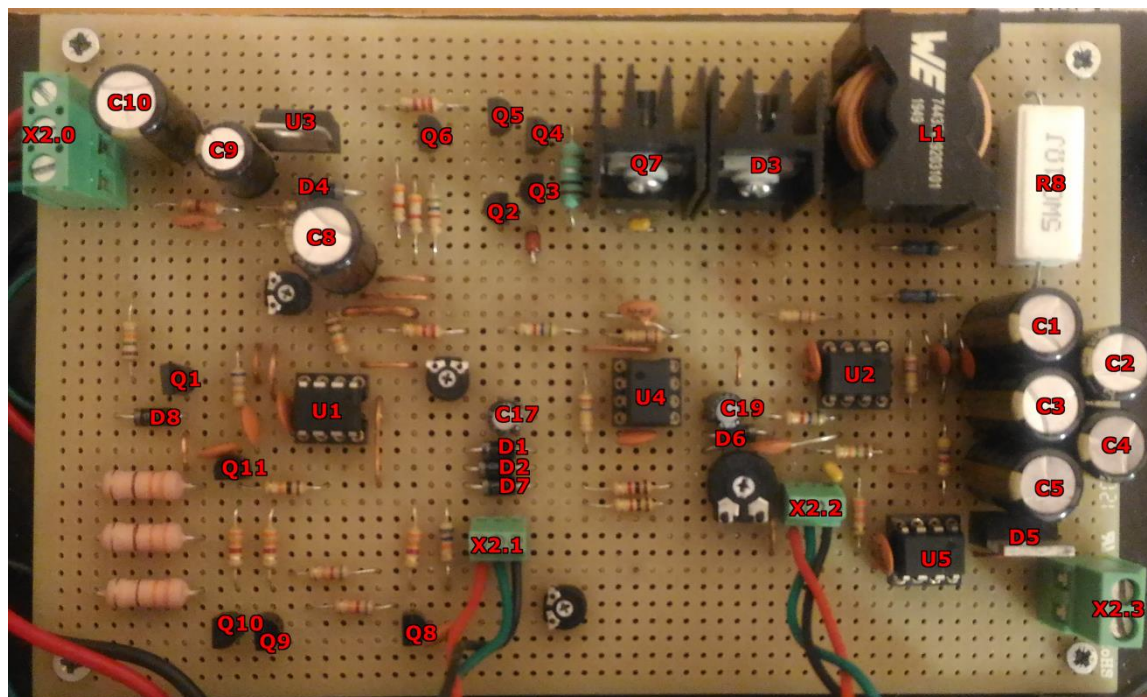
Drosseli võimsuskadu koormusel 3 A on võrdne drosseli jadatakistusel hajuva võimsusega. Drosseli südamikude kadude analüütiline hindamine ei ole võimalik, sest ei ole teada drosseli südamiku täpne materjal. Drosseli jadatakistus on 36 mΩ [20]. Jadatakistusel hajub 3 A koormusvoolu korral 0,33 W (valem 2.22). Drossel on piisavalt massiivne, et oma soojuskadu ümbritsevale õhule üle anda ilma olulise temperatuuri kasvuta.

$$P_{\text{drossel}} = (3 \text{ A})^2 \cdot 36 \text{ m}\Omega = 0,33 \text{ W} \quad (2.22)$$

P_{drossel} – Maksimaalne soojuskadu induktiivpooli sisetakistusel

2.3.6 Alalisvoolumuunduri mooduli kokkuvõte

Aparaadi alalisvoolumuundur (Joonis 2.27) on ehitatud perforeeritud makettplaadile. Muundur töötab aparadi toite sisendi mooduli 35 V alaldi toitel ning muunduri väljundpinge on reguleeritav vahemikus 1.5 V kuni 24 V. Muunduri väljundpinge



Joonis 2.27: Alalisvoolumuunduri moodul

reguleerimine on kasutajale piisavalt kiire, sõltumata koormusest - see tähendab, et muunduri väljundpinge reguleerub ka ilma koormuseta piisavalt kiiresti, et järgida reguleernupu pööramist. Muunduril on voolupiirik, mida on võimalik juhtnupuga reguleerida vahemikus 0 A kuni 3 A. Voolupiirik muudab muunduri võimeliseks tootma ka induktiivseid koormusi, säilitades väljundparameetrite stabiilsust. Voolupiirik muudab muunduri lühisekindlaks, seetõttu ei vaja muunduri väljund eraldi lühisekaitset.

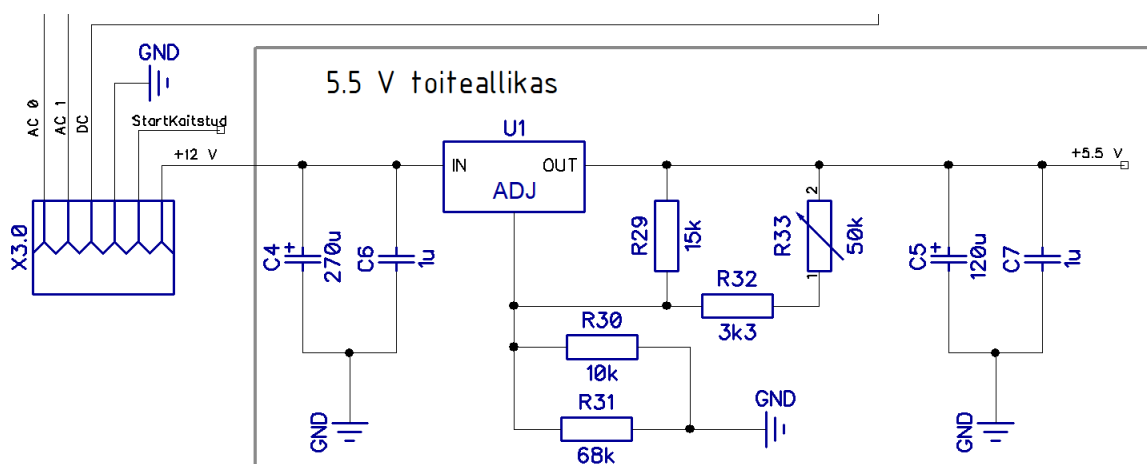
Alalisvoolumuunduri tagasisideahelate kujundamisel ei tehtud analüüsi tagasisideahela ülekandekarakteristikute kohta, ega uuritud karakteristikute stabiilsuskriteeriumidele vastavust. Muunduri tagasisideahelatesse lisati peale valmishitamist mõningaid kompenseerimiskomponente, mida elektriskeemil ei esine. Näiteks lisati 100 nF ja 390 pF väärtustega kondensaatoreid voolu ja pinge tagasisideahelate takistitega paralleeli, kompenseerimaks häiringuid ja võimaldamaks muunduril töötada oma ettenähtud lülitussagedusel, mitte mõnel tagasisideahelate juhuslikul resonantsisagedusel, mida komponentide valiku ajal ette ei nähtud. Lisati ka 15 k Ω takisti, mis paikneb muunduri kontrolleri juures ja koormab tagasiside signaali, et vähendada häiringute mõju tagasisidele.

2.4 Mõõteseadmete ja väljundite moodul

Mõõteseadmete ja väljundite mooduli keskne osa on mikrokontroller ATmega328. Mikrokontroller jälgib vahelduv- ja alalsivooluväljundite pinget ja voolu, lugedes analoog-digitaalmuunduri(ADC) MCP3004 abil mõõdetavate suuruste andureid. Mikrokontroller jälgib ka osade esipaneeli lülitite asendeid. Mikrokontroller arvutab anduritelt mõõdetud signaalide järgi väljundite pinged ja voolud, ning näitab digitaal-analoogmuundurite(DAC) MCP4911 abil arvutatud väärtusi esipaneeli osutmõõteriistadel. Mikrokontrolleri algseadistamiseks ja programmeerimiseks on kasutatud Arduino programmeerimiskeskonda. Mõõteseadmete moodulit käsitlevas alampeatükis on illustatsioonidena kasutatud väljalõikeid joonisest „Mõõteseadmete ja väljundite mooduli elektriskeem“ ja viidatud lisas 1 paikneva programmi lähtekoodi funktsioonidele ja muutujatele.

2.4.1 Mooduli toide

Moodulil paikneb lineaarregulaatoril LM317 (Joonis 2.28, komponent U1) põhinev toiteallikas. Toiteallikas saab energia toite sisendi mooduli sisetoite alaldi +12 V



Joonis 2.28: Väljalõige jooniselt "Mõõteseadmete ja väljundite mooduli elektriskeem":

mikroskeemide toiteallikas mõõteseadmete moodulil

väljundilt, mis ühendatakse terminalplokile X3.0. Toiteallika sisendfiltriks on kondensaatorid C4 ja C6 ja väljundfiltriks on kondensaatorid C5 ja C7. Toiteallika tagasisideahela moodustavad takistid R29 ja R30 ning eeltakistiga R32 seadistuspotentsiomeeter R33. Takisti R31 on tagasisideahelasse lisatud selleks, et mõnevõrra vähendada takisti R30 väärtust skeemis. Lihtsustatult saaks takistid R31 ja R30 asendada ühe takistiga, mille väärtus on 8,2 kΩ. Seadistuspotentsiomeetriga R33 saab reguleerida toiteallika täpset väljundpinget.

Väljundpinge seadistus on võimaldatud seetõttu, et mõõteseadmete mooduli ADC ja DACid kasutavad toitepinget ka referentspingena. Pingeallikas on seadistatud toitma mooduli mikroskeeme 5,5 V pingega, mitte skeemide nominaalse toitepingega 5 V. Kõrgem toitepinge on tingitud sellest, et esipaneelil kasutatavate mõõteriistade katsetamisel selgus, et kuigi kaks mõõteriista kolmest on 5 V voltmeetrid, on skaala maksimumnäidu saavutamiseks vaja suuremat sisendpinget kui 5 V. 5 V nimipingega mikroskeemid mõõteseadmete moodulil on mikrokontroller, ADC ja DACid. Nende kõigi andmelehed hindavad maksimaalseks lubatud toitepingeks 5,5 V [21][22][23], seega nominaalsest kõrgem toitepinge ei saa neid kahjustada.

Lineaarregulaatori kaod on aparaadis märgulampidena kasutatavate hõõgpirnine tõttu piisavad, et lineaarregulaatoril U1 peab olema jahutuse tagamiseks radiaator. Märgulampe toidetakse 5,5 V toiteallika väljundilt, ning iga lambi nimivool on ligikaudu 60 mA. Korraga hoitakse sisselülitatuna kuni 2 märgulampi ja kummagi märgulambi kohta tekib lineaarregulaatoril võimsuskadu 0,39 W (valem 2.23), seega arvestuslik võimsuskadu normaalsel talitlusel on vähemalt 0,78 W.

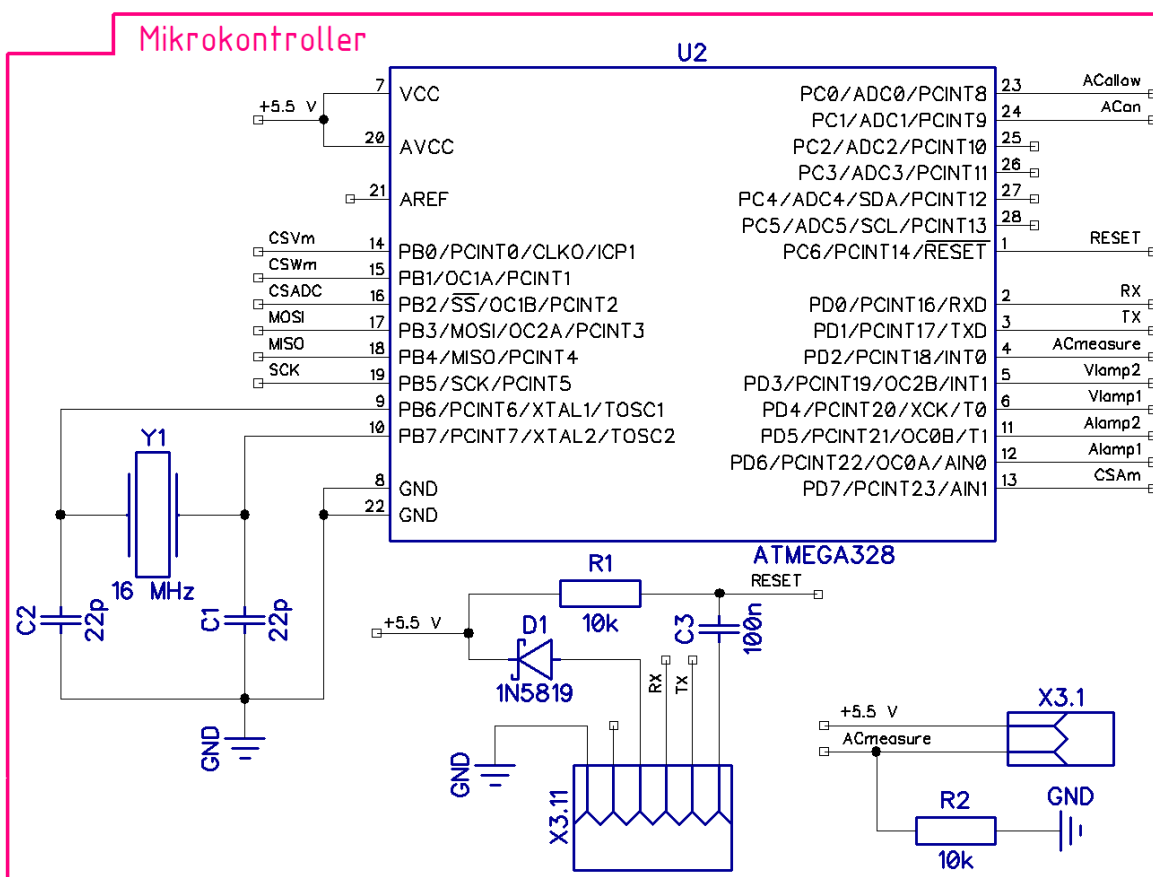
$$P_{U1} = (12 \text{ V} - 5,5 \text{ V}) \cdot 60 \text{ mA} = 0,39 \text{ W} \quad (2.23)$$

P_{U1} – Lineaarregulaatori maksimaalne võimsuskadu ühe märgulambi kohta

Ühendused terminalplokil X3.0: terminalploki kaudu sisenevad väljundite moodulisse vahelduvvoolu väljundi sekundaarmähiselt tulevad juhtmed kontaktidele AC 1 ja AC 2. Ka alalisvoolumuunduri väljundi poolused on ühendatud terminalploki X3.0 külge kontaktidele *DC* ja *GND*. Mõõteseadmete mooduli maapunkt on ühine alalisvoolumuunduri maapunktiga, sest toite sisendi mooduli 12 V ja 35 V alaldite maapunkt on ühine - seetõttu ühenduvad kõik maaühendused mõõteseadmete moodulil alalisvoolumuunduri väljundi maaühenduse külge.

2.4.2 Mikrokontroller

Moodulil on kasutatud mikrokontrollerit ATmega328. Mikrokontrolleri ühendusi moodulis kujutab Joonis 2.29. Ahelad mooduli elektriskeemis on tähistatud sarnaselt mikrokontrolleri programmis esinevate tähistega, et programmi ja elektriskeemi oleks lihtsam paralleelselt uurida.



Joonis 2.29: väljalõige jooniselt "Mõõteseadmete ja väljundite mooduli elektriskeem":

mikrokontrolleri ühendid moodulisestest ahelatega

Mõõteseadmete moodulil on programmeerimispesa X3.11, millele saab ühendada FTDI232 andmesidemooduli selleks, et luua programmeerimise otstarbel USB jadasini ühendus arvuti ja mikrokontrolleri vahel. Takisti R1 on ülestõmbetakisti mikrokontrolleri RESET klemmil. R1 hoiab normaalolekus mikrokontrolleri sisselülitatuna. Läbi kondensaatori C3 saab andmesidemoodul lühiajaliselt mikrokontrolleri RESET klemmi pinget madalaks tõmmata - see ühendus on vajalik ümberprogrammeerimise käigus toimuva andmeside jaoks.

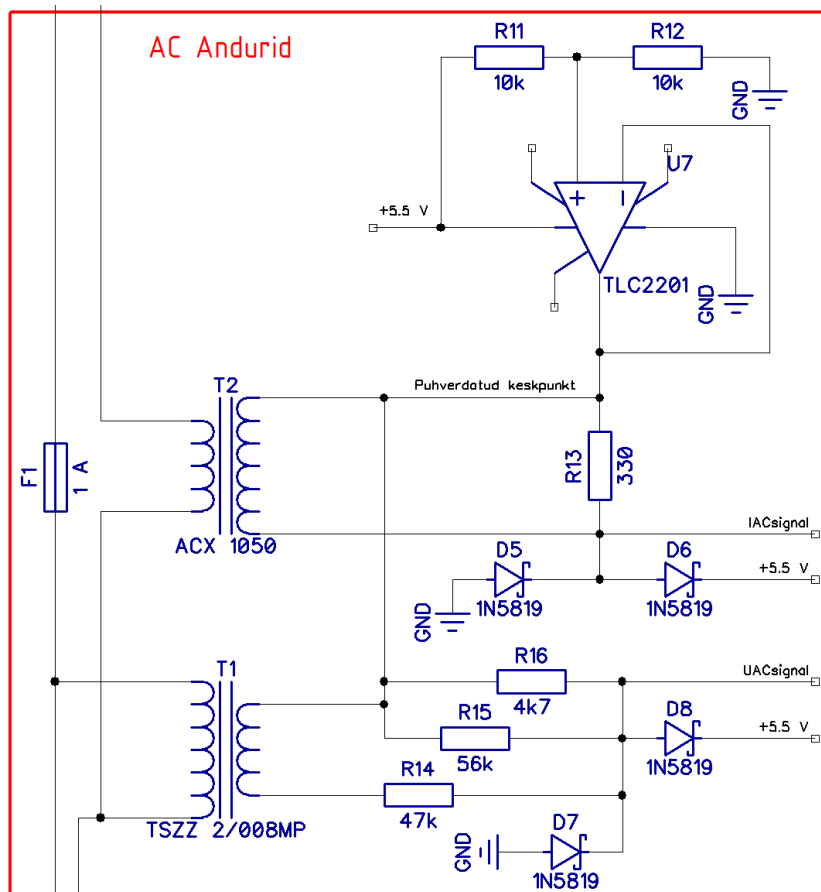
Terminalplokile X3.1 kinnitub aparaadi esipaneelil paiknev lüliti, mille olekuga annab kasutaja mikrokontrollerile märku, kas mõõteriistadel soovitakse näha alalisvoolu väljundi või vahelduvvoolu väljundi parameetreid. Takisti R2 on allatõmbetakisti, Et valikulüliti avatud kontaktide korral oleks signaali *ACmeasure* väärtus kindlalt madal.

Komponent Y1 on mikrokontrolleri kella kvartskristall võnkesagedusega 16 MHz. Kvartsiga ühendatud kondensaatorid C1 ja C2 on vajalikud mikrokontrolleri kella ostsillaatori tööks.

2.4.3 Vahelduvvoolusuuruste andurid

Vahelduvvoolu väljundi pinge ja voolu mõõtmiseks on pingetrafo T1 ja voolutrafo T2 (Joonis 2.30), mis säilitavad galvaanilise eralduse vahelduvvoolu- ja alalisvooluahelate vahel. Selleks, et võimaldada vahelduvvooluandurite signaalide mõõtmist, tuleb piirata nende andurite väljundid pingevahemikku maapunktist toitepingeni 5,5 V. Vahelduvvoolusuuruste signaalid tuleb selleks siduda ADC toitepinge ja maapunkti vahelise keskpunktiga. Vahetult trafode T1 ja T2 läheduses paikneb vahelduvvoolu väljundi

lühisekaitseks ette nähtud sulavkaitse F1.



Puhverdatud keskpunkt signaalide jaoks on teostatud

operatsioonvõimendi U7 abil. Takistitest R11 ja R12 moodustuv pingejagur 5,5 V toite ja maa vahel annab operatsioonvõimendile U7 sisendsignaali

vajaliku keskpunkti pinge 2.75 V ja pingejärguriks ühendatud operatsioonvõimendi U7 väljundile ilmub

sama pinge. Operatsioonvõimendi järgib seda pinget. Pingejärgur on vajalik selleks, et vältida pingejaguri

Joonis 2.30: väljalõige joonisest "Mõõteseadmete ja väljundite mooduli elektriskeem": vahelduvvoolusuuruste mõõtetrafod ja signaaliahelad

koormamist ja keskpunkti pinge varieerumist andurite signaalide mõjul. Pingejärguri kasutamine puhverdab pingejaguri vooluvõimekust.

Pingeandur koosneb trafost T1 ja selle sekundaarmähisele ühendatud pingejagurist (takistid R16, R14). Pingejaguri väljundpinge vähendamiseks lisandus katsetuste käigus ka takisti R15. Sekundaarmähise ja pingejaguri üks ots on ühendatud vahelduvvooluandurite puhverdatud keskpunkti külge. Sekundaarmähise ja pingejaguri teine ots on omavahel kokku ühendatud. Trafo sekundaarmähise klemmipinge efektiivväärtus 230 V sisendpinge juures on ligikaudu 20 V. Pingejagur langetab vahelduvpinge mõõtesignaali maksimaalse tipuväärtuse alla 2.75 V. Vahelduvpinge mõõtesignaali pinge lisandub puhverdatud keskpunkti pingele või lahutub puhverdatud keskpunkti pingest, sõltuvalt vahelduvvoolu poolperioodist. Signaalitöötlemise lõpptulemus on vahelduvpinge signaal *UACsignal*, mis varieerub ümber keskpunkti pinge 2.75 V. Vahelduvpinge signaali külge on ühendatud diodid D7 ja D8, mis piiravad minimaalse pingetaseme 0,4 V alla maapunkti pinge ning 0,4 V üle 5,5 V toiteallika pinge. Signaali väärtus on täiendavalt piiratud selleks, et kaitsta ADC sisendit juhul kui signaal mingil põhjusel toitepinge vahemikust väljub.

Vooluandur koosseeb voolutrafost T2 ja takistist R13. Voolutrafo sekundaarmähise üks ots on ühendatud andurite puhverdatud keskpunktiga. Voolutrafo sekundaarmähisel on 2500 keerdu [24] ning primaarmähiseks on trafo südamikule keritud 10 keerdu, seega trafo vooluülekanndetegur on 1:250. Takisti R13 väärtus on valinud selline, et voolutrafo sekundaarahela vool, juhul kui primaarmähises kulgeb maksimaalne vool 1 A, tekitab takistil pingelangu, mille amplituudväärtus jääks mõnevõrra alla 2.75 V. Takisti pingelang tekitab andurite ühise keskpunkti ümber varieeruva pingesignaali, mis on vooluanduri väljundsignaal *IACsignal*. Ka vooluanduri signaali väärtus on töökindluse huvides piiratud ADC toitepinge vahemikku, kasutades dioode D5 ja D6.

2.4.4 Alalisvoolusuuruste andurid

Alalisvoolusuuruste anduritena on kasutusel pinget mõõtev pingejagur ja voolu mõõtev magnetsüdamikuga Halli efekti andur (Joonis 2.31, komponent CS1) koos võimendiga.

Pingeandur on lihtne pingejagur alalisvoolumuunduri väljundklemmi *DC* ja maa vahel. Pingejaguri moodustavad takistid R17 ja R18. Pingejaguri väljundiks on alalisvoolumuunduri väljundpingest sõltuv pingesignaal *UDCsignal*, mis varieerub vahemikus 0 V kuni 5 V. Sarnaselt vahelduvvooluanduritele on ka alalispingeanduri signaal piiratud ADC toitepinge vahemikku. Anduri väljundpinget piiravad diodid D9 ja D10.

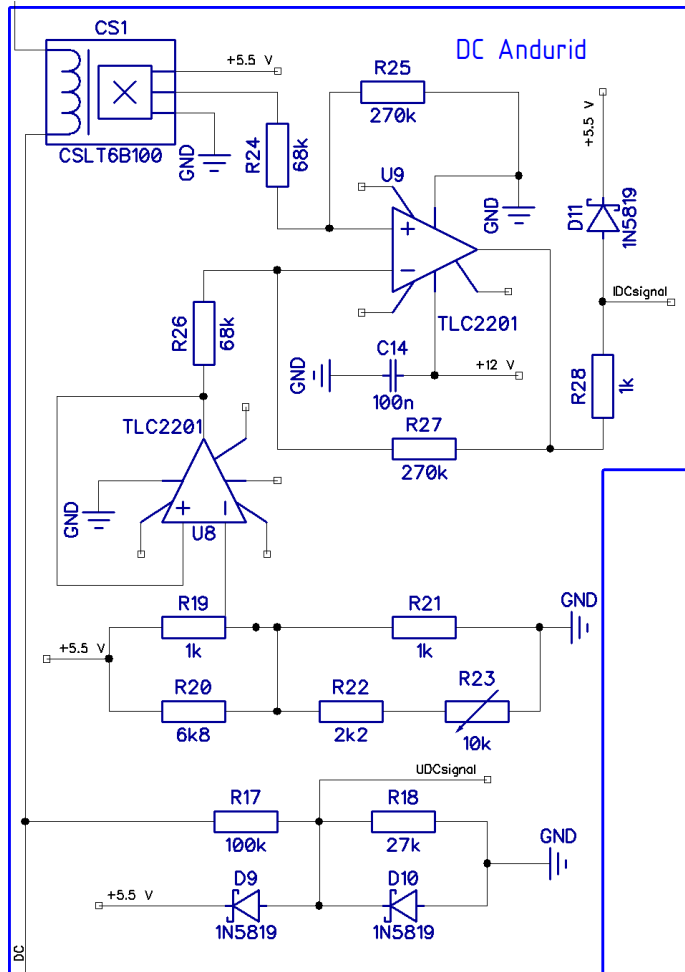
Vooluandur on magnetsüdamikuga Halli efekti andur. Anduri südamikule keritud 25 keeruga mähis läbib alalisvooluväljundi vool, mis põhjustab südamikus voolutugevusest lineaarselt sõltuva tugevusega magnetvoo. Magnetvoo tugevust mõõdab Halli efekti andur, ning selle anduri väljundpinge on võrdeline mähis läbiva voolutugevusega.

Mähisel on 25 keerdu seetõttu, et kasutatud on andurit, mille mõõdetava voolutugevuse nimiväärtus on 100 A [25], aga tegelikult mõõdetava voolu tugevus on ainult kuni 3 A. 25-keerulise mähisega kahaneb anduri mõõdetava voolutugevuse nimiväärtus 4 A-ni.

Kuna kasutatav andur on võimeline tuvastama voolu kahes suunas, on ilma vooluta anduri väljundpinge toiteklemmide pinge keskpunkti läheduses. Sõltuvalt andurit läbiva voolu suunast on voolu kulgemise korral anduri väljundpinge kas suurem või väiksem keskpunkti pingest. Käsitleva aparadi sees kasutatakse andurit ainult ühesuunalise voolu mõõtmiseks, seega kasulik on anduri väljundpinget modifitseerida nii, et ilma vooluta oleku korral oleks väljund ligikaudu 0 V maapunkti suhtes, ning suure voolutugevuse korral läheneks väljundpinge 5,5 V toitepingele.

Vooluanduri väljundi nihutamiseks on vaja varieeritavat seadistuspinget. See on saavutatud pingejaguriga, mis koosneb takistitest R19, R21 ja R20, ning mille varieerimiseks on jadatakistiga R22 seadistuspotentsiomeeter R23. Pingejaguri väljundis on pingejärguriks ühendatud operatsioonvõimendi U8.

Vooluanduri väljundit nihutab ja võimendab operatsioonvõimendi U9, mille seavad diferentsiaalvõimendina toimima takistipaarid R24 ja R25, ning R26 ja R27.



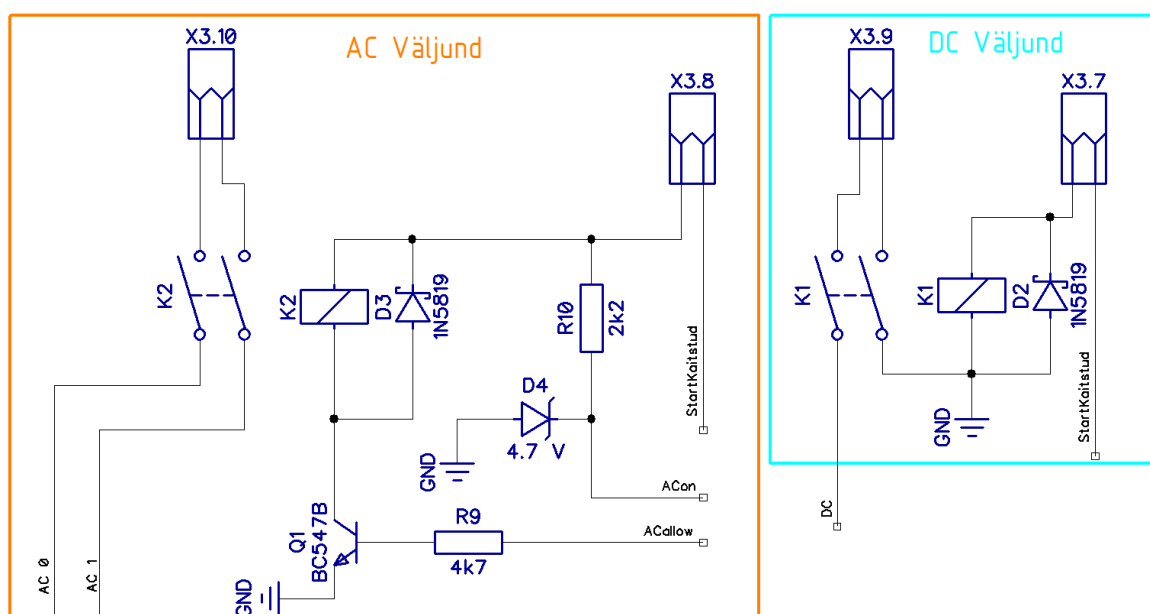
Joonis 2.31: väljalõige jooniselt "Mõõteseadmete ja väljundite mooduli elektriskeem": alalisvoolusuuruste andurid

Diferentsiaalvõimendi lahutab vooluanduri väljundpingest maha operatsioonvõimendi U8 väljundilt loetava seadistuspinge ja võimendab saadud tulemust seejärel ligikaudu 4-kordselt. Võimendatud signaal on vooluanduri väljund *IDCsignal*. Vooluanduri väljundsignaal ei saa langeda alla maapunkti pinge, kuna see on operatsioonvõimendi väljund ja kasutatava operatsioonvõimendi minimaalne väljundpinge on operatsioonvõimendi negatiivse toiteklemmi pinge, ehk käesolevas skeemis maapunkti pinge. Vooluanduri väljundsignaali maksimaalne pinge on piiratud toitepinge 5,5 V lähedale diodi D11 ja voolupiirdetakistiga R28.

Väljundsignaali pinget on vaja piirata seetõttu, et operatsioonvõimendi U9 toiteks ei kasutata 5,5 V toidet, vaid 12 V sisendit, kuna operatsioonvõimendi väljundpinge oleks madalama toitepinge juures piiratud tasemele alla 3 V [26]. Kõrgema toitepinge tõttu on teoreetiliselt võimalik olukord, kus operatsioonvõimendi U9 väljundpinge tõuseb üle 5,5 V.

2.4.5 Väljundid

Alalisvoolu väljund on ühendatud terminalplokile X3.9 (Joonis 2.32). Väljundit lülitatakse rele K1 normaalselt avatud kontaktidega. Relee mähist lülitatakse esipaneeli lülitiga, mille juhtmed ühendatakse terminalplokile X3.7. Kuna rele mähist toidetakse aparraadi käivitussignaali *Start*, mis on käivitusperioodi viivituse ajal madal, siis väljund ei saa sisse lülituda enne aparraadi täielikku käivitumist. Kuna



Joonis 2.32: väljalõige jooniselt "Mõõteseadmete ja väljundite mooduli elektriskeem": alalis- ja vahelduvvooluväljundite jälgimis- ja lülitusahelad

käivitussignaali katkeb ka trafo ülekoormusest tuleneval ülekuumenemisel, lülitub alalisvooluväljund trafo ülekoormuse korral välja. Niimoodi on garanteeritud alalisvoolu väljundi ülekoormuskaitse.

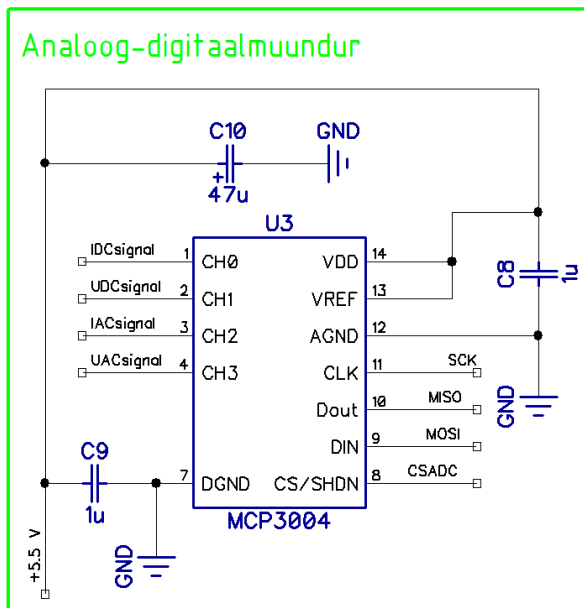
Vahelduvvoolu väljund on ühendatud terminalplokile X3.10. Vahelduvvoolu väljundit lülitatakse rele K2 normaalselt avatud kontaktidega. Relee K2 mähist lülitatakse esipaneeli lülitiga, mille juhtmed ühendatakse terminalplokile X3.8. Ka rele K2 mähise toiteks kasutatakse käivitussignaali, nii lülitub ka vahelduvvoolu väljund välja trafo ülekuumenemise korral. Erinevus alalisvoolu väljundist on see, et mikrokontroller jälgib väljundi lüliti olekut ja saab väljundi välja lülitada. Väljundi jälgimiseks tekitatakse takisti R10 ja stabilitrone D4 abil mikrokontrolleri toitepinge loogikatasemel signaal *ACon*.

Vahelduvvoolu väljundi kaitseahelad: Mikrokontroller juhib transistori Q1 läbi baasiahela takisti R9 signaaliga *Acallow*. Tavaliselt hoitakse transistori Q1 juhtivas olekus, kuid olukorras, kus mikrokontroller tuvastab, et vahelduvvoolu väljundi vool ületab 1 A, lülitab mikrokontroller transistori Q1 jäävalt välja, mistõttu katkeb rele mähise vool ja vahelduvvoolu väljund lahutatakse koormusest. Kui mikrokontroller tuvastab peale vahelduvvoolu väljundi kaitsmist, et vahelduvvooluväljundi lüliti lülitati välja, ehk signaal *Acon* langeb madalaks, lülitab mikrokontroller transistori Q1 uuesti sisse. Sellise loogikaga on ülekoormuskaitse taastatav väljundi väljalülitamise teel.

Selline kaitseahel on kasutusel aparadi kasutusmugavuse suurendamiseks, kuna reageerib väikestele ülekoormustele kiiremini kui sulavkaitse F1 (Joonis 2.30). Seetõttu ei pea mõõduka ülekoormuse korral kaitset välja vahetama – piisab vaid vahelduvvoolu väljundi välja ja uuesti sisse lülitamisest. Kaitse F1 on skeemis normaalsel talitlusel lühisekaitseks, kuid on vahelduvvoolu väljundil ka kindlasti toimiv voolu piirav element olukorras, kus mikrokontrolleri tarkvaraline kaitseahel mõnel põhjusel ei toimi.

2.4.6 Andurite lugemine

Andurite lugemiseks on kasutatud analoog-digitaalmuundurit MCP3004, millega mikrokontroller suhtleb läbi SPI jadasiini (SPI – *Serial Peripheral Interface*). ADC ühendusi elektriskeemis kirjeldab Joonis 2.33. Mikrokontrolleri programmis (lähtekood lisas 1) on funktsioon *ReadADC()*, mis on kirjutatud ADC kindlalt kanalilt väärtuse lugemiseks. Selle funktsiooni rakendamisel programmi põhitsüklis *loop()* lisatakse funktsioonile argumentiks ADC kanal, millega on ühendatud andur, mida soovitakse lugeda. Analoo-digitaal-muunduri loetud arv vahemikus 0 kuni 1023 on funktsiooni *ReadADC()* väljund.



Joonis 2.33: väljalõige jooniselt "Mõõteseadmete ja väljundite mooduli elektriskeem": analoog-digitaalmuunduri ühendused.

Mikrokontroller loeb analoog-digitaalmuundurilt mõõteperioodi jooksul 200 väärtust mõõdetavate signaalide kohta. Iga mõõtepunkti lugemise järel viivitab mikrokontroller 100 µs. Sellise viivituse korral mõõdetakse ühe mõõteperioodi jooksul terve 50 Hz nimisagedusega vahelduvvoolusignaali üks täisperiood, sest 200 mõõtepunkti võtmiseks kulub 20 ms.

Mõõtmiskanalite valiku otsustab mikrokontroller selle järgi, kas vahelduvvoolu väljund on sisse lülitatud ja kumba väljundit mõõteriistadega jälgitakse. Valiku loogika paikneb mikrokontrolleri programmi põhitsükklis, ning toimib järgnevalt:

- 1) kui mõõdetakse vahelduvvoolu suurusi, siis mikrokontroller loeb ADC-lt väärtusi ainult vahelduvvoolusuuruste kanalitelt;
- 2) kui mõõdetakse alalisvoolu suurusi, aga vahelduvvoolu väljund on sisse lülitatud, siis loetakse ADC-lt andmed alalisvoolusuuruste kanalitelt, aga ka vahelduvvoolu kanalilt, selleks, et toimiks vahelduvvoolu väljundi tarkvaraline ülekoormuskaitse;
- 3) kui mõõdetakse alalisvoolusuurusi ja vahelduvvoolu väljund on välja lülitatud, siis loeb mikrokontroller ADC-lt väärtusi ainult alalisvoolusuuruste kanalitelt.

2.4.7 Arvutused mõõtepunktidega

Mikrokontrolleri abil on teostatud mõõdetavate suuruste tõeste efektiivväärtuste arvutamine (*true RMS*). Kui mikrokontroller on läbinud ühe mõõtettsükli ning lugenud 200 mõõtepunkti kõigi parasjagu uuritavate väärtuste kohta, algab mõõdetud väärtuste arvutus. Eeldusel, et signaali diskreetimissamm on kõigil mõõtepunktidel ühesugune, ehk ajavahe kõigi mõõtepunktide vahel on ühesugune, saab diskreetajas

esitatud suuruse ruutkeskmist väärtust arvutada valemi 2.24 alusel.

$$A_{ef} = \sqrt{\frac{\sum a^2}{n}} \quad (2.24)$$

A_{ef} – suuruse efektiivväärtus, ehk ruutkeskmine väärtus.

$\sum a^2$ – uuritava väärtuse mõõtepunktide ruutude summa

n – mõõtepunktide arv.

Kuna mõõteperioodi jooksul on mõõtepunktide vahel ühesugused viivitused, siis saab valemit 2.24 rakendada mõõtepunktide järgi pinge ja voolu efektiivväärtuste arvutamiseks. Kõik väärtuste arvutused ja keskmistamised toimuvad ADC väljundarvudega, see tähendab numbritega vahemikus 0-1023, mida ADC oma kanalitel nähtavate signaalide järgi mikrokontrollerile väljastab. Arvutatud väärtused hinnatakse ümber reaalseteks mõõdetud väärtusteks alles peale ruutkeskmistamisi.

Voolu arvutused: Voolu tugevuse ruutkeskmine väärtus arvutatakse programmi funktsioonis *CalcCurrent()*. Funktsiooni väljakutsumisel edastatakse funktsioonisisese valikuloogika toimimiseks vajalik teave selle kohta, milline voolu väärtus on vaja välja arvutada – signaalid *ACon* ja *Acmeas*. Voolu arvutava funktsiooni loogika arvutatava suuruse valimiseks on samasugune kui mõõtmiskanalite valikul. Oluline on lisada, et vahelduvvoolu väljundi sisselülitatud olekus arvutatakse kindlasti vahelduvvoolu efektiivväärtus mõõteperioodil ja voolu arvutuse funktsioon kontrollib ka selle väärtuse suurust, et vajaduse korral väljund koormusest vabastada.

Voolu väärtuse arvutamine käib rakendades valemit 2.24. Iga mõõtepunkti voolu hetkväärtused võetakse ruutu, summeeritakse, jagatakse 200-ga, kuna mõõtepunkte on nii palju, ja saadud tulemusest võetakse ruutjuur. Arvutuste juures rakendatakse jagamisfunktsiooni *IntDiv()*, mis erinevalt ++ programmeerimiskeele tavalisest täisarvulisest jagamisest rakendab ka meetodit arvutustulemuse matemaatiliselt korrektseks ümardamiseks. Juurimiseks kasutatakse juurimisfunktsiooni *SqRoot()*, milles rakendatakse kahendarvulist iteratsioonimeetodit juure leidmiseks. Juurimisfunktsioon on sellisel kujul rakendatud selleks, et vältida ujuvkomaarvudega (*float*) toimivat tavalist *math.h* teegi juurimisfunktsiooni. Ujuvkomaarvudega tehete sooritamine mikrokontrolleril, millel ei ole selleks otstarbeks spetsiaalset arvutusmoodulit, nõuab palju aega ja põhjustaks programmis viivitusi. Täisarvuliste arvutustega säästetakse arvutuste käigus aega, et võimalikult suure osa ajast saaks mikrokontroller tegeleda reaalsete mõõtmistega.

Pinge arvutused: Pinge arvutused toimuvad funktsioonis *CalcVoltage()*, millele edastatakse arvutatava väärtuse valikuks muutuja *ACmeas*. Selle muutuja järgi otsustab arvutusfunktsioon, kas arvutada on vaja alalis- või vahelduvvoolu väljundi pinget, ning arvutab seejärel vastava väärtuse. Arvutus toimub samal moel kui voolu arvutamise funktsioonis, ainult pinge arvutamise funktsioonil ei ole kaitseahela väärtuse suuruse kontrolli kaitseahela jaoks.

Võimsuse arvutused: Võimsuse arvutamiseks on funktsioon *CalcPower()*. Sellele funktsioonile edastatakse arvutatava väärtuse valikuks muutuja *ACmeas*, ning juhuks kui on vaja arvutada alalisvoolu väljundi võimsust, antakse programmile argumendina ka välja arvutatud voolu ja pinge efektiivväärtused.

Vahelduvvoolu aktiivvõimsuse arvutamisel rakendatakse funktsioonis arvutusmeetodit, mida kirjeldab valem 2.25.

$$P = \frac{\sum u \cdot i}{n} \quad (2.25)$$

P – aktiivvõimsus

$\sum u \cdot i$ – pinge ja voolu hetkväärtuste korrutiste summa, ehk hetkvõimsuste summa

n – mõõtepunktide arv.

Keskmine võimsusarvutus hetkvõimsuste järgi annab tulemuseks aktiivvõimsuse, kuna reaktiivvõimsuse hetkväärtused on vahelduvvoolu veerandperioodidel vaheldumisi positiivsed ja negatiivsed, ning tasakaalustavad üksteist summast välja.

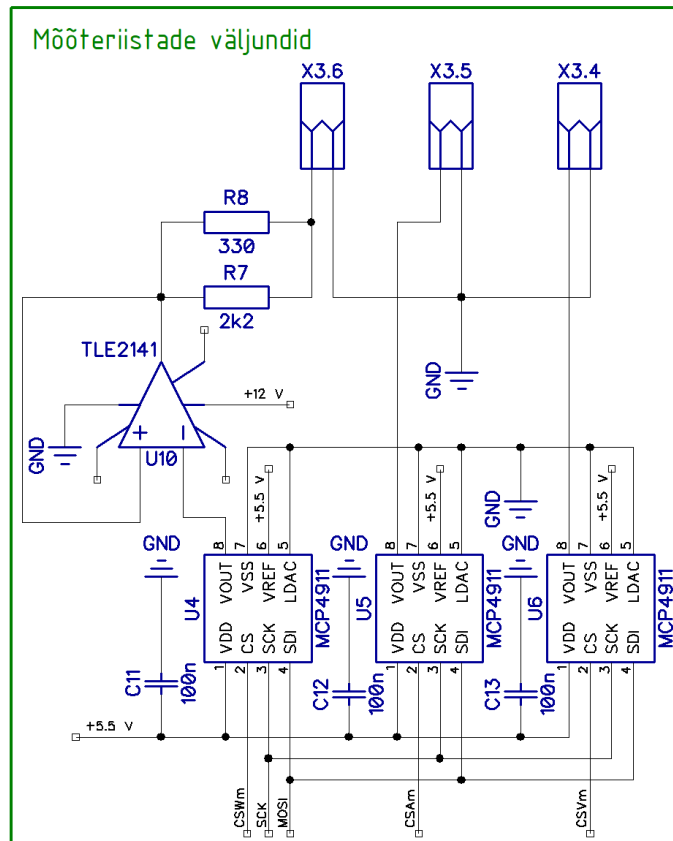
Alalisvoolu väljundi võimsuse arvutamiseks korrutatakse lihtsalt funktsioonile argumentidena antud pinge ja voolu ruutkeskmised väärtused omavahel. Võimsuse väärtus jagatakse korrutamise järel 1000-ga, selleks et väärtus jääks samasugusesse mastaapi, nagu voolu ja pinge väärtused.

2.4.8 Mõõtmistulemuste näitamine

Mõõtmistulemuste näitamiseks kasutatakse aparraadi esipaneelil näidikutena analoogmõõteriistu. Nimelt on kasutusel kaks voltmeetrit ja üks ampermeeter. Kasutatud on sellist komplekti mõõteriistu, sest töö autoril olid need olemas. Sellise valiku järgi on kujundatud ka väljundite mooduli ehitus. Mõõteriistadel näidatakse väärtusi digitaal-analoogmuundurite abil. Mõõteriistade väljundeid ja DAC-e mõõteseadmete moodulil kujutab Joonis 2.34.

Mikrokontroller suhtleb DAC-idega (U4, U5, U6) SPI jadasiinil. Mikrokontroller saadab programmis välja arvutatud väärtused DAC-idele, kasutades funktsiooni *WriteDAC()*.

DAC-id U5 ja U6 muundavad saadud väärtused analoogpingeteks ning voltmeetrid on ühendatud terminalplokkidele X3.5 ja X3.4 neid pingeid näitama. Voltmeetrite skaala maksimumjaotise korral on voltmeetri mähise koormusvool ligikaudu 1 mA, mis on DAC-ide väljundvoolu võimekuse piires [23]. Kolmanda näidikuna kasutatav ampermeeter oli originaalis 1 A maksimumnäiduga, kuid seda mõõteriista modifitseeriti aparaadis ettenähtud otstarbel kasutamiseks. Ampermeetri korpus avati, ning katkestati ampermeetrise mõõtesünt. Selle tulemusel selgus,



et ampermeetri koormusvool skaala maksimumjaotise näitamisel on ligikaudu 18 mA. See volutugevus on DAC-i väljundist

Joonis 2.34: väljalõige jooniselt "Mõõteseadmete ja väljundite elektriskeem": digitaal-analoogmuundurid ja väljundid mõõteriistadele

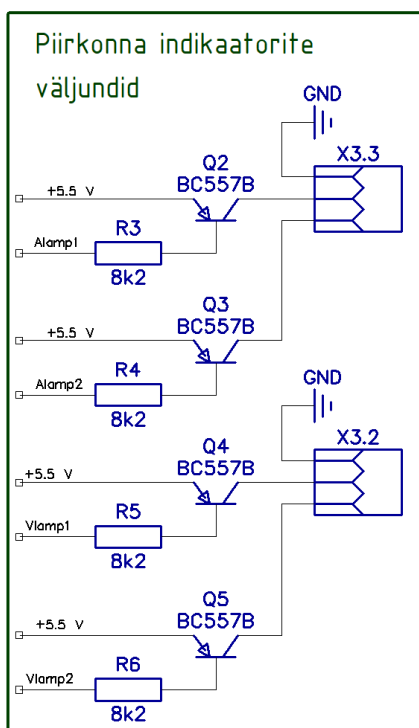
otse toitmiseks liiga suur [23]. Seetõttu on DAC-i U4 väljundpinget väljundvoolu võimendamiseks operatsioonvõimendi U10 abil puhverdatud. Kasutatav operatsioonvõimendi tuleb ampermeetri koormusvooluga toime [27]. Kuna ampermeetri sisetakistus on väike, aga näidu varieerimine on teostatud pingsignaaliga, siis on ampermeetri ühendusterminali X3.6 signaalikanalis ka eeltakistid R8 ja R7, mis on ampermeetriga jadaühenduses ja muudavad ampermeetri voltmeetriks.

Mõõtetulemuste näitamiseks mõõteriistadel toimub mikrokontrolleri programmis iga väärtusega kaks ümberinterpoleerimist. Esimese interpolatsiooniga arvutatakse ADC väljundväärtuste järgi saadud suurustest reaalsed füüsikalised suurused ja teise interpolatsiooniga arvutatakse digitaal-analoogmuunduritele edastatavad väärtused, mille korral esipaneelil mõõteriist soovitud väärtust näitab. Kahe interpolatsiooni vahel toimub ka mõõdetud väärtuse suuruse hindamine ja ümberarvutus selleks, et tarkvaraliselt saavutada esipaneeli mõõteriistadel automaatset piirkondade valikut.

Mõõtepiirkonnad on kasutusel selleks, et väikeste väljundväärtuste juures oleks võimalik väärtusi mõõteriistade skaaladelt lugeda. Mõõtepiirkonnad on näidatud tabelis 2.1.

Tabel 2.1: Voltmeetri ja ampermeetri piirkonnad

	Alalisvoolu väljundi piirkonnad	Vahelduvvoolu väljundi piirkonnad
Vool	250 mA; 1,5 A; 3 A	250 mA; 500 mA; 1 A
Pinge	5 V; 15 V; 25 V	50 V; 150 V; 250 V



Joonis 2.35: väljalõige jooniselt "Mõõteseadmete ja väljundite mooduli elektriskeem":
mõõtepiirkonna märgulambid

Piirkondade valik toimub mikrokontrolleri programmis automaatselt ning valitud piirkonnast antakse märku voltmeetri ja ampermeetri näitusid esitavate näidikute all märgulampidega. Märgulambid on miniatuursed 5 V nimipingega hõõgpirnid, mis ühendatakse terminalpokkidele X3.2 ja X3.3 (Joonis 2.35). Märgulampe lülitab mikrokontroller transistoride Q2 ... Q5 abil. Vattmeetri piirkond on alati voltmeetri ja ampermeetri piirkonna korrutis seda eraldi ei näidata.

Mõõteriistade piirkondi määratakse programmis funktsiooni *PickRange()* abil. Sellele funktsioonile antakse ette näidatava suuruse väärtus, hetkel aktiivne mõõtepiirkond, mõõtepiirkondade maksimumväärtused, piirkondadevahelise hüplemise vältimiseks hüstereesi väärtus ja funktsiooni loogikaga lülitatavate märgulampide transistoride baasiahelate klemmitähised.

2.4.9 Mõõtmistulemuste arvutamine

Interpoleerimistabelid: Mikrokontrolleri programmis on tabelitena defineeritud interpoleerimisteks vajalikud funktsioonid. Tabelites sisalduvad andmed on saadud katsemõõtmiste käigus. Defineeritud funktsioonid peaks teoreetiliselt olema lineaarsed, sel juhul oleks väärtuste ümberhindamiseks vajalik neid ainult justeerimiskonstantidega korrutada või jagada. Reaalselt ei ole

ülekandefunktsioonid päris lineaarsed. Näiteks aparaadi esipaneelil näidikutena kasutatavate 2,0 täpsusklassiga mõõteriistade ülekandefunktsioonide kaardistamisel selgus, et funktsioonide suurim erinevus lineaarsest ülekandefunktsioonist on kahel mõõteriistal 1,5% ning ühel üle 2%. Mõõteriistade skaaladel on 50 jaotist ja 2% viga sellisel skaalal on terve jaotis – seetõttu ongi interpoleerimiseks mõõdetud funktsioonid tabelitena, milles ebalineaarsus kajastub ja mille kasutamisega kompenseerub interpoleerimisel näidu viga.

Igal mõõteriistal on mõõteriista näidu järgi koostatud interpolatsioonitabel mõõteriista skaalal põhijaotiste ja põhijaotiste vahepunktide näitamiseks. Mõõteriistade interpolatsioonitabelid on massiivid *WmMap*, *VmMap* ja *AmMap*. Iga mõõteriista tabelis sisalduvad DAC-ile saadetavate numbriliste väärtuste andmed iga näidatava jaotise ja jaotiste vahekoha kohta. Koos nullväärtusega on seega mõõteriistade interpolatsioonitabelites 101 väärtust. Kuna DAC-ide sisendväärtuste vahemik on kõigi mõõteriistade jaoks sama, (0-1023) on mõõteriistadel interpolatsiooni sisendväärtuste tabel ühine. Mõõteriistade sisendväärtuste tabel on massiiv *MeterInput*.

Igal anduril on interpoleerimiseks oma sisend- ja väljundväärtuste tabel, selleks et kirjeldada funktsionaalset seost andurilt loetud digitaalse väärtuse ja anduri mõõdetava füüsilise suuruse vahel. Anduri sisendväärtuste tabelis on andurilt ADC kaudu loetavad suurused ja anduri väljundväärtuste tabelis on anduri mõõdetava füüsilise suuruse väärtused, mille korral sisendväärtuste tabeli andmed loeti. Alalisvooluanduri sisendtabel on massiiv *IDCsensormap* ja väljundtabel *IDCmap*. Alalispingeanduri tabelid on vastavalt *UDCsensormap* ja *UDCmap*, ning vahelduvvoolu suurustel vastavalt *IACsensormap*, *IACmap* ja *UACsensormap*, *Uacmap*. Alalisvoolu anduri väljundtabeli väärtused on milliamprites, Alalispinge anduri väärtused on millivoltides. Vahelduvvooluanduri väärtused on milliampri kümnendikes ja vahelduvpinge anduri väärtused kümnetes millivoltides. Väärtused on sellistes mastaapides filtreerimisfunktsiooni toimimise hõlbustamiseks.

Interpoleerimisfunktsioon: Peale ruutkeskmistusarvutusi võetakse ruutkeskmised väärtused ja interpoleeritakse neid funktsioonis *MultiMapProgmem()*. Funktsiooni *MultiMap()* originaalne autor on nimetatud programmi päises. Selles töös kasutamiseks on funktsiooni modifitseeritud töötama programmimälus salvestatud tabelitega. Kuna mikrokontrolleri muutmälu ei ole piisavalt suur, et lisaks mõõteväärtuste andmemassiividele mahutada ära kogu interpolatsioonitabelites sisalduv andmehulk, on interpolatsioonitabelid salvestatud mikrokontrolleri programmimälusse ja seetõttu peab ka funktsioon hakkama saama programmimälust andmete lugemisega.

Interpoleerimisfunktsiooni kasutamiseks antakse sellele argumendina sisendväärtus ning viidatakse sisendväärtuse funktsioonitabelile ning väljundväärtuse funktsioonitabelile. Kasutatavad tabelid peavad olema ühepikkused, et interpolatsioonifunktsioon saaks nende vahel eeldada funktsionaalset seost. Sisendväärtuse alusel valitakse sisendväärtuse tabeli andmepunktide järgi interpolatsioonivahemik, millesse sisendväärtus jääb. Selle vahemiku otspunktid on kaks sisendtabelis määratud väärtust, ning nendele punktidele vastavate väljundtabeli väärtuste vahel interpoleeritakse sisendväärtuse asukoha järgi vahemikus väljundi väärtus, mis vastab sisendväärtusele. Interpolatsioonifunktsioon seab sisend- ja väljundtabelite väärtused omavahel vastavusse ja tekitab neist sisuliselt lineaarselt interpoleeritud lõikudest koosneva funktsiooni.

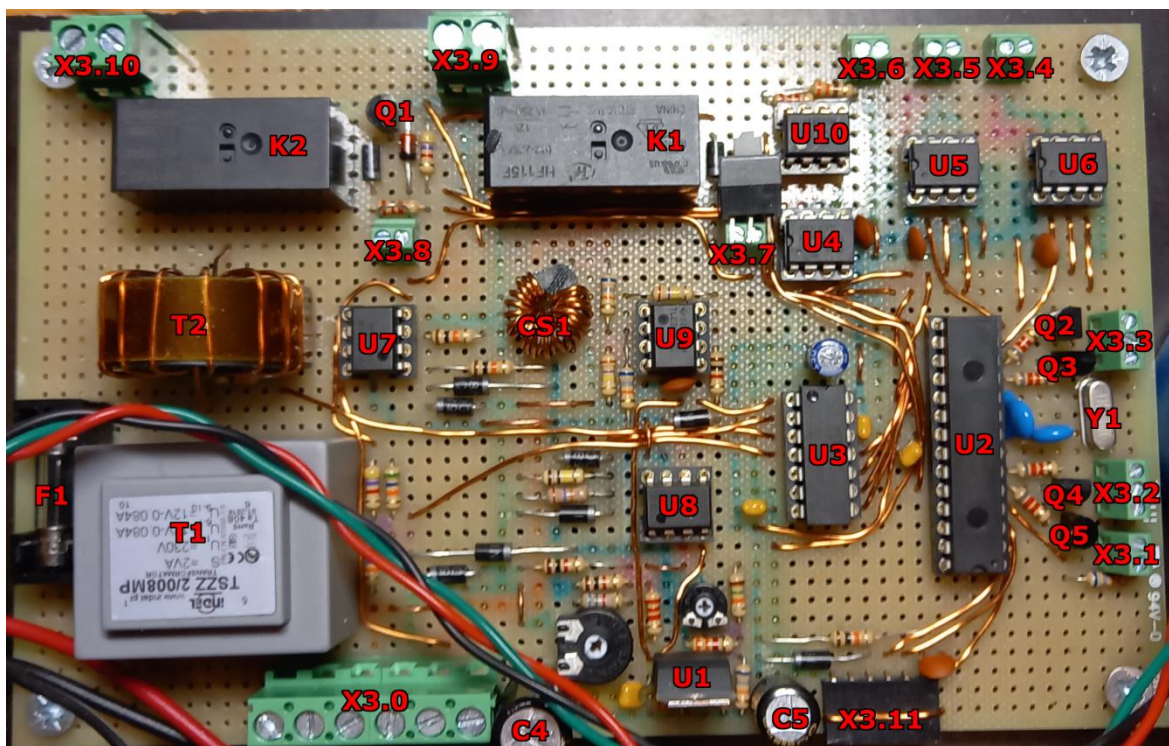
Filtreerimisfunktsioon: kuna mõõtmine on digitaalne, siis olukorras, kus mõõdetav väärtus on selline, mis paikneb kahe digitaalse väärtuse vahel, saab tekkida kahe väärtuse vahel värelev mõõtmistulemus. Sellisel juhul näidiku nool väreleb, kuigi mõõdetav väärtus on tegelikult stabiilne. Näitude silumiseks ja näidiku noolte asjatu värelemise likvideerimiseks on mikrokontrolleri programmis funktsioon *FilterValue()*.

Filtreerimisfunktsioon kasutab primitiivset stabiliseerimismeetodit. Funktsioonile antakse argumentidena filtreeritava signaali hetkeline väärtus, signaali eelmine filtreeritud väärtus, hüstereesivahemiku laius ja jagaja. Filtreerimisfunktsioon arvutab signaali eelmise väärtuse ja uusima väärtuse erinevuse ja hindab selle suurust: kui signaalide erinevus on sisestatud hüstereesi muutujast suurem, liidetakse eelmisele filtreeritud väärtusele erinevus, mis on jagatud filtreerimisfunktsioonile antava jagamismuutujaga. Niimoodi saadakse filtreeritud väärtuse kiire muutumine signaali suure muutuse korral. Kui väärtuste erinevus on hüstereesi muutujast väiksem, siis suurendatakse või vähendatakse eelmist filtreeritud väärtust 1 võrra. Ühe võrra muutusega lähenetakse filtreeritud väärtusega filtreeritava signaali väärtusele mitme arvutusperioodi jooksul aeglaselt. Kui filtreeritav väärtus muutub vaheldumisi üles – alla, jääb filtreeritud väärtus väiksemal määral värelema nii, et seda ei ole analoogmõõteriistal enam märgata.

Kuna arvutustsükkel koos väärtuste filtreerimisega toimub ligikaudu 50 korda sekundis, osutus interpoleerimistabelites optimaalses mastaabis füüsikaliste suuruste kasutamisel värelust siluv toime väikeseks. Seetõttu vähendati andurite integreerimistabelites suuruste mastaape, et nende arvulised väärtused oleks suuremad ja filtreeritava väärtuse silumiseks kasutatav väärtuse 1 võrra lähenemine sisendväärtusele nõuaks rohkem samme ning siluv toime oleks suurem.

2.4.10 Mõõteseadmete mooduli kokkuvõte

Mõõteseadmete ja väljundite moodulil toimub väljundite pingete ja voolude digitaalne mõõtmine, andmeanalüüs ja ruutkeskmiste väärtuste arvutamine. Moodul on ehitatud perforatsioonil makettplaadile (Joonis 2.36) ning sellele paiknevad aparatuuri väljundite väärtuste mõõtmiseks vajalikud andurid ja andmete analüüsimiseks ning väljastamiseks vajalikud integraalskeemid. Näidikutena kasutatavatele mõõteriistadele on teostatud mõõtepiirkondade arvutus ja valik. Kuna mõõtepiirkonnad ei ole teostatud andurite võimendite abil, vaid tarkvaraliste arvutustega, on väiksemates mõõtepiirkondades loovutatud andurite eraldusvõimet. See on lubatav, kuna andurite resolutsioon on 1024 võimalikku erinevat väärtust, samal ajal kui näidikute skaaladel on 100 eristatavat väärtust, seega andurite eraldusvõime on oluliselt suurem näidikute omast. Lisaks näidiku ja anduri eraldusvõime erinevusele on teine argument nimetatud disainivalikule see, et tegemist ei ole mõõteseadmega, vaid toiteallika väljundparameetrite näidikuga, ehk mõõteseadmete disainil ei olnud põhieesmärgiks maksimaalne eraldusvõime kõigis piirkondades, vaid võime näidata mõõdetud suurusi näidiku skaalal ka väikeste suuruste korral.



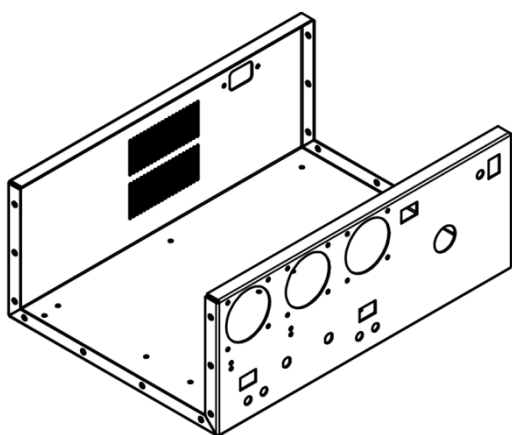
Joonis 2.36: Mõõteseadmete ja väljundite moodul. Fotol on puudu lineaarregulaatori U1 radiaator ja pildil on näha terminalplokkile X3.7 katsetuste ajaks ühendatud nupp

2.5 Kere

Selles alampeatükis on kirjeldatud toiteallika kere peamisi detaile ning kere kui terviku disaini.

2.5.1 Väline kest

Väline kest on disainitud kahes osas. Aparaaadi kõik põhiosad kinnituvad kesta alumisele poolmele, mille osad on ka esipaneel ja tagasein. Korpus suletakse kaanega, mille osad on ka külgeseinad. Välise kesta detailid on valmistatud 1,0 mm paksusega külmuvaltsitud lehtterasest DC01.



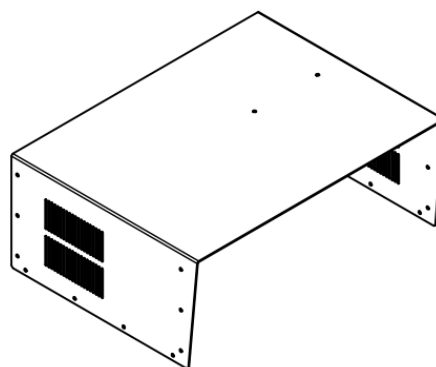
Joonis 2.37: Väljalõige jooniselt "Kere põhjakoost": kere põhjapleki isomeetiline vaade

Korpuse põhjadetail (Joonis 2.37) on ülespainutatud esimese ja tagumise seinaga. Detailis on avad tugijalgade ning aparaa-diseste kronsteinide kinnitamiseks ja väljalõiked esipaneeli näidikute ja märgu-lampide, toitejuhtme pesa, lülitite, väljundpesade ja regulernuppude jaoks. Põhjadetaili külge kinnituvad kõik aparaa-disesed osad.

Korpuse põhjadetaili tagaseinas on jahutusõhu liikumise võimaldamiseks ventilatsioonipilud. Ventilatsioonipilude laius on 2 mm.

Korpuse põhjadetaili kõigi tahkude äärtes on 10 mm kõrgused tagasipainutatud servad. Tagasipainded on vajalikud suurte tahkude jäigastamiseks ning nendes on avad neetmutrite jaoks. Neetmutritesse käivad korpuse kaane kruvid.

Korpuse kaas (Joonis 2.38) on aparaa-di pealne kate. Kaanel on kaks allapoole painutatud tahku, mis moodustavad aparaa-di küljed. Mõlemas küljes on ventilatsioonipilud – aparaa-di vasakus küljes elektroonikamoodulite ja paremas küljes trafo jahutusõhu liikumise võimaldamiseks. Kaane pealne tahk eendub aparaa-di esipaneeli tasapinnast nii, et tekib

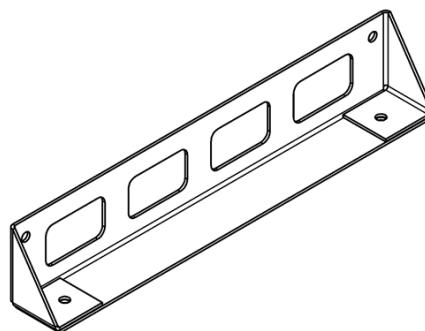


Joonis 2.38: Väljalõige jooniselt "Korpuse kaas": kaane isomeetiline vaade

mööteriistu pealtpoolt kattev serv. Külgtahkude eesmised servad on veidi kaldu, kuna nad algavad allservas aparadi esipaneeli tasandi lähedalt ja kerkivad sujuvalt esipaneeli tasandist eemale kuni ülemise nurgani, kus külgtahkude ja pealmise tahu eesmised servad kohtuvad. Mööda kaane külgtahkude servi kulgevad kinnitusavade read, läbi mille keeratakse kaas põhitahu külge. Kaane pealmises tahus on veel kaks kinnitusava – nende avade all paikneb trafo kronstein, mis suurema jäikuse tagamiseks kinnitatakse lisaks põhjale ka kaane külge.

2.5.2 Trükkplaatide kandurid

Trükkplaatide kandurid (Joonis 2.39) on kolm ühesugust kronsteini, mis on kinnitatud aparadi põhjale. Trükkplaadikandurid on painutatud 1 mm paksusest külmaltsitud lehtterasest DC01. Trükkplaadikanduritel on põhitahule kinnitamiseks kinnitusavad, mis lisaks kanduri põhiservale läbivad ka külgmiste tugevdusservade sissepainutatud flantse. Niimoodi seovad kinnituskruvid kronsteini tugevdusküljed põhja külge ja on tagatud kronsteini jäikus. Kronsteini püstseinas on kinnitusavad trükkplaatide kinnitamiseks. Püstseinast on ka välja lõigatud ristkülikukujulised avad, et võimaldada jahutusõhu liikumist elektroonikamoodulite juures.



Joonis 2.39: Väljalõige jooniselt "Trükkplaadi kandur": Trükkplaadi kanduri isomeetiline vaade

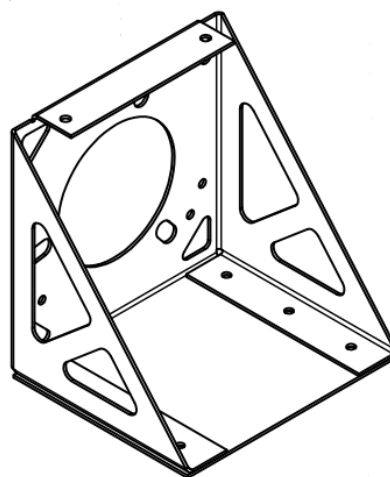
Trükkplaadikandurite vahele on ehitatud üksteise külge keeratud distantspukside tornid (nähtavad „Aparaadi koostujoonisel“). Pukside tornid paiknevad horisontaalasendis ja nende tornide küljes on elektroonikamoodulite vertikaalses asendis trükiplaadid. Alumised distantspuksitornid kinnituvad otstes ja keskel trükkplaadikandurite külge. Ülemised distantspuksitornid kinnituvad ainult trükkplaatide ülemiste kinnitusavade külge ja seovad trükkplaadid ka ülalt omavahel kokku. Nelja distantspuksitorniga kokku keeratud trükiplaatidest moodustub aparadi elektroonikamoodulitest ühte seotud koost. Kronsteinid kinnitavad elektroonikakoostu aparadi põhjale.

2.5.3 Trafo kandur

Trafo kandur (Joonis 2.40) on painutatud 1,5 mm paksusega külmaltsitud lehtterasest DC01. Trafo kandur on tehtud paksemast materjalist kui ülejäänud kereplekid, kuna trafo on kõige raskem komponent aparadi sees (trafo kaalub 3,5 kg).

Kuna trafo moodustab ligikaudu poole aparadi massist (aparaat kaalub 8 kg) ja trafo kinnitamiseks ainsad ühendused on trafo põhjaflantsi küljes, on ka trafo kandur jäigastuskülgedega, mis on disainipõhimõttelt sarnased trükkplaadikanduritele. Trafo kanduril on tugevdusküljed ning külgede allservas on sissepoole painutatud kinnitustahud. Kanduri põhitahus ja külgede kinnitusflantsides on kuus läbivat kinnitusava, mille abil kinnitatakse trafo kandur aparadi põhja külge. Kinnituskruvid seovad trafo kanduri tugevduskülgede kinnitus-tahud kanduri põhitahu külge ja muudavad kronsteini jäigaks. Kanduri tugevduskülgedes on väljalõiked jahutusõhu liikumise võimaldamiseks.

Trafo kinnitub oma põhja-flantsiga kronsteini püst-tahule, milles on välja-lõiked trafo jalgade jaoks, trafo käepideme telje kinnitusmutrile ligipääsemiseks, trafo põhjaflantsi kinnitamiseks ja jahutusõhu liikumiseks. Kronsteini püsttahu ülaserivas on aparadi kere mõistes ettepoole painutatud jäigastusserv, mis on vajalik paljude väljalõigetega püsttahu jäigastamiseks. Püsttahu jäigastusserva sees on kaks ava neetmutrite jaoks, millesse kinnituvad aparadi kaane pealmises tahu kinnitusavade kaudu kaane kruvid. Trafo kronsteini kinnitamine nii põhja kui kaane külge võimaldab kronsteini maksimaalset jäikust.



Joonis 2.40: Väljalõige jooniselt "Trafo kronstein": trafo kanduri isomeetiline vaade

2.5.4 Kere detailide valmistamine

Kere detailid telliti ettevõttelt Fractory, kes tegeleb klientide tellimuste vahendamisega erinevatele metallitööstusettevõtetele. Aparaaadi detailid on laserlõigatud ja painutatud. Detailid telliti värvimata kujul, selleks et võimalikult lühendada detailide tarneaega. Sellega üritas töö autor kindlustada, et töö ajakavas ainult poolteist kuud enne valmimistähtaega esitatud tellimus õigeaegselt kohale jõuaks. Reaalne tarneaeg detailidele oli 9 päeva ja selgus, et detailid oleks võinud tellida värvituna.

Kuna detailid telliti haljana, pidi autor detailid omal käel ära värvima. Selleks kasutati aerosoolpurgis roostekaitsevärvi tooniga RAL7035. Värvimise töökoha sisseseadet kujutab Joonis 2.41. Lisaks värvimisele oli vaja kere detaile kohati ka mehaaniliselt töödelda. Mõningate kinnitusavade asukohti korrigeeriti avade suuremaksviilimise või -puurimise teel.

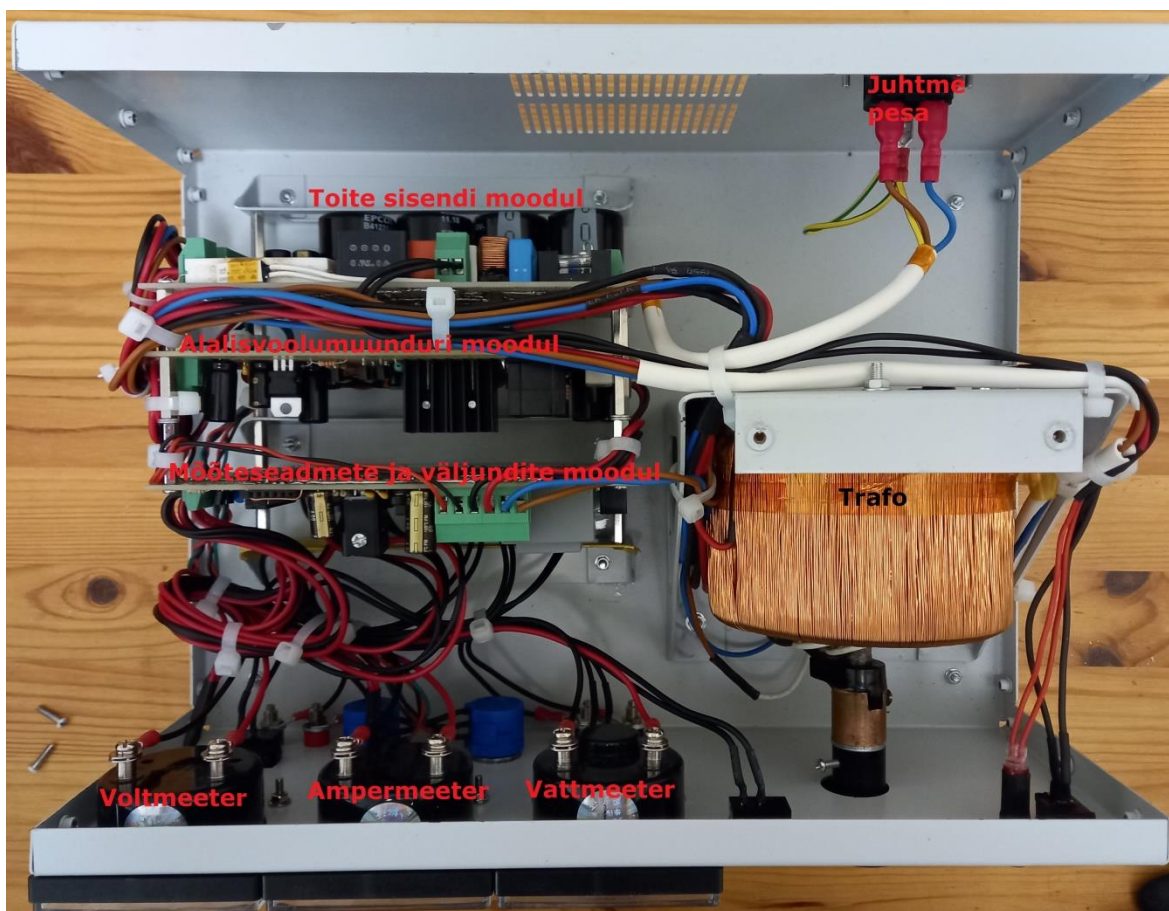


Joonis 2.41: Kere detailid värvimise ajal. Detailid on riputatud lakke, et võimaldada ligipääsu iga detaili kõigile külgedele üheaegselt

2.5.5 Kere koost

Kaitseaste: Kuna ventilatsioonipilud on suurimad avad, mis aparadi kesta disainis leiduvad, siis vastab kere IEC 60529 sissepäästukaitse tasemele 3. Kuna korpuse ülapinnal ei ole ühtegi ava, mis seadme täieliku kompleksuse korral on avatud, siis vastab kere ka IEC 60529 vee sissetungimise kaitsetasemele 1. Seega vastab kere disain kaitseastmele IP 31 (IP 31 – ohtlikele osadele ei saa väljastpoolt ligi pääseda 2,5 mm läbimõõduga esemega, seade on kaitstud vertikaalselt tilkuva vee eest [28]).

Seadmete paigutus korpuse sees: Aparadi eestvaates paikneb elektroonikamoodulite koost aparadi keres vasakul poolel ning trafo paikneb aparadi kere eesmises paremas nurgas. Toitejuhtme pesa on trafo taga, aparadi tagaseina ülemises paremas nurgas. Valmis aparadi peamiste komponentide paigutus on näidatud joonisel „Aparadi koost“. Seesmisel koostud on kinnitatud põhja külge. Joonis 2.42 on foto seadmete paigutuse kohta reaalse aparadi sees. Elektroonikamoodulite kinnitusedetailide ja trafo kronsteini asukohta keres näitab täpsemini graafilise osa joonis „Aparadi koostujoonis“.



Joonis 2.42: Seadmed valmis aparadi sees

Esipaneel: Joonis 2.43 on foto aparadi esipaneelist. Esipaneeli seadmete täpne paigutus on kirjeldatud joonisel „Aparaadi koostujoonis“. Aparaadi esipaneelil on kolm osutmõõteriista, aparadi juhtimiseks vajalikud lülitid ja reguleernupud ning kasutaja informeerimiseks vajalikud indikaatorlambid. Esipaneeli mõõteriistade skaalasid ei ole modifitseeritud, seetõttu on nii ampermeetri kui voltmeetri skaalal voltmeetri tähised, ning vattmeetri skaalal ampermeetri tähis. Mõõteriistade korpused on avatavad ja numbrilaud eemaldatavad. Numbrilaudade modifitseerimiseks on võimalik välja printida uued õigete jaotise suuruste ja mõõteriista tähistega skaalad, ning need numbrilaudadele lisada. Kasulik modifikatsioon oleks ka esipaneelil tähistada lülitid ja märgulambid kirjetega nende funktsioonide kohta.



Joonis 2.43: Vaade valmis aparadi esipaneelile

tähelepanekud: Aparaadi eesmisest paremast nurgast ja tagumisest vasakust nurgast tehud fotodest koosneb Joonis 2.44. Näha on suletud kestaga aparadi. Aparaadi korpuse kaane plekk on valepidi painutatud ja seetõttu asuvad pealised kinnitusavad elektroonikamoodulite, mitte trafo kronsteini kohal. Samal põhjusel on külgmised ventilatsioonipilud valedes

kohtades: vasaku külje ventilatsiooniavad paiknevad elektroonikamoodulitest eespool ja parempoolsed ventilatsiooniavad trafost tagapool. Lahtiste kinnitusavade läbimõõt on 3,5 mm, seetõttu kere kaitseaste defektse kaanega on IEC 60529 järgi IP 20.



Joonis 2.44: Valmis aparadi nurgavaated

2.5.6 Täiustusvajadused kere juures

Aparaat kaalub kokku ligikaudu 8 kg. Aparaadi kavandamise ja disaini jooksul on kahe silma vahele jäetud seadme kaasaskantavus – seadmel on ainsad tugijalad põhja all ning puudub kandesang. Aparaadi esipaneeli nuppudele ja mõõteriistadele ei ole transpordi ajaks mingit kaitset. Nende puudujääkide kõrvaldamiseks on vaja disainida täiendavaid detaile.

Kaasaskantavuse hõlbustamiseks on vajalik kandesang. Ilmselt on kõige mõistlikum disain sarnane tüüpilisele ostsiloskoopide ja töölaua multimeetrite käepidemele, mis kinnitub seadme kesta külgedele hingedega ning on pööratav esipaneeli ette. Esipaneeli ja käepideme vahele saab transpordi ajaks kinnitada esipaneeli kattekaane, mis varjab esipaneeli seadmeid.

Sellised osad muudavad seadme transpordi ajaks praktiliselt kohvriks. Sellise sangaga disainil peaks olema ka seadme tagaseinal tugijalad, mis võimaldavad kohvri mahatoetamist püstasendis tagaseina peal. Et võimaldada seadme hoiustamist ja ka kasutamist püstasendis, võiks tagaseina tugijalad olla piisavalt pikad, et jätta ruumi aluspinna ja seadme tagaseina vahele toitekaabli painderaadiuse arvestamiseks ja töö ajal jahutusõhu liikumiseks läbi tagaseina ventilatsioonipilude.

3 VALMIS APARAADI ANALÜÜS

Selles peatükis uuritakse valmis toiteallika vastavust püstitatud disainikriteeriumidele. Analüüsi kokkuvõttena esitatakse hinnang seadme vastavusele disainikriteeriumidele.

3.1 Aparaadi vastavus disainikriteeriumidele.

Disainikriteeriumites on püstitatud aparadi kohta nõuded, millele aparaat peab võimalikult lähedaselt vastama. Aparaat peab töötama võrgutoitel 230 V, 50 Hz, käivitusvool peab olema piiratud alla kolmekordse nimivoolu ning toiteühendusel peavad olema häiringufilter ja liigpingepiirik. Toiteallikal peab olema väljalülitatav ning vahemikus 0 V kuni 24 V reguleeritava väljundpingega ja vahemikus 0 A kuni 3 A reguleeritava voolupiirikuga alalisvoolu väljund. Toiteallikal peab olema väljalülitatav ning vahemikus 0 V kuni 230 V reguleeritava väljundpingega ja maksimaalselt 1 A väljundvoolu efektiivväärtusega vahelduvvoolu väljund. Toiteallika väljundid peavad olema elektrivõrgust isoleeritud. Aparaat peab olema varustatud mõõteriistadega, millega saab jälgida väljundite voolu, pinget ja võimsust. Aparaadi osad, mis võivad kasutamise käigus üle kuumeneda, peavad olema varustatud kaitsetermostaatidega, mis aparadi koormusest vabastavad. Aparaadi toitel peab olema lühisekaitse, mis aparadi rikke korral lahutab seadme toitest. Toiteallika väljundid peavad olema kaitstud ülekoormuse ja lühistumise eest. Aparaadi korpus peab olema disainitud vastama vähemalt IEC IP20 kaitseastmele.

3.1.1 Toite sisend

Aparaati toidetakse 50 Hz nimisagedusega elektrivõrgust nominaalse toitepingega 230 V.

Käivitusvool: käivitusvoolu piiramiseks on kasutusel sujuvkäivitusahel, mis piirab maksimaalse käivitusvoolu alla 3 A. Aparaadi maksimaalne tarbitav vool on 1,5 A, seega käivitusvool on piiratud umbes kahekordse nimivooluni.

Toite silumine: toite sisendil on häiringufilter aparadist võrku siirduvate elektromagnetiliste häiringute piiramiseks. Kasutatud on ka varistoridest koosnevat liigpingepiirikut.

Lühisekaitse: Aparaadisisesel rikke korral tekkiva lühisvoolu piiramiseks on võrgu toitel kaitsmed. Kaitsmetega eraldatakse toitest nii faasi- kui neutraalijuht, selleks et tagada kaitsme parimat toimimist.

Toite sisendile esitatud kriteeriumid on täidetud.

3.1.2 Väljundid

Alalisvoolu väljundi parameetrid: Alalisvoolu väljundi pinget saab reguleerida vahemikus 1,5 V kuni 24 V. Pinge alumine piir erineb esitatud kriteeriumist muunduri tagasisideahelate ehituslike iseärasuste tõttu. Väljundi voolupiirikut saab reguleerida vahemikus 0 A kuni 3 A. Väljundit toidetakse impulsstoitemuunduriga, mida omakorda toidetakse trafo sekundaarmähise külge ühendatud alaldiga. Alalisvoolu väljund on galvaaniliselt eraldatud elektrivõrgust ja vahelduvvoolu väljundist. Alalisvoolu väljundi ühenduspesasid on võimalik muundurist täielikult eraldada relee abil, mida juhitakse esipaneeli lülitiga.

Vahelduvvoolu väljundi parameetrid: Vahelduvvoolu väljundi pinget saab reguleerida vahemikus 6 V kuni 230 V. Pinge alumine piir erineb esitatud kriteeriumist, trafo ümbermähkimisel tehtud valearvestuse tõttu. Vahelduvvoolu väljund saab toite trafo sekundaarmähiselt, olles ühendatud mähise ühe otsa ja muudetava asukohaga kontaktratta vahele. Vahelduvvoolu väljund on galvaaniliselt eraldatud elektrivõrgust ja alalisvoolu väljundist. Vahelduvvoolu väljundi ühenduspesasid saab trafo sekundaarmähisest täielikult eraldada ja välja lülitada relee abil, mida juhitakse esipaneeli lülitiga.

Mõlema väljundi pinge parameetrid erinevad mõnevõrra esitatud kriteeriumidest ja seetõttu väljundid ei vasta täielikult kriteeriumidele. Erinevused on tingitud väljundite saavutamiseks ehitatud muunduri ja ümbermähitud trafo ehituslikest iseärasustest. Kuna teised kriteeriumid, nende seas ohutuse seisukohast püsitatud nõuded, on täidetud, siis võib väljundeid lugeda disainikriteeriumitele enamjaolt vastavaks.

3.1.3 Mõõteseadmed

Aparaadi esipaneelil on kolm näidikutena kasutatavat osutmõõteriista. Aparaadi mõõteseadmete moodulil paikneb mikrokontroller, mis jälgib aparadi väljundite parameetreid, arvutab esipaneeli lüliti abil valitud väljundi kohta pinge ja voolu efektiivväärtused ning võimsuse (vahelduvvoolu väljundi jälgimise korral aktiivvõimsuse). Mõõteriistadelt mugavalt loetava väärtuste vahemiku suurendamiseks on tarkvaraliselt teostatud mõõteriistade skaala kasutamine erinevate mõõtepiirkondadega. Mõõtepiirkondade valimine toimub automaatselt ja piirkona valikutest antakse kasutajale teada märgulampidega voltmeetri ja ampermeetri all. Vattmeetri piirkond on igal piirkondade kombinatsioonil voltmeetri ja ampermeetri piirkondade korrutis, ning selle kohta eraldi märku ei anta.

Mõõteseadmed on olemas ja mõlemad väljundid on jälgitavad, seega mõõteseadmestik vastab disainikriteeriumidele.

3.1.4 Kaitseahelad

Aparaadi toitel on peakaitsmed aparaadisisesel rikke tekkimisel aparaadi võrgust eraldamiseks. Peakaitsmed on 1,5 A nimivooluga aeglase rakendumiskarakteristikuga sulavkaitsmed, mis rakenduvad kui aparaadi voolutarve ületab maksimaalset nimivoolu.

Alalisvoolu väljundi impulssmuundur on ühendatud alaldiga läbi 3 A nimivooluga sulavkaitsmete. Need kaitsmed rakenduvad muunduri sellise rikke korral, mille tagajärjel muundur lühistub ise või ei ole võimeline väljundvoolu piirama. Alalisvoolumuunduri võimsuskraad on piisavalt väikesed, et muunduri komponendid normaalses kasutuses üle kuumeneda ei saa – muunduri disain on selline, et ettenähtud väljundparameetrite juures muundur ülekoormuskaitset ei vaja. Muunduri rikke tõttu võimalik väljundparameetrite ületamine saab muundurit üle koormata, kuid selle eest kaitsevad muunduri alaldi kaitsmed. Normaalselt töötaval muunduril on väljundvoolu piirik, mis kaitseb muundurit nii väljundi ülekoormamise eest kui väljundi lühistumise eest. Kuna lühise- ja ülekoormuskaitsemena töötava tagasisideahela toimimine on automaatne, ei vaja kaitseahelate taastamine korpuse avamist. Alaldi kaitsmete vahetamist nõuavad ainult olukorrad, mis on tingitud muunduri rikkest ja nõuavad nii või teisiti kesta avamist ja muunduri defekteerimist.

Vahelduvvoolu väljundil on 1 A nimivooluga aeglase rakendumiskarakteristikuga sulavkaitse, mis on ette nähtud väljundi kaitsmiseks ülekoormuse ja lühise eest. Kuna vahelduvvoolu väljundil ei ole voolupiirikut, on suur tõenäosus, et kaitse hakkab kasutamise käigus sageli läbi põlema erinevate kasutaja tehtud valearvestuste tõttu katsetatavate seadmete aparaadi külge ühendamisel. Seetõttu on lisaks sulavkaitsmele rakendatud tarkvaraliselt väljundi automaatne väljalülitus ülekoormuse korral. Automaatne väljalülitus piirab kaitsme normaalset tööfunktsiooni ainult lühisekaitsele, kuid juhul kui mikrokontroller ei tule toime väljundi välja lülitamisega mõõduka ülekoormuse korral, rakendub ka sulavkaitse. Väljundi lühisekaitse vajab taastamiseks vahetamist, seega nõuab korpuse avamist. Ülekoormuskaitse on väljundi juhtlüliti abil taastatav ja seetõttu ei nõua korpuse avamist.

Trafo ülekoormuskaitse on teostatud trafo temperatuuri jälgiva termostaadiga. Kui termostaat tuvastab trafo ülekuumenemise, mis on võimalik vahelduvvoolu ja alalisvoolu väljundite üheaegsel tugeval koormamisel, siis termostaat lülitab välja aparaadisisesel tööloa signaali. Tööloa kaotamisel lülitub alalisvoolu muundur välja.

Mõõteseadmete ja väljundite moodul lülitab välja aparadi väljundid. Niimoodi vabastatakse ülekuumenenud trafo koormusest ja aparaat jääb tööle ilma koormuseta, lastes trafol jahtuda.

Kõik disainikriteeriumides nõutud kaitseahelad on rakendatud – aparadi sees on kummagi väljundi ees kolmeastmeline kaitseahel väljundi ülekoormamise vältimiseks ja lühise eest kaitsmiseks.

3.1.5 Kere kaitseaste

Aparadi korpus on disainitud nii, et suurimad avad, mis korrektselt suletud korpusel on, kaitsevad kasutajat aparadi korpuse sees paiknevatele ohtlikele osadele ligipääsemise eest suurema kui 2,0 mm läbimõõduga esemega. Kuna kesta ei ole disaini järgi ühtegi pealispinnale avatud ava, võib eeldada, et vertikaalselt korpusele tilkuv vesi kesta sisse ei pääse. See tähendab vastavust IEC 60529 kaitseastmele IP 31, mis määrab sissetungimisvõimelise eseme maksimaalseks läbimõõduks 2,5 mm ja nõuab kaitset vertikaalselt tilkuva vee sissetungimise eest. Kere kaitseastmega on ületatud aparadile esitatud nõudeid.

3.1.6 Disaininõuetele vastavuse kokkuvõte

Kõik nõutud juhtseadmed ja mõõteseadmed on olemas. Esineb kõrvalekaldeid väljundparameetritele esitatud nõuetest, kuid neil ei ole suurt mõju seadme kasutatavusele. Aparadi disainil on arvestatud kõigi nõuetega kaitseahelatele ja lisatud vajalikud skeemiosad nõuete täitmiseks. Kere on disainitud kõrgemale kaitseastmele kui disainikriteerium nõuab. Kokkuvõttes aparadi omadused vastavad enamusele disainikriteeriumides esitatud nõuetest.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö teema valiku ajend oli autori isiklik vajadus töös kirjeldatud seadme järele. Lisaks vajadusele oli ajendiks ka autori huvi jõuelektroonika valdkonna ja üldisemalt elektroonika disaini vastu, ning soov laiendada ning kinnistada teadmisi nendes valdkondades praktilise kogemuse abil.

Töö esimeses faasis seati kriteeriumid sellele, ning millised peavad olema toiteallika väljundid, millised peavad olema väljundite voolu ja pinge parameetrid. Seati ka kriteeriumid sellele, missugused kaitseahelad seadmes olema peavad. Vajalikust funktsionaalsusest lähtuvalt kavandati seadme üldine moodulite koosseis ja kirjeldati, mis funktsioone peavad moodulid täitma, selleks et täita kõiki disainikriteeriume.

Töö teine faas oli moodulite elektriahelate disain. Teise etapi käigus disainiti eelnevalt tuvastatud seadmesisese funktsionaalsuse jaoks vajalikud elektriahelad ja paigutati need seadme elektroonikamoodulitele. Disainifaasi tulemusena kujundatud elektriahelate kirjeldusest ja toimimise analüüsist koosneb enamuse lõputöö sisu. Disainifaasi ajal otsiti ka aparadi sees kasutamiseks sobiv trafo toorik ja uuriti selle parameetreid, et seda aparadis kasutamiseks ümber mähkida.

Töö kolmas faas oli aparadi reaalne ehitamine. Selles faasis toimus elektroonikamoodulite prototüüpide ehitamine, trafo ümbermähkimine ja kõigi teiste seadme osade valmistamine. Töö kolmanda faasi jooksul disainiti ja telliti ka seadme kere. Kõik aparadisisesed moodulid ehitati perforatsiooniga makettplaatidele. Moodulite valmistamise järel paigaldati ümbermähitud trafo koos kogu seadme elektroonikaga aparadi kere sisse ja koostati seadme prototüüp.

Töö käigus valminud aparaat vastab enamusele töö algfaasis esitatud disainikriteeriumidele. Autori hinnangul ei mõjuta aparadi juures esinevad puudujäägid oluliselt seadme kasutamist ega ohutust, seega töö täitis oma eesmärgi.

SUMMARY

The reason behind the choice of this thesis' topic was the author's need for the kind of device designed in this work. Additionally, work on this topic was driven by the author's personal interest in the field of power electronics and electronics design in general. The author wished to broaden their knowledge about the aforementioned fields through practical experience.

In the first phase of this work, design criteria were set for what kind of outputs the power supply must have and for the current and voltage parameters of the power supply's outputs. In addition to that, criteria were set for what kind of internal protection circuits the device needs. According to the necessary functionality of the device, a general set of required modules was determined. Every module's functions were identified so that all of the design criteria for the device could be met.

The second phase of this thesis was the design of electronic circuits of each of the power supply's modules. Circuits for providing all of the functionality demanded by design criteria were designed and located on the circuit boards of the device's modules. The descriptions and working principle analysis of the electronic circuits designed in the second phase of this thesis comprise most of this work's content. During the design phase, a line transformer suitable for modification for use in the device was found. The transformer's parameters were examined in order to wind additional windings necessary for compliance with the device's design criteria.

The third phase of the work was construction of the power supply's electronic circuits, rewinding of the transformer and preparation of all other parts of the device. During this phase the enclosure of the device was also designed and ordered. After the completion of all the power supply's modules, the rewound transformer was installed into the device's enclosure along with all the electronics modules. In this phase, a prototype of the designed power supply was completed.

The device designed and built in this work complies with most of the design criteria set in the planning phase. In the author's opinion, the shortcomings present in the device's design do not significantly affect the usability and safety of the device, therefore this thesis has fulfilled its purpose.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] *Лабораторные автотрансформаторы регулировочные типов ЛАТР-1М и ЛАТР-2М*, Инструкция по эксплуатации, Электроприбор 1973.
[Võrgumaterjal] Saadaval:
http://dev.a1mc.ru/misc/electr_%26_arduino_prog/datasheet/latr_2.pdf
[Kasutatud: 10.04.2021]
- [2] Autotrafo LATR-2M kirjeldus ettevõtte Standart-M kodulehel.
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<http://standart-m.com.ua/elektroizmeritelnoe-oborudovanie/transformatory/latr-2m>
[Kasutatud: 10.04.2021]
- [3] I. Gottlieb, *Practical transformer handbook*, Oxford: Newnes, 1998, lk 5
[Kasutatud: 10.04.2021]
- [4] *Film capacitors - EMI suppression capacitors*, EPCOS 2018, lk 3...4
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/530772/73cd72e2e0c87913fbca16a2c9b597bb/pdf-emigeneralstandard.pdf>
[Kasutatud: 25.04.2021]
- [5] *Technical data sheet: P295BE471M500A*, Kemet 2006
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://api.kemet.com/component-edge/download/specsheet/P295BE471M500A.pdf>
[Kasutatud: 25.04.2021]
- [6] *Technical data sheet: P295BQ472M500A*, Kemet 2006
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://api.kemet.com/component-edge/download/specsheet/P295BQ472M500A.pdf>
[Kasutatud: 25.04.2021]
- [7] *Technical data sheet: PHE840MY6470MD14R06L2*, Kemet 2006
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://api.kemet.com/component-edge/download/specsheet/F840DH474M275C.pdf>
[Kasutatud: 25.04.2021]

- [8] Würth Elektronik filterdrosselite kataloog, Würth Elektronik 2021
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://www.we-online.com/catalog/en/WE-CMB#744822233>
[Kasutatud: 25.04.2021]
- [9] *PHE840M EMI suppressor, class X2, metallized polypropylene filter capacitors*, Kemet
[Võrgumaterjal] Saadaval:
https://content.kemet.com/datasheets/F3294_PHE840M.pdf
[Kasutatud: 25.04.2021]
- [10] *EMC filters – General technical information*, TDK 2014, lk 29
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/528632/64440358c2e92def9ca9d86aeb3f0c85/pdf-general.pdf>
[Kasutatud: 25.04.2021]
- [11] *WE-CMB Common Mode Power Line Choke datasheet*, Würth Elektronik 2021
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://www.we-online.com/catalog/datasheet/744822233.pdf>
[Kasutatud: 25.04.2021]
- [12] *LM 217, LM 317 1.2 V to 37 V Adjustable voltage regulators*, Datasheet, ST Microelectronics 2019, lk 7
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/lm317.pdf>
[Kasutatud: 29.04.2021]
- [13] *LM2574x SIMPLE SWITCHER 0.5 A step-down voltage regulator*, Datasheet, Texas Instruments 2020, lk 13
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2574.pdf?ts=1619686161585>
[Kasutatud: 29.04.2021]
- [14] *BC546B, BC547A, B, C, BC548B, C Amplifier Transistors*, Datasheet, ON Semiconductor 2012
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/bc546-d.pdf>
[Kasutatud: 29.04.2021]

- [15] *IRF5210PbF HEXFET power MOSFET*, Datasheet, International Rectifier 2004
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://www.infineon.com/dgdl/irf5210pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015355e3576b198b>
[Kasutatud: 29.04.2021]
- [16] *BC556B, BC557A, B, C, BC558B Amplifier Transistors*, Datasheet, ON Semiconductor 2007
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/bc556b-d.pdf>
[Kasutatud: 29.04.2021]
- [17] *BC337, BC337-25, BC337-40 Amplifier Transistors*, Datasheet, ON Semiconductor 2013
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/bc337-d.pdf>
[Kasutatud: 29.04.2021]
- [18] *BC327, BC327-16, BC327-25, BC327-40 Amplifier Transistors*, Datasheet, On Semiconductor 2011
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/bc327-d.pdf>
[Kasutatud: 29.04.2021]
- [19] *MBR1635 through MBR16150 Schottky Barrier Rectifier*, Datasheet, Taiwan Semiconductor 2013
[võrgumaterjal] Saadaval:
https://www.taiwansemi.com/assets/uploads/datasheet/MBR1635%20SERIES_J13.pdf
[Kasutatud 29.04.2021]
- [20] *WE-HCF Litz Wire SMT High Current Inductor*, Datasheet, Würth Elektronik 2020
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://www.we-online.de/katalog/datasheet/74437429203101.pdf>
[Kasutatud: 29.04.2021]
- [21] *ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P megaAVR®*, Datasheet, Microchip 2020
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf>
[Kasutatud: 01.05.2021]

- [22] *MCP3004/3008 2.7V 4-Channel/8-Channel 10-Bit A/D Converters with SPI Serial Interface*, Datasheet, Microchip 2008
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21295d.pdf>
[Kasutatud: 01.05.2021]
- [23] *MCP4901/4911/4921 8/10/12-Bit Voltage Output Digital-to-Analog Converter with SPI Interface*, Datasheet, Microchip 2010
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22248a.pdf>
[Kasutatud: 01.05.2021]
- [24] *ACX Series • High Accuracy Current Transformers*, Datasheet, Talema 2018
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://talema.com/wp-content/uploads/datasheets/ACX.pdf>
[Kasutatud: 01.05.2021]
- [25] *CSLT Series Miniature, Open-Loop Current Sensors*, Datasheet, Honeywell 2012
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-cslt-series-product-sheet-005862-2-en.pdf>
[Kasutatud: 01.05.2021]
- [26] *TLC220x, TLC220xA, TLC220xB, TLC220xY Advanced LinCMOS low-noise precision operational amplifiers*, Datasheet, Texas Instruments 1997
[Võrgumaterjal] Saadaval:
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc2201.pdf?ts=1620646881031&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTLC2201
[Kasutatud: 01.05.2021]
- [27] *TLE214x, TLE214xA EXCALIBUR LOW-NOISE HIGH-SPEED PRECISION OPERATIONAL AMPLIFIERS*, Datasheet, Texas Instruments 1997
[Võrgumaterjal] Saadaval:
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tle2141.pdf?ts=1619911623192&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTLE2141
[Kasutatud: 01.05.2021]
- [28] *Ingress protection (IP) ratings guide*, kaitseastme hindamise juhend IEC kodulehel.
[Võrgumaterjal] Saadaval:
<https://www.iec.ch/ip-ratings>
[Kasutatud: 02.05.2021]

LISA 1: Mikrokontrolleri programmi lähtekood

```
// Title: Program for lab power supply measurements board
// Description: This program contains the communications
//              and calculation logic required for mea-
//              suring and displaying output values of
//              the power supply and interfacing with front
//              panel controls and indicators.
// Date: April.2021
// References: This program utilises the multiMap() interpolation
//              function created by Arduino.cc user robtillaart.
//              https://playground.arduino.cc/Main/MultiMap/
//              The function has been modified to work with variables
//              saved in PROGMEM.
//
//              This program utilises the arduino SPI.h library
//              https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI
//
// Author: Andres Pärnpuu

#include <SPI.h>
#include <avr/pgmspace.h>

#define debug 0
#define plot 0

#define calcDelay 2000
#define IACoutMax 250 // about 1.1 A

// Input signal connections //port pin //atmega pin
const byte ACmeasure = 2; //PD2 4
const byte ACon = A1; //PC1 24

// Output signal connections //port pin //atmega pin
const byte ACallow = A0; //PC0 23
const byte lampPinV1 = 4; //PD4 6
const byte lampPinV2 = 3; //PD3 5
const byte lampPinA1 = 6; //PD6 12
const byte lampPinA2 = 5; //PD5 11

// SPI connections //port pin //atmega pin
const byte SSADC = 10; //PB2 16
const byte SSVm = 8; //PB0 14
const byte SSAm = 7; //PD7 13
const byte SSWm = 9; //PB1 15

//SPI connection settings init
SPISettings ADCSetting(3600000, MSBFIRST, SPI_MODE0);
SPISettings DACSetting(20000000, MSBFIRST, SPI_MODE0);

//Raw ADC data arrays
int IDC[200];
int IAC[200];
int UDC[200];
int UAC[200];
```

```

//CALIBRATION
//AC sensor midpoints
const word IACmidpoint = 510;
const word UACmidpoint = 486;

//Sensor maps

const int UDCmap[99] PROGMEM =
{ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900,
  1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900,
  2000, 2100, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700, 2800, 2900,
  3000, 3100, 3200, 3300, 3400, 3500, 3600, 3700, 3800, 3900,
  4000, 4100, 4200, 4300, 4400, 4500, 4600, 4700, 4800, 4900,
  5000, 5500, 6000, 6500, 7000, 7500, 8000, 8500, 9000, 9500,
  10000, 10500, 11000, 11500, 12000, 12500, 13000, 13500, 14000, 14500,
  15000, 15500, 16000, 16500, 17000, 17500, 18000, 18500, 19000, 19500,
  20000, 20500, 21000, 21500, 22000, 22500, 23000, 23500, 24000, 24500,
  25000, 25500, 26000, 26500, 27000, 27500, 28000, 28500, 29000};

const int UDCsensormap[99] PROGMEM =
{ 2, 5, 8, 12, 15, 19, 22, 26, 29, 33,
  36, 40, 43, 47, 50, 54, 57, 60, 64, 67,
  71, 74, 78, 81, 85, 88, 91, 95, 98, 102,
  105, 109, 112, 115, 119, 122, 126, 129, 132, 136,
  139, 143, 146, 150, 153, 156, 160, 163, 167, 170,
  174, 190, 207, 224, 241, 258, 275, 292, 309, 326,
  343, 359, 376, 393, 410, 427, 444, 461, 478, 495,
  512, 529, 546, 563, 580, 598, 615, 633, 650, 668,
  685, 703, 721, 739, 757, 776, 795, 814, 833, 852,
  871, 890, 909, 928, 947, 966, 985, 1004, 1023};

const int IDCmap[101] PROGMEM =
{ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900,
  1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900,
  2000, 2100, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700, 2800, 2900,
  3000, 3100, 3200, 3300, 3400, 3500, 3600, 3700, 3800, 3900,
  4000, 4100, 4200, 4300, 4400, 4500, 4600, 4700, 4800, 4900,
  5000, 5500, 6000, 6500, 7000, 7500, 8000, 8500, 9000, 9500,
  10000, 10500, 11000, 11500, 12000, 12500, 13000, 13500, 14000, 14500,
  15000, 15500, 16000, 16500, 17000, 17500, 18000, 18500, 19000, 19500,
  20000, 20500, 21000, 21500, 22000, 22500, 23000, 23500, 24000, 24500,
  25000, 25500, 26000, 26500, 27000, 27500, 28000, 28500, 29000, 29500, 30000};

const int IDCsensormap[101] PROGMEM =
{ 1, 4, 8, 11, 14, 17, 21, 24, 28, 31,
  34, 38, 41, 45, 48, 51, 55, 58, 62, 65,
  68, 72, 75, 78, 82, 85, 89, 92, 95, 99,
  102, 105, 109, 112, 116, 119, 122, 126, 129, 133,
  137, 140, 144, 147, 150, 154, 157, 160, 164, 168,
  171, 188, 205, 222, 239, 256, 274, 291, 308, 326,
  344, 360, 377, 394, 412, 429, 446, 463, 481, 498,
  514, 532, 549, 566, 584, 601, 618, 636, 653, 670,
  688, 705, 722, 740, 757, 774, 792, 809, 826, 844,
  861, 878, 896, 913, 930, 946, 964, 981, 999, 1015, 1023};

```



```

const int UACmap[101] PROGMEM =
{ 0, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250,
  2500, 2750, 3000, 3250, 3500, 3750, 4000, 4250, 4500, 4750,
  5000, 5250, 5500, 5750, 6000, 6250, 6500, 6750, 7000, 7250,
  7500, 7750, 8000, 8250, 8500, 8750, 9000, 9250, 9500, 9750,
  10000,10250,10500,10750,11000,11250,11500,11750,12000,12250,
  12500,12750,13000,13250,13500,13750,14000,14250,14500,14750,
  15000,15250,15500,15750,16000,16250,16500,16750,17000,17250,
  17500,17750,18000,18250,18500,18750,19000,19250,19500,19750,
  20000,20250,20500,20750,21000,21250,21500,21750,22000,22250,
  22500,22750,23000,23250,23500,23750,24000,24250,24500,24750,25000};

const int UACsensormap[101] PROGMEM =
{ 0, 3, 6, 9, 13, 16, 19, 22, 26, 29,
  32, 35, 39, 42, 45, 49, 52, 55, 59, 62,
  65, 68, 72, 75, 78, 82, 85, 88, 91, 94,
  98,101,104,108,111,114,118,121,124,127,
  131,134,138,141,144,146,150,154,157,160,
  163,166,170,173,177,180,183,186,190,193,
  196,200,203,207,210,213,217,220,223,226,
  229,232,235,238,241,244,247,250,253,256,
  259,262,265,268,271,274,277,280,283,286,
  289,292,295,298,301,304,307,310,313,316,319};

const int IACmap[101] PROGMEM =
{ 00, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900,
  1000,1100,1200,1300,1400,1500,1600,1700,1800,1900,
  2000,2100,2200,2300,2400,2500,2600,2700,2800,2900,
  3000,3100,3200,3300,3400,3500,3600,3700,3800,3900,
  4000,4100,4200,4300,4400,4500,4600,4700,4800,4900,
  5000,5100,5200,5300,5400,5500,5600,5700,5800,5900,
  6000,6100,6200,6300,6400,6500,6600,6700,6800,6900,
  7000,7100,7200,7300,7400,7500,7600,7700,7800,7900,
  8000,8100,8200,8300,8400,8500,8600,8700,8800,8900,
  9000,9100,9200,9300,9400,9500,9600,9700,9800,9900,10000};

const int IACsensormap[101] PROGMEM =
{ 0, 2, 4, 6, 9, 11, 13, 16, 18, 21,
  23, 25, 28, 30, 32, 35, 37, 39, 42, 44,
  46, 49, 51, 53, 56, 58, 60, 63, 65, 68,
  70, 72, 75, 77, 79, 81, 84, 86, 89, 91,
  94, 96, 98,101,103,105,108,110,112,115,
  117,119,121,124,126,128,131,133,135,138,
  140,142,144,147,149,151,154,156,158,161,
  163,165,167,170,172,174,177,179,181,184,
  186,188,190,193,195,197,200,202,204,207,
  209,211,213,216,218,220,223,225,227,229,232, };

```

```

//Meter maps

const int MeterInput[101] PROGMEM =
  { 0, 10, 20, 31, 41, 51, 61, 72, 82, 92,
    102,113,123,133,143,153,164,174,184,194,
    205,215,225,235,246,256,266,276,286,297,
    307,317,327,338,348,358,368,379,389,399,
    409,419,430,440,450,460,471,481,491,501,
    512,522,532,542,552,563,573,583,593,604,
    614,624,634,644,655,665,675,685,696,706,
    716,726,737,747,757,767,777,788,798,808,
    818,829,839,849,859,870,880,890,900,910,
    921,931,941,951,962,972,982,992,1003,1013,1023};

const int WmMap[101] PROGMEM=
  {13, 22, 32, 42, 52, 62, 72, 83, 93,104,
    114,125,135,145,156,167,177,189,199,210,
    220,231,241,251,261,272,282,293,303,314,
    325,336,346,356,366,376,387,397,408,418,
    428,438,449,459,470,480,491,501,512,522,
    534,543,553,563,574,584,595,605,616,626,
    637,647,657,667,677,687,698,708,718,728,
    738,748,758,768,778,787,797,807,817,826,
    836,845,855,864,873,882,892,900,909,917,
    927,935,945,954,964,972,982,990,1000,1008,1018};

const int VmMap[101] PROGMEM=
  { 5, 12, 22, 32, 43, 53, 63, 73, 83, 92,
    101,113,122,132,141,151,160,170,180,188,
    200,209,220,229,241,250,258,268,277,286,
    295,305,315,323,332,342,352,362,371,379,
    388,398,407,417,426,435,443,453,463,472,
    481,490,499,508,517,527,536,544,553,561,
    570,578,587,596,606,615,623,632,641,649,
    658,665,673,681,691,700,709,718,727,736,
    745,754,763,772,781,790,799,808,818,828,
    838,848,858,868,878,888,898,909,920,931,942};

const int AmMap[101] PROGMEM=
  { 0, 9, 18, 28, 39, 50, 60, 69, 79, 89,
    98,107,117,127,137,147,156,165,175,185,
    195,205,215,222,232,242,252,261,271,281,
    291,301,309,318,328,337,346,355,364,373,
    381,390,399,408,417,426,435,444,453,462,
    471,480,489,498,507,516,525,534,542,551,
    560,569,578,586,595,603,612,621,630,638,
    647,656,665,672,681,689,698,706,715,724,
    732,740,749,758,767,777,786,797,807,817,
    828,834,844,855,865,878,885,894,905,918,928};

```

```

void setup()
{
  // SPI setup
  pinMode(SSADC, OUTPUT);
  pinMode(SSVm, OUTPUT);
  pinMode(SSAm, OUTPUT);
  pinMode(SSWm, OUTPUT);

  digitalWrite(SSADC, 1);
  digitalWrite(SSVm, 1);
  digitalWrite(SSAm, 1);
  digitalWrite(SSWm, 1);
  SPI.begin();

  // AC output setup
  pinMode(ACallow, OUTPUT);
  digitalWrite(ACallow, 1);

  // Meter range lights setup
  pinMode(lampPinA1, OUTPUT);
  pinMode(lampPinA2, OUTPUT);
  pinMode(lampPinV1, OUTPUT);
  pinMode(lampPinV2, OUTPUT);

  digitalWrite(lampPinA1, 1);
  digitalWrite(lampPinA2, 1);
  digitalWrite(lampPinV1, 1);
  digitalWrite(lampPinV2, 1);
}

void loop()
{
  // Timestamps
  static unsigned long startTime = 0;
  static unsigned long lastTime = 0;

  // increment counters, flags
  static word i = 0;
  static bool calc = 0;
  static bool meas = 0;

  // Output data variables
  static long IoutRaw = 0;
  static long IoutFiltered = 0;
  static long IoutMeter = 0;

  static long UoutRaw = 0;
  static long UoutFiltered = 0;
  static long UoutMeter = 0;

  static long PoutRaw = 0;
  //static long PoutFiltered = 0;
  static long PoutMeter = 0;

  //Range variables
  static word AmRange = 3000;
  static word VmRange = 25000;
  static long WmRange = 750000;

```

```

// Measurement block
startTime = micros();
if((lastTime<startTime)&&((startTime-lastTime)>= 100)) //next data
    //point is taken when 100 us has passed since last data point.
{
    IDC[i] = ReadADC(0);
    UDC[i] = ReadADC(1);
    IAC[i] = (ReadADC(2) - IACmidpoint);
    UAC[i] = (ReadADC(3) - UACmidpoint);
    i++;
    lastTime = startTime;
    if(i >= 200)
    {
        i = 0; //resets array index for next measurement block
        lastTime += calcDelay; //delays next measurement period to give
                               //time for running calculations

        calc = 1;
    }
}

// fix for micros() timer overflow, occurs every 71 minutes.
if(startTime <= 1000000) // check during first second after overflow
{
    if((lastTime-startTime) > calcDelay) // can only occur if startTime
        //gets updated with overflown micros() value.
    {
        lastTime = startTime;
    }
}

if(calc)
{
    // AC output protection reset. Reenables AC output if AC output
    // has been switched off from the front panel switch.
    if(!digitalRead(ACon))
    {
        digitalWrite(ACallow, 1);
    }

    // measured value calculations
    meas = digitalRead(ACmeasure);

    IoutRaw = CalcCurrent(meas, digitalRead(ACon));
    UoutRaw = CalcVoltage(meas);
    PoutRaw = CalcPower(meas, IoutRaw, UoutRaw);

    //measured value filtering
    if(meas)
    {
        IoutFiltered = FilterValue(IoutRaw, IoutFiltered, 100, 4);
        UoutFiltered = FilterValue(UoutRaw, UoutFiltered, 100, 4);
    }
    else{
        IoutFiltered = FilterValue(IoutRaw, IoutFiltered, 50, 4);
    }
}

```

```

//Output range calculation
if(meas)
{
    // AC ranges
    // 250mA 500mA 1000mA
    // 50V 150V 250V
    AmRange=PickRange(IoutRaw, AmRange, 2500, 5000, 10000, 500,
        lampPinA1, lampPinA2);
    VmRange=PickRange(UoutFiltered, VmRange, 5000, 15000, 25000, 1000,
        lampPinV1, lampPinV2);
    WmRange = IntDiv(((long)VmRange*AmRange),10000);

    IoutMeter = IntDiv((IoutFiltered*1023), AmRange);
    UoutMeter = IntDiv((UoutFiltered*1023), VmRange);
    PoutMeter = IntDiv((PoutRaw*1023), WmRange);
}
else
{
    // DC ranges
    // 250mA 1500mA 3000mA
    // 5V 15V 25V
    AmRange=PickRange(IoutFiltered, AmRange, 2500, 15000, 30000, 500,
        lampPinA1, lampPinA2);
    VmRange=PickRange(UoutRaw, VmRange, 5000, 15000, 25000, 100,
        lampPinV1, lampPinV2);
    WmRange = IntDiv(((long)VmRange*AmRange),1000);

    IoutMeter = IntDiv((IoutFiltered*1023), AmRange);
    UoutMeter = IntDiv((UoutRaw*1023), VmRange);
    PoutMeter = IntDiv((PoutRaw*1023), WmRange);
}

// output to meters

WriteDAC(SSWm,multiMapProgmem(PoutMeter, &MeterInput[0], &WmMap[0],
101));
WriteDAC(SSVm,multiMapProgmem(UoutMeter, &MeterInput[0], &VmMap[0],
101));
WriteDAC(SSAm,multiMapProgmem(IoutMeter, &MeterInput[0], &AmMap[0],
101));

calc = 0;
}
}

```

```

word PickRange(long value, word currentRange, word range0, word range1,
word range2, word hysteresis, byte light1, byte light2)
{
    word Range = 0;
    if(value < (range0-hysteresis))
    {
        Range = range0;
        digitalWrite(light1, 1);
        digitalWrite(light2, 1);
    }
    else if(value < (range1-hysteresis) && value > range0)
    {
        Range = range1;
        digitalWrite(light1, 0);
        digitalWrite(light2, 1);
    }
    else if(value > range1)
    {
        Range = range2;
        digitalWrite(light1, 1);
        digitalWrite(light2, 0);
    }
    else
    {
        Range = currentRange;
    }
    return Range;
}

```

```

long FilterValue(long rawValue, long filteredValue,
byte hysteresis, byte divisor){
    long diff = rawValue-filteredValue;
    if(diff==0){
        return rawValue;
    }
    if(rawValue>filteredValue){
        if(diff > (long)hysteresis){
            filteredValue += IntDiv((diff), (long)divisor);
        }
        else{
            filteredValue += 1;
        }
    }
    else{
        if((0-diff) > (long)hysteresis){
            filteredValue -= IntDiv((0-diff), (long)divisor);
        }

        filteredValue -= 1;
    }
    return filteredValue;
}

```

```

long CalcCurrent(byte ACmeas, byte ACon)
{
    // Output data variables
    long IDCout = 0;
    long IACout = 0;

    if(ACmeas)
    {
        //measure AC values for meter output
        for(byte k=0; k<200; k++)
        {
            IACout += (long) IAC[k]*IAC[k];
        }
        //AC output protection
        IACout = SqRoot(IntDiv(IACout, 200));
        if(IACout > IACoutMax)
        {
            digitalWrite(ACallow, 0);
        }
        IACout = multiMapProgmem(IACout, &IACsensormap[0], &IACmap[0], 101);
        return IACout;
    }
    else if(ACon)
    {
        //measure DC values for meter output
        //measure IAC value for protection
        for(byte k=0; k<200; k++)
        {
            IACout += (long) IAC[k]*IAC[k];
            IDCout += (long) IDC[k]*IDC[k];
        }
        //AC output protection
        IACout = SqRoot(IntDiv(IACout, 200));
        if(IACout > IACoutMax)
        {
            digitalWrite(ACallow, 0);
        }
        IDCout = SqRoot(IntDiv(IDCout, 200));
        IDCout = multiMapProgmem(IDCout, &IDCsensormap[0], &IDCmap[0], 101);
        return IDCout;
    }
    else
    {
        //measure DC values for meter output
        for(byte k=0; k<200; k++)
        {
            IDCout += (long) IDC[k]*IDC[k];
        }
        IDCout = SqRoot(IntDiv(IDCout, 200));
        IDCout = multiMapProgmem(IDCout, &IDCsensormap[0], &IDCmap[0], 101);
        return IDCout;
    }
}

```

```

long CalcVoltage(byte ACmeas)
{
    // Output data variables
    long UDCout = 0;
    long UACout = 0;

    if(ACmeas)
    {
        for(byte k=0; k<200; k++)
        {
            UACout += (long)UAC[k]*UAC[k];
        }
        UACout = SqRoot(IntDiv(UACout, 200));

        UACout = multiMapProgmem(UACout, &UACsensormap[0], &UACmap[0], 101);

        return UACout;
    }
    else
    {
        for(byte k=0; k<200; k++)
        {
            UDCout += (long)UDC[k]*UDC[k];
        }
        UDCout = SqRoot(IntDiv(UDCout, 200));

        UDCout = multiMapProgmem(UDCout, &UDCsensormap[0], &UDCmap[0], 99);

        return UDCout;
    }
}

long CalcPower(bool ACmeas, long Iin, long Uin)
{
    // Output data variables
    long PACout = 0;
    long PDCout = 0;
    //word PMrange = (IntDiv(AmRange,1000)*intDiv(VmRange,1000))*1000;

    if(ACmeas)
    {
        for(byte k=0; k<200; k++)
        {
            PACout += IntDiv((long)IAC[k]*UAC[k],4);
        }
        PACout = IntDiv(PACout, 200);
        PACout = IntDiv(PACout*100, 79);
        return PACout;
    }
    else
    {
        long PDCout = IntDiv((Iin * Uin),1000);
        return PDCout;
    }
}

```



```

long IntDiv(long in, long divisor)
{
    // for integer division with appropriate rounding
    long out = 0;
    if(in > 0 && divisor > 0)
    {
        out = (in + divisor / 2) / divisor;
    }
    else if(in < 0 && divisor > 0)
    {
        out = (in - divisor / 2) / divisor;
    }
    else if(in > 0 && divisor < 0)
    {
        out = (in - divisor / 2) / divisor;
    }
    return out;
}

word SqRoot(unsigned long in)
{
    // for finding the square root of an integer using integer math ->
    approximation through iteration
    unsigned int out = 0;
    if(in == 0)
    {
        out = 0;
        return out;
    }
    for(unsigned int adder = 0x8000 ; adder > 0 ; adder = adder >>
1) //division by 2, utilising bitshift
    {
        out += adder;
        if((unsigned long)out*out > in)
        {
            out -= adder;
        }
    }
    return out;
}

```

```

void WriteDAC(byte SS, word value)
{
    // inserting value to meet DAC expected input message format
    byte LSB = lowByte(value);
    byte MSB = 0b00110000;
    MSB |= ((highByte(value) & 0b00000011) << 2);
    MSB |= (LSB & 0b11000000) >> 6;
    LSB = (LSB & 0b00111111) << 2;

    // sending new value to dac
    SPI.beginTransaction(DACSetting);
    digitalWrite(SS, 0);
    SPI.transfer(MSB);
    SPI.transfer(LSB);
    digitalWrite(SS, 1);
    SPI.endTransaction();
}

word ReadADC(word channel) // Channel: 0b0 - ch0, DC current;    0b1 -
ch1, DC voltage;
//                                0b10 - ch2, AC current;    0b11 -
Ch3, AC voltage;
{
    // init variables
    word value;

    // compose output request
    channel = channel << 12;
    channel |= 0b1000000000000000; //add ADC config data 0b10 to the
beginning of message

    // request and read ADC value
    SPI.beginTransaction(ADCSetting);
    //digitalWrite(SSADC, 0);
    PORTB &= 0b11111011;
    SPI.transfer(0b00000001);
    value = SPI.transfer16(channel);
    //digitalWrite(SSADC, 1);
    PORTB |= 0b00000100;
    SPI.endTransaction();

    //bitmask received value for 10 bits.
    value &= 0b0000001111111111;
    return value;
}

```

```

int multiMapProgmem(int val, const int *_in, const int *_out, byte size)
{
    // take care the value is within range
    if (val <= (int)pgm_read_word(_in))
    {
        return pgm_read_word(_out);
    }
    if (val >= (int)pgm_read_word(_in + (size-1)))
    {
        return pgm_read_word(_out + (size-1));
    }

    // search right interval
    byte pos = 1; // _in[0] already tested
    while(val > pgm_read_word(_in + pos)) pos++;

    // this will handle all exact "points" in the _in array
    if (val == pgm_read_word(_in + pos)) return pgm_read_word(_out + pos);

    // interpolate in the right segment for the rest
    return (val - pgm_read_word(_in + (pos-1))) * (pgm_read_word(_out +
pos) - pgm_read_word(_out + (pos-1))) /
    (pgm_read_word(_in + pos) - pgm_read_word(_in + (pos-1))) +
    pgm_read_word(_out + (pos - 1));
}

```

REGULEERITAVATE ALALIS- JA VAHELDUVVOOLU VÄLJUNDITEGA LABORI TOITEALLIKA DISAINIMINE

DESIGN OF A LABORATORY POWER SUPPLY WITH VARIABLE DIRECT AND ALTERNATING CURRENT OUTPUTS

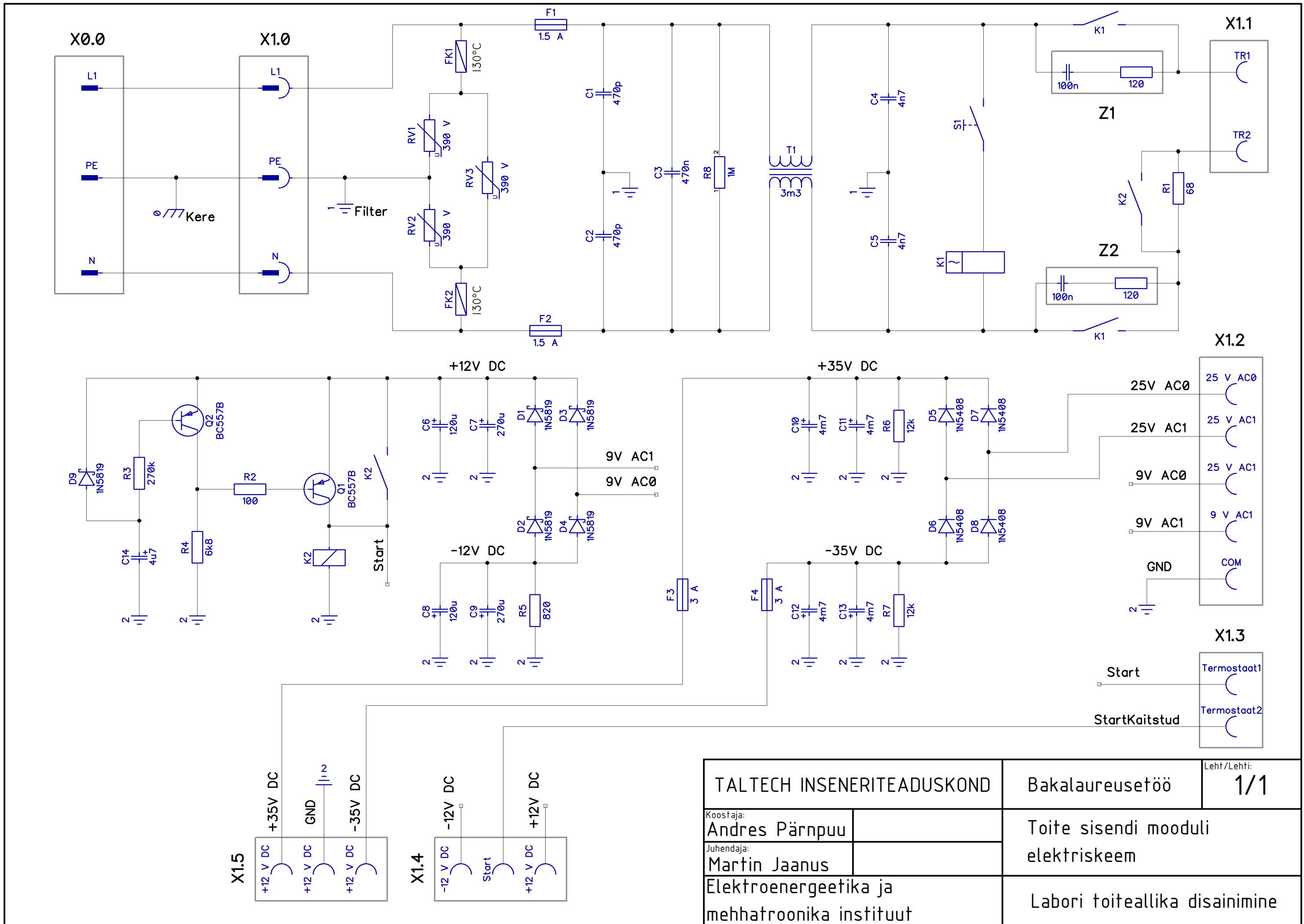
GRAAFILINE MATERJAL

Üliõpilane: Andres Pärnpuu

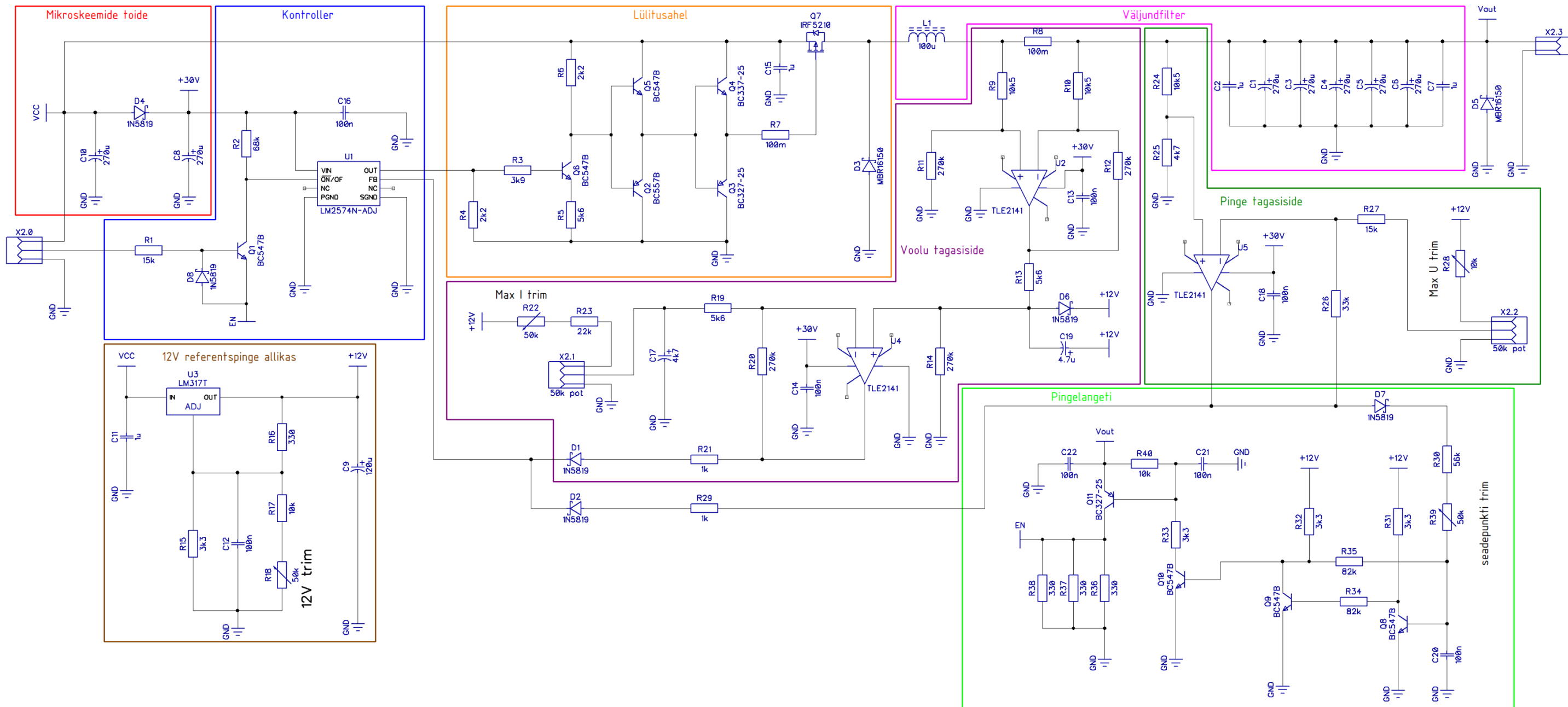
Üliõpilaskood 185975 EAAB

Juhendaja: Martin Jaanus, vanemlektor

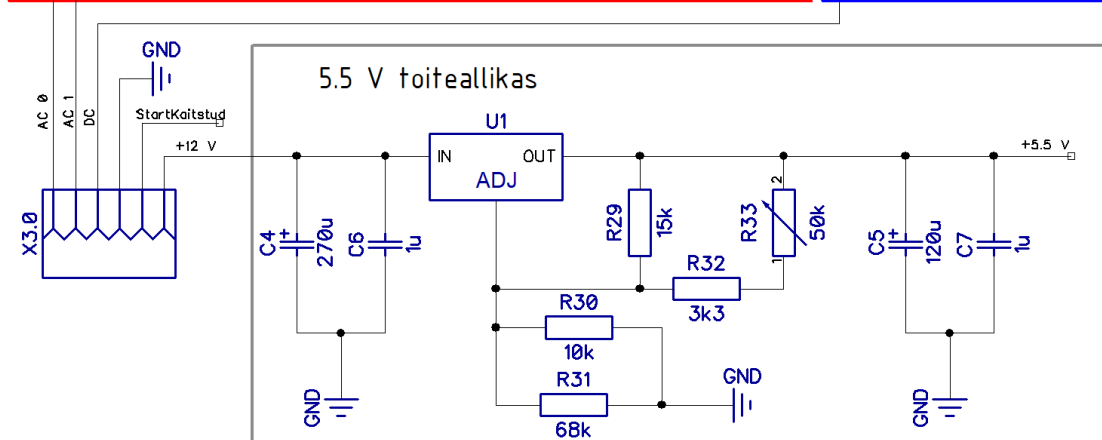
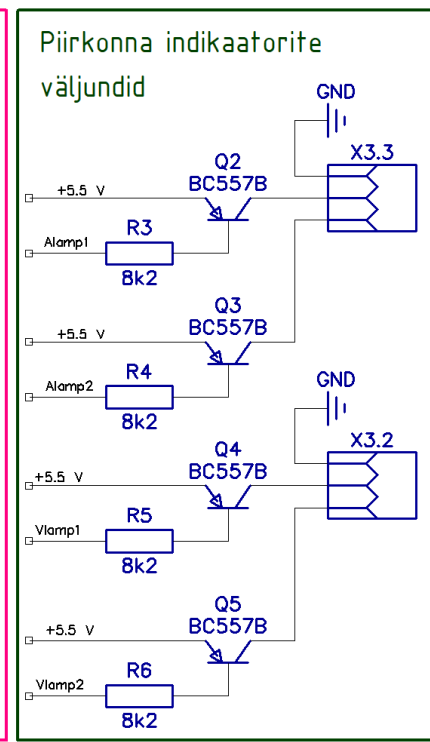
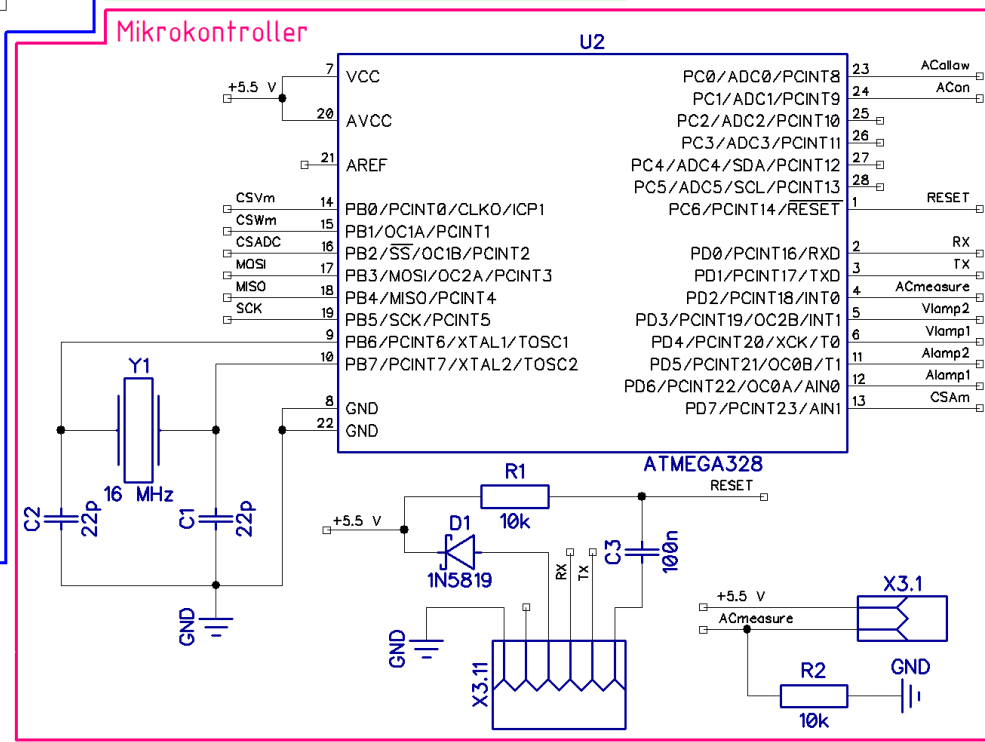
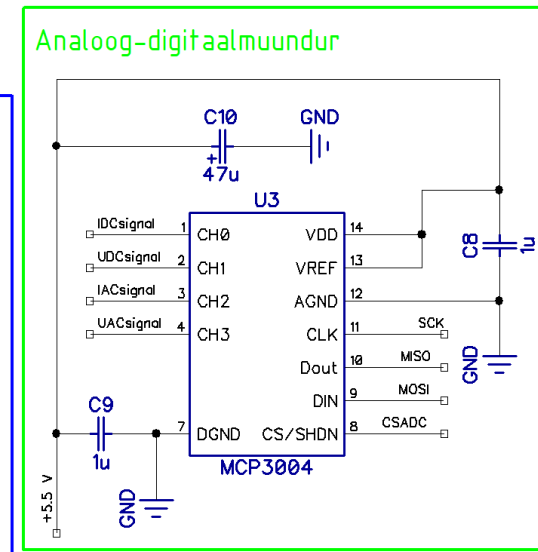
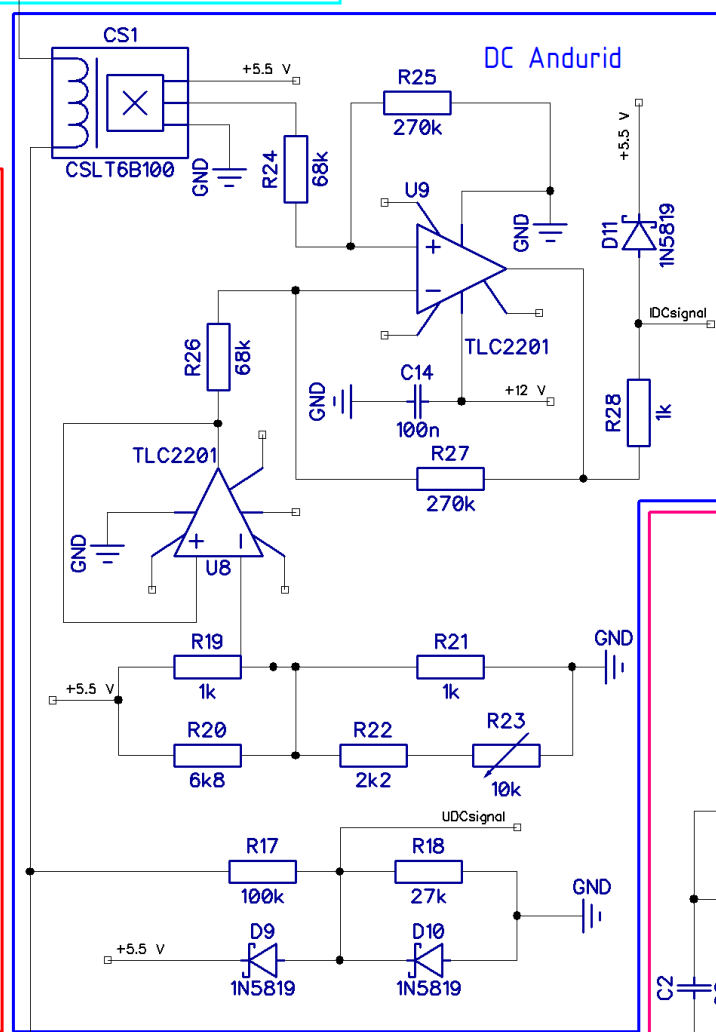
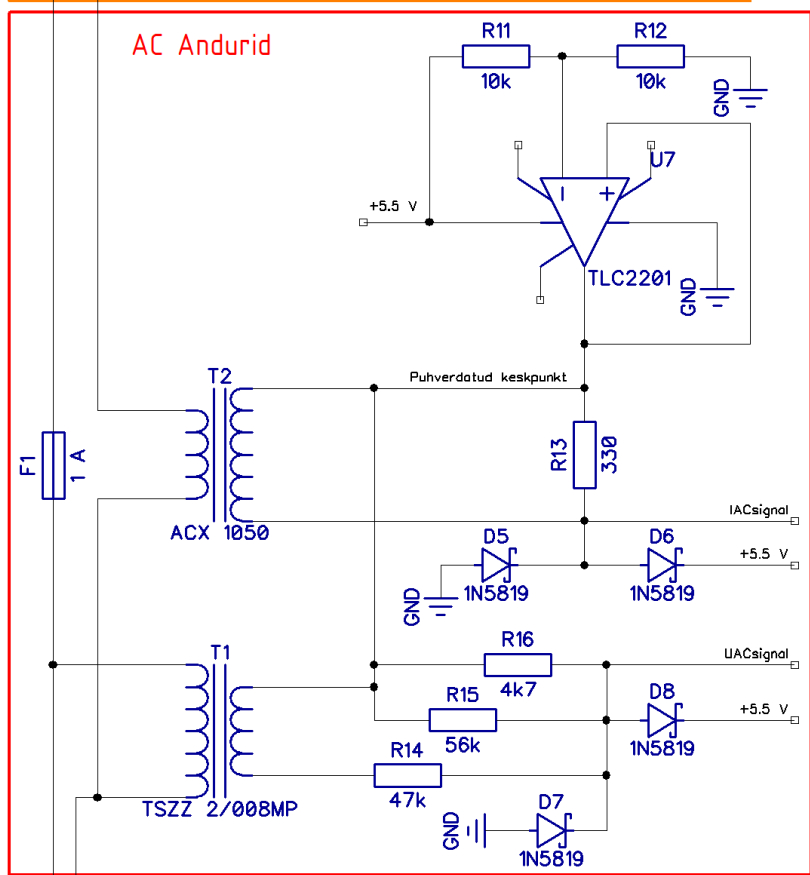
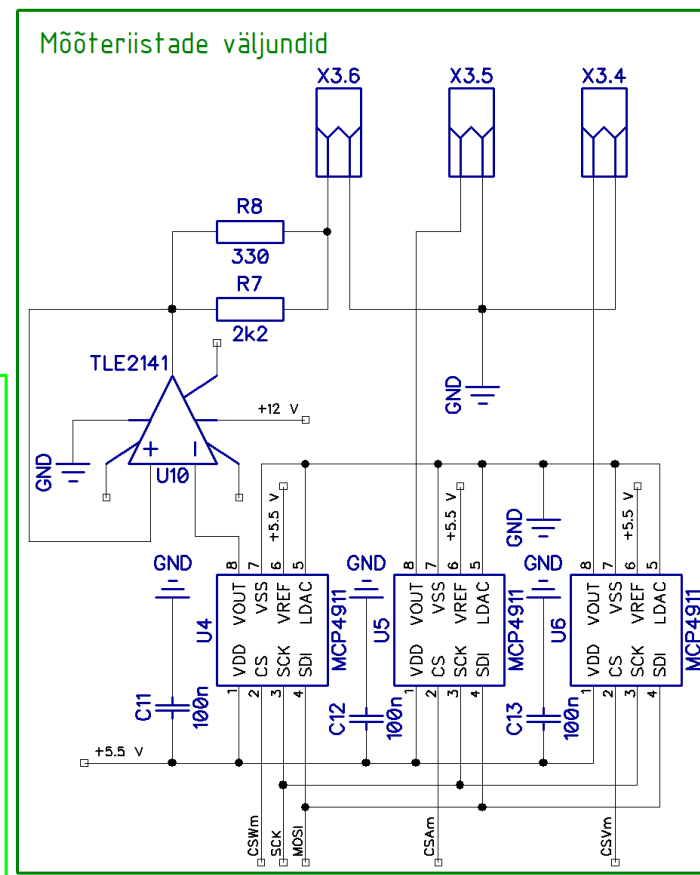
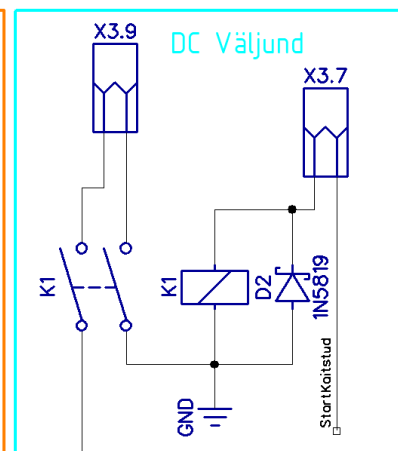
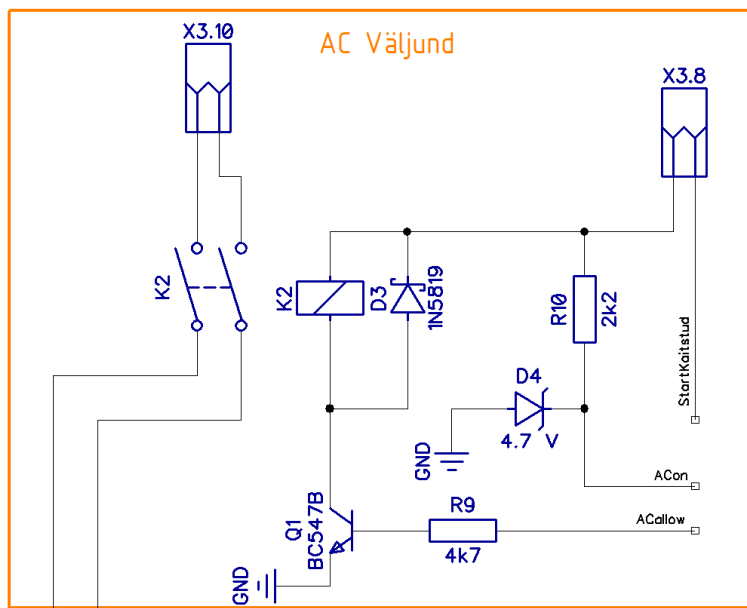
Tallinn 2021



TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/Lehti: 1/1
Koostaja: Andres Pärnpuu		Toite sisendi mooduli elektriskeem	
Juhendaja: Martin Jaanus		Labori toiteallika disainimine	
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut			

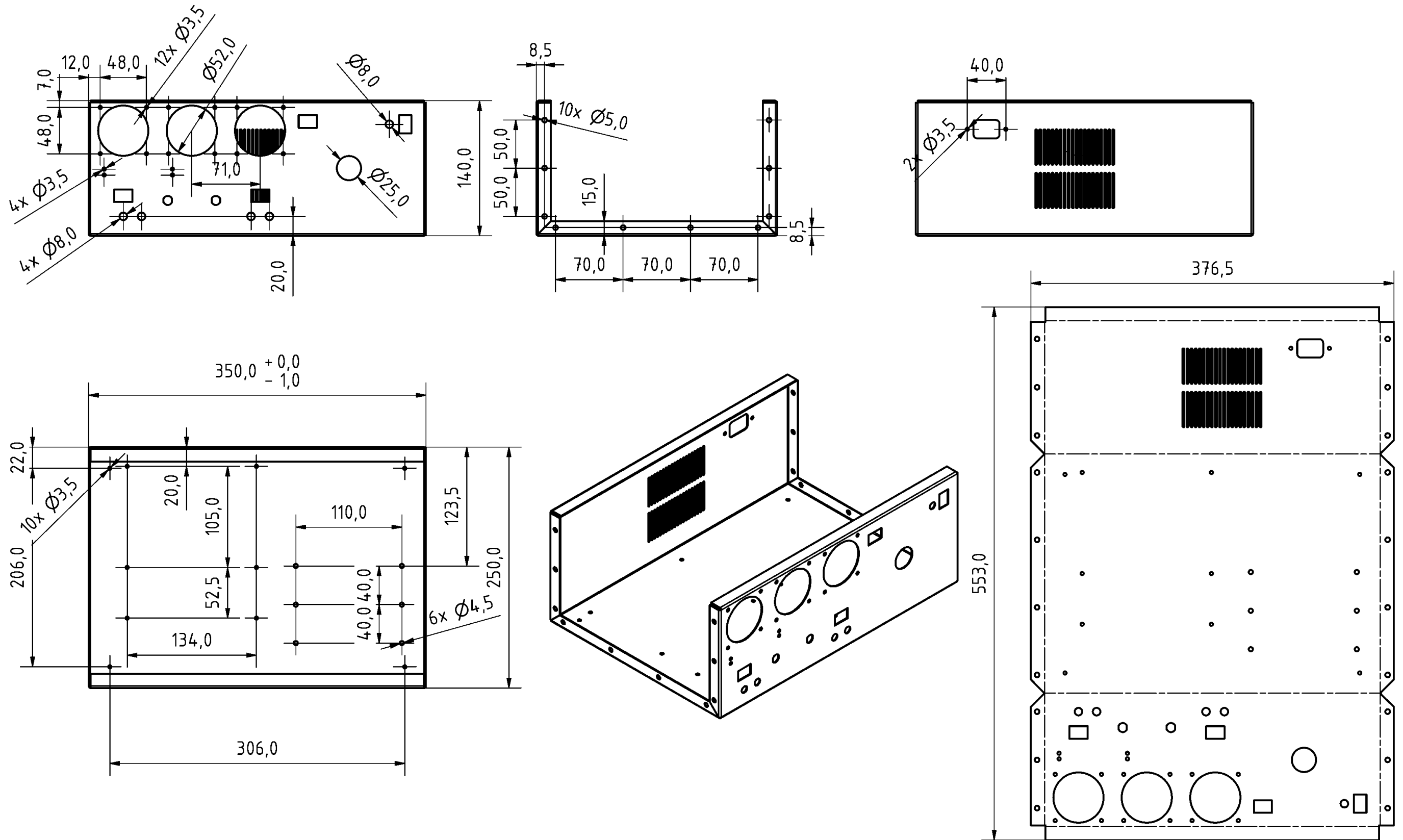


TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/Lehti: 1/1
Koostaja: Andres Pärnpuu		Alalisvoolumuunduri elektriskeem	
Juhendaja: Martin Jaanus			
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Labori toiteallika disainimine	



TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/Lehti: 1/1
Koostaja: Andres Pärnpuu		Mõõteseadmete ja väljundite mooduli elektriskeem	
Juhendaja: Martin Jaanus		Labori toiteallika disainimine	
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut			

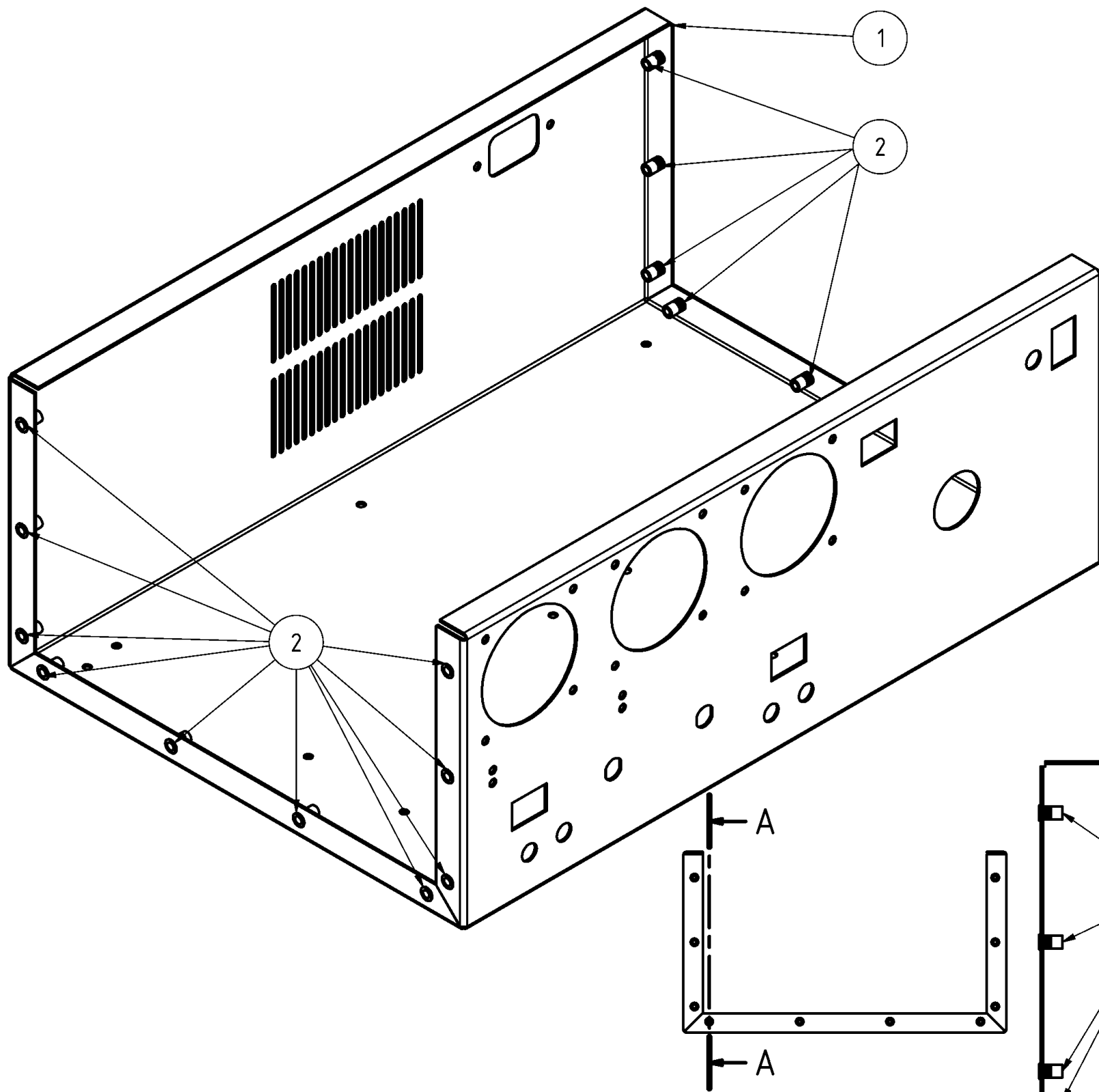
Märkus: Signaalkanaliid on tähistatud sarnaselt nende signaalide nimetustega mikrokontrolleri programmis.



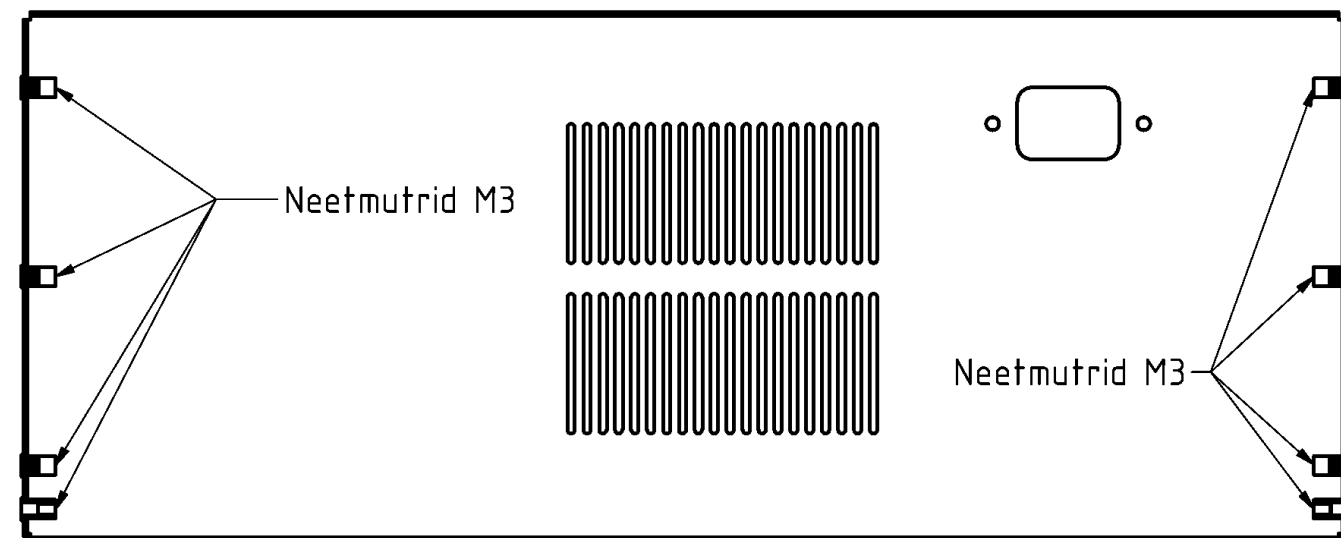
1.0 mm DC01
mass:1.525 kg

Kõik painded 90° R=1,0 pinnalaotusest ülespoole
Märkimata tolerantsid ±0,5 mm

TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/Lehti 1/2
Koostaja: Andres Pärnpuu		Kere põhjakoost, leht 1: Lehtmetall	
Juhendaja: Martin Jaanus			
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Labori toiteallika disainimine	



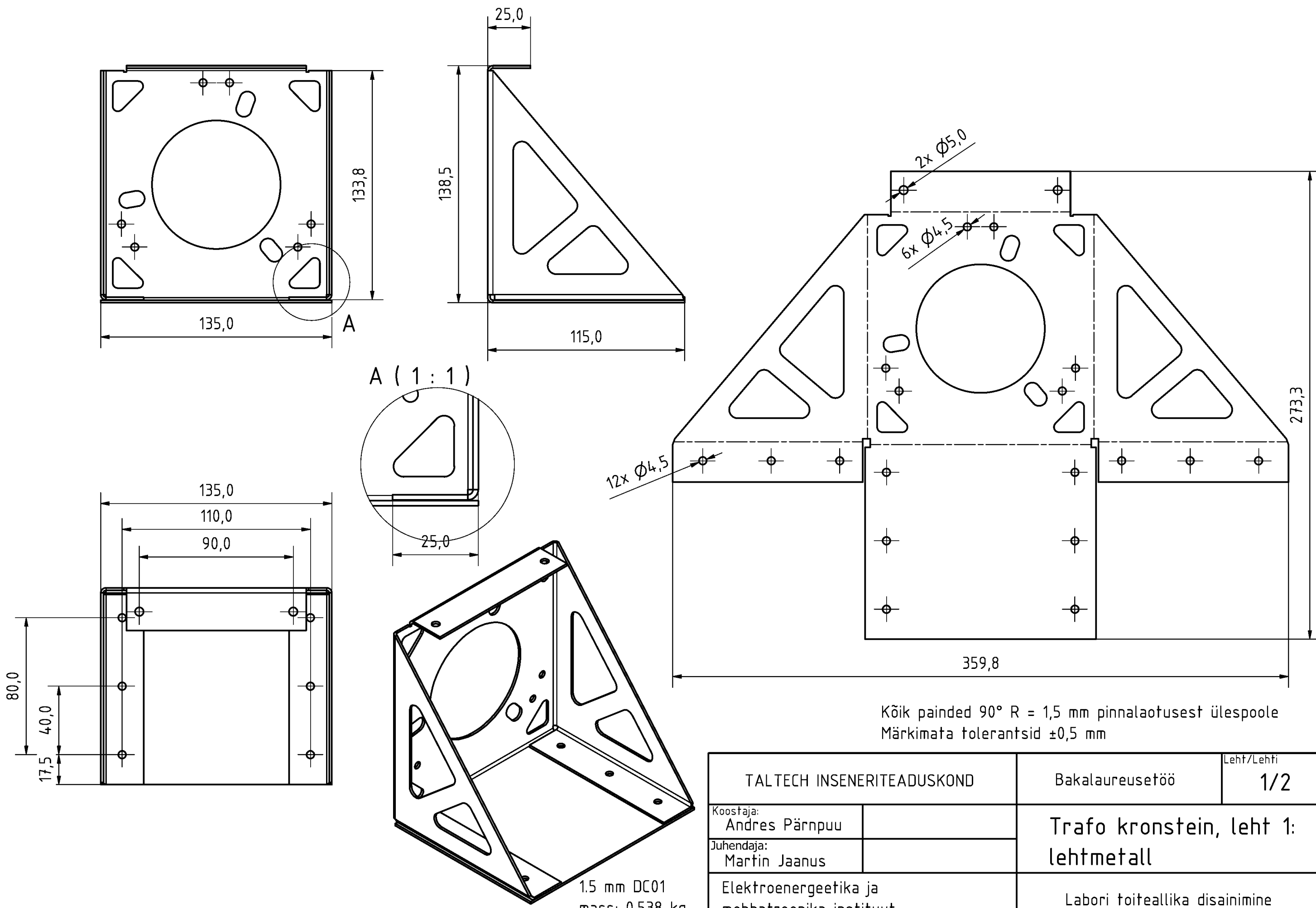
A-A (1 : 2)



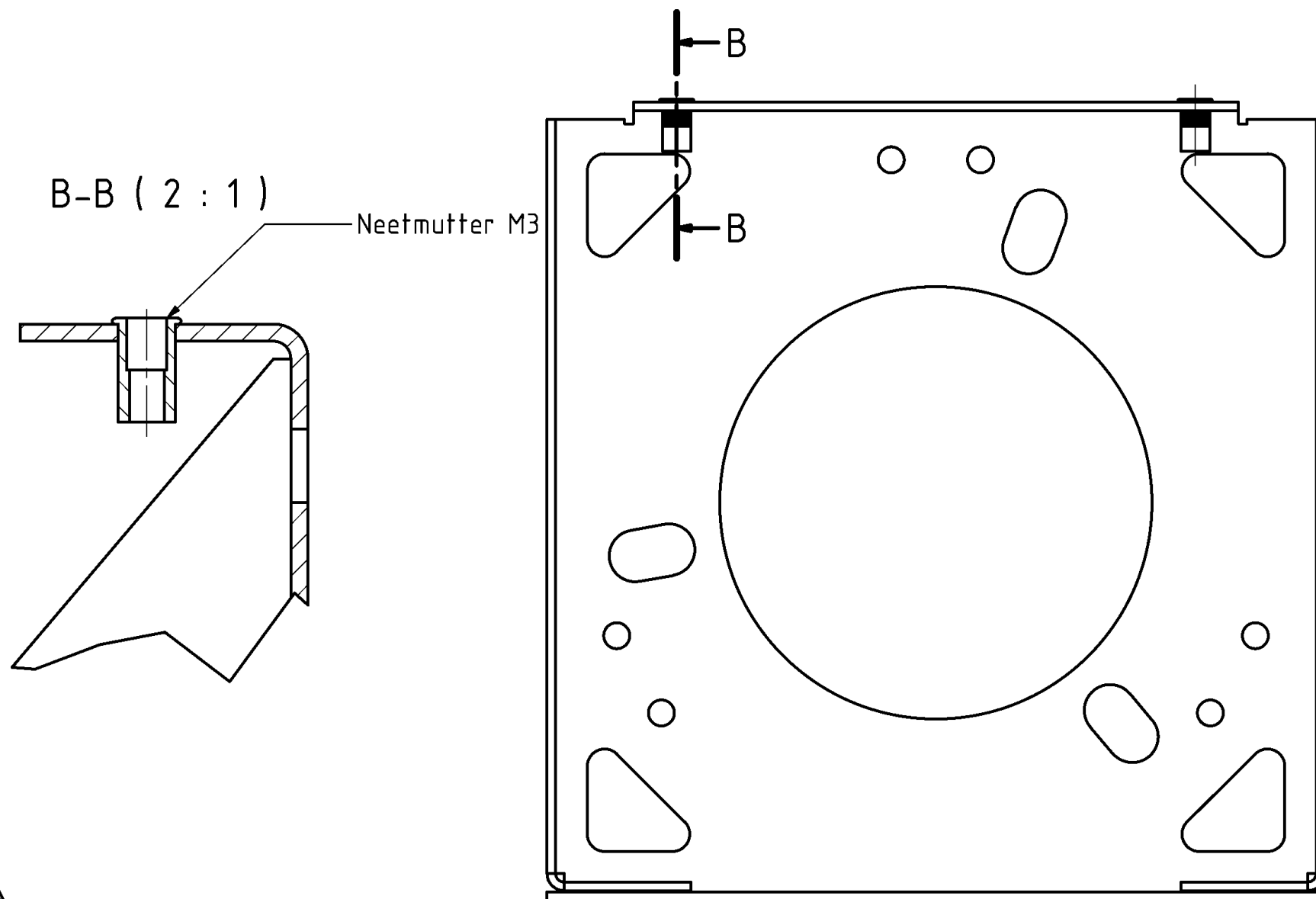
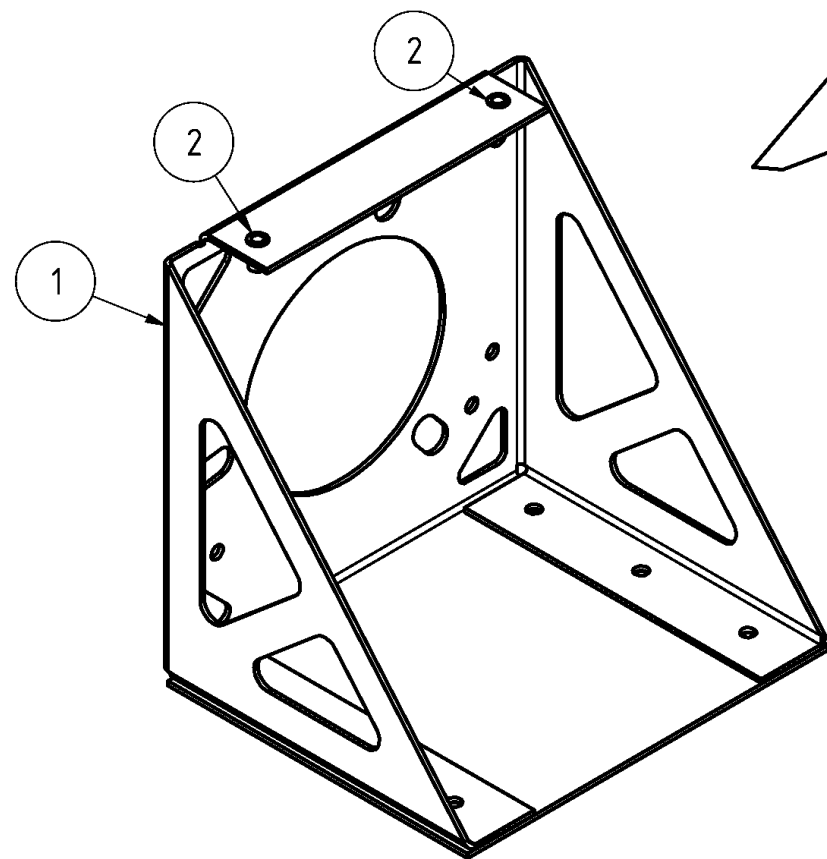
TÜKITABEL		
Nr.	KOGUS	DETAIL
1	1	Korpuse põhi
2	20	Neetmutter M3

1.0 mm DC01
mass:1.525 kg

TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/Lehti 2/2
Koostaja: Andres Pärnpuu		Kere põhjakoost, leht 2: kinnitustarvikud	
Juhendaja: Martin Jaanus			
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Labori toiteallika disainimine	



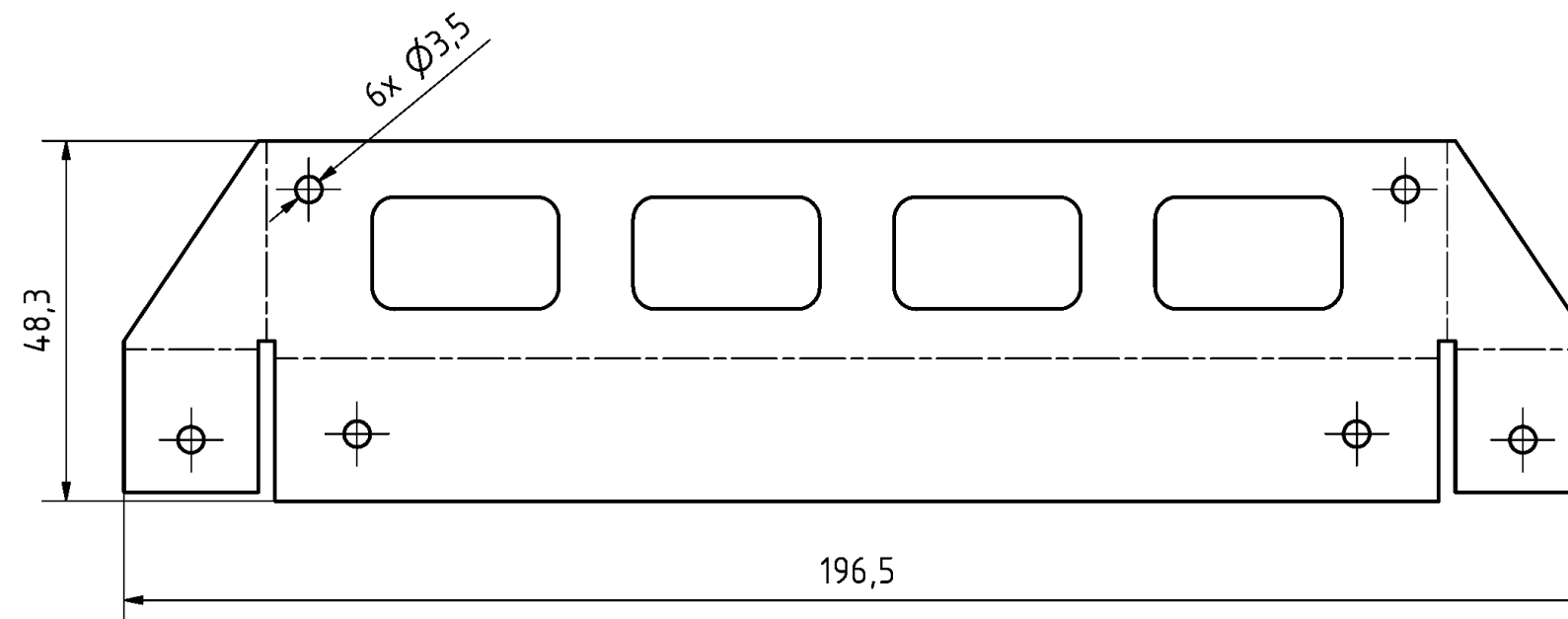
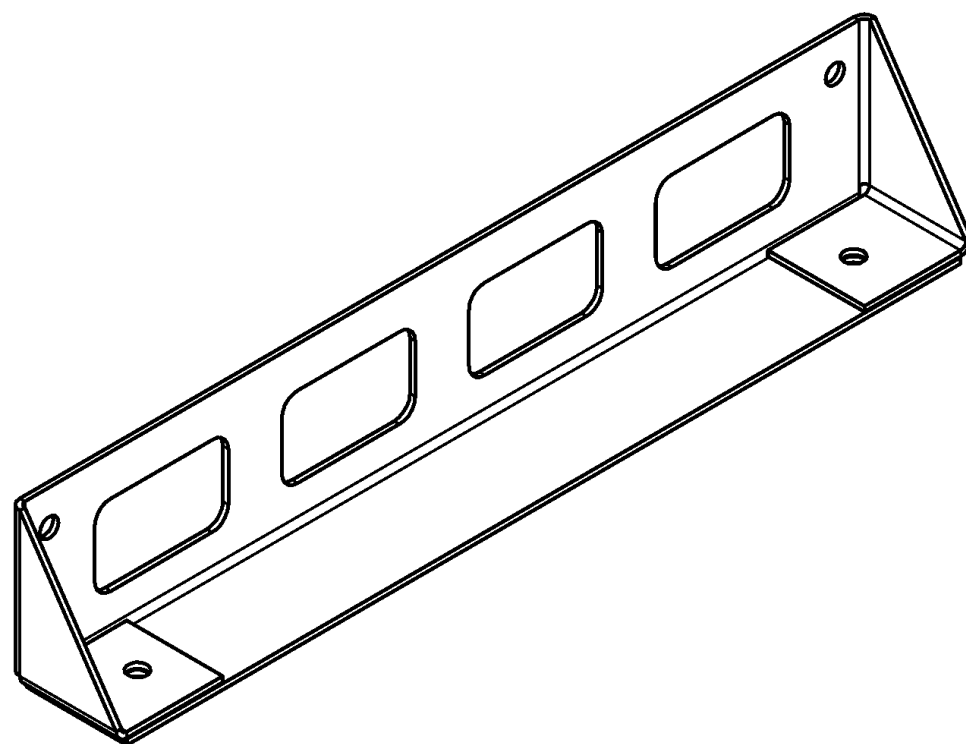
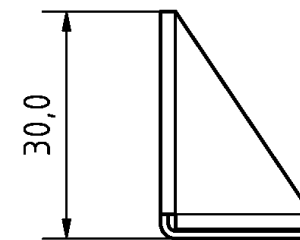
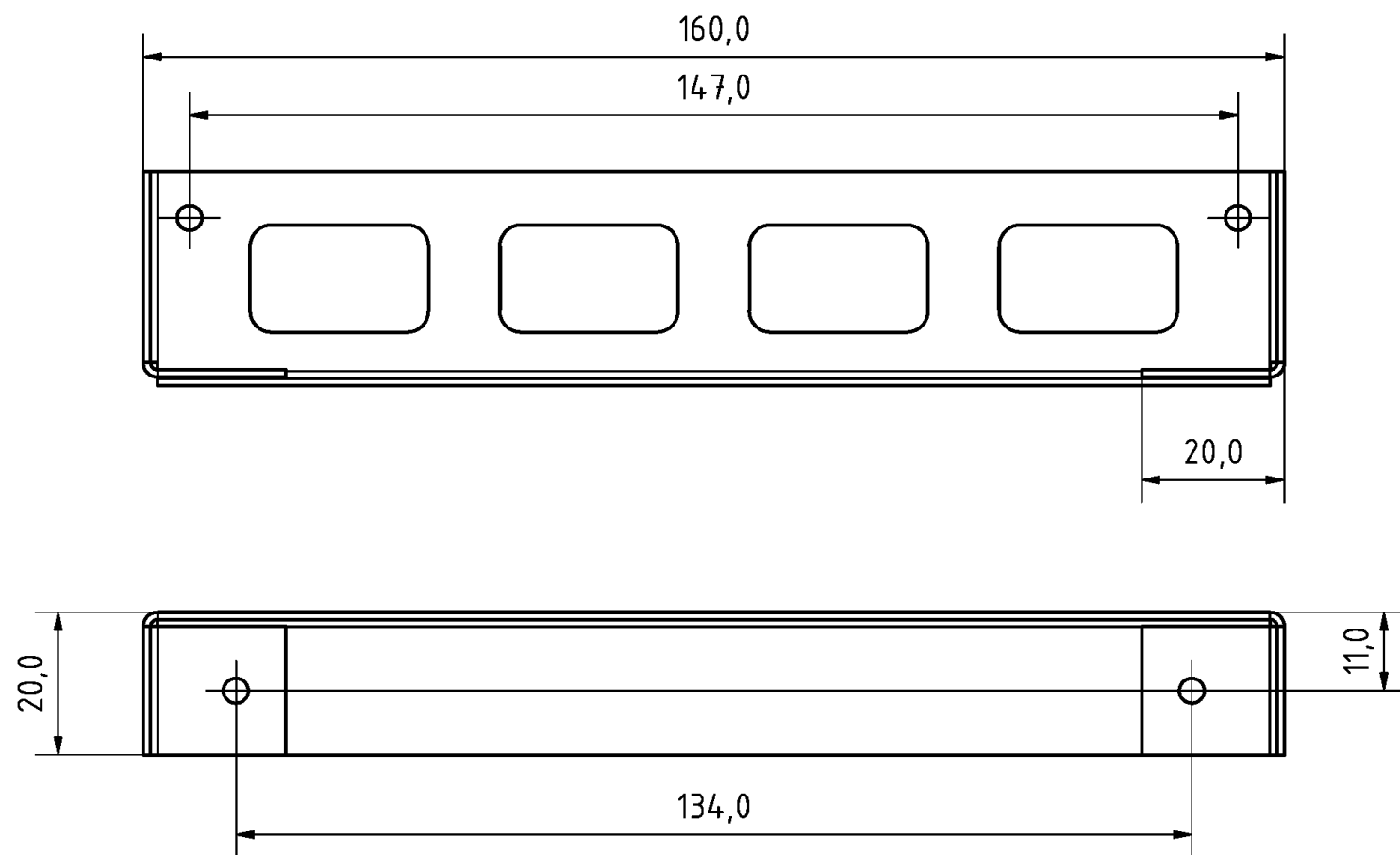
TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/Lehti 1/2
Koostaja: Andres Pärnpuu		Trafo kronstein, leht 1: lehtmetall	
Juhendaja: Martin Jaanus			
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Labori toiteallika disainimine	



TÜKITABEL		
Nr	KOGUS	DETAIL
1	1	Trafokandur
2	2	Neetmutter M3

1.5 mm DC01
mass: 0.538 kg

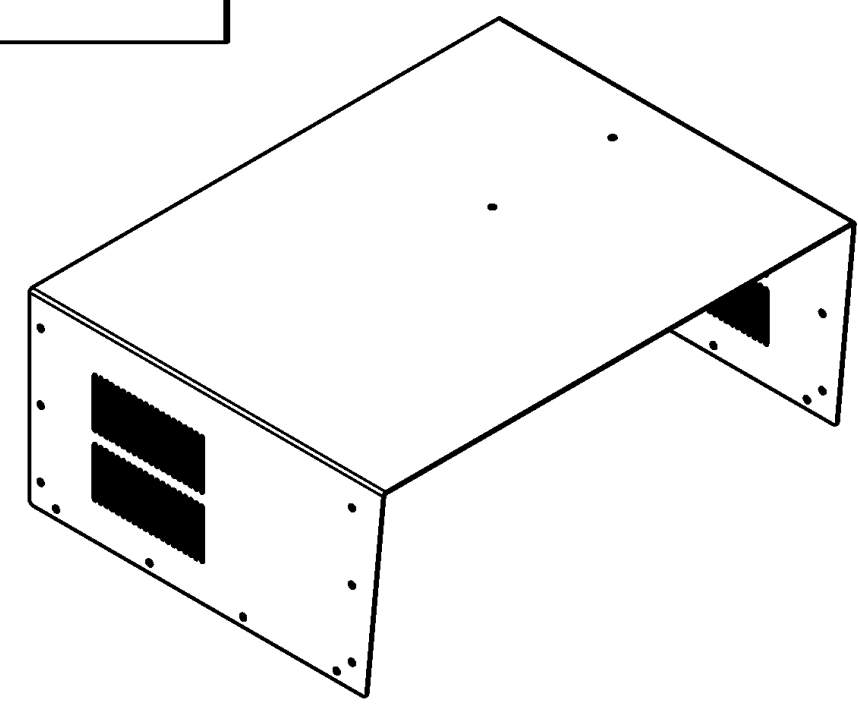
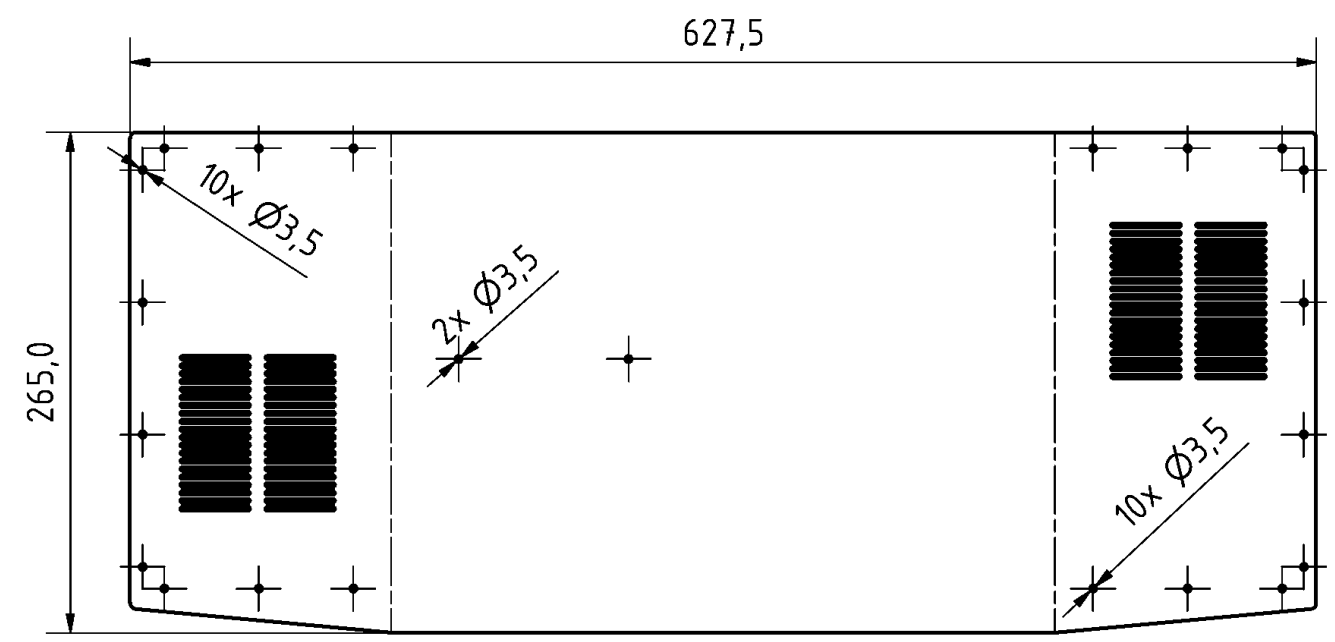
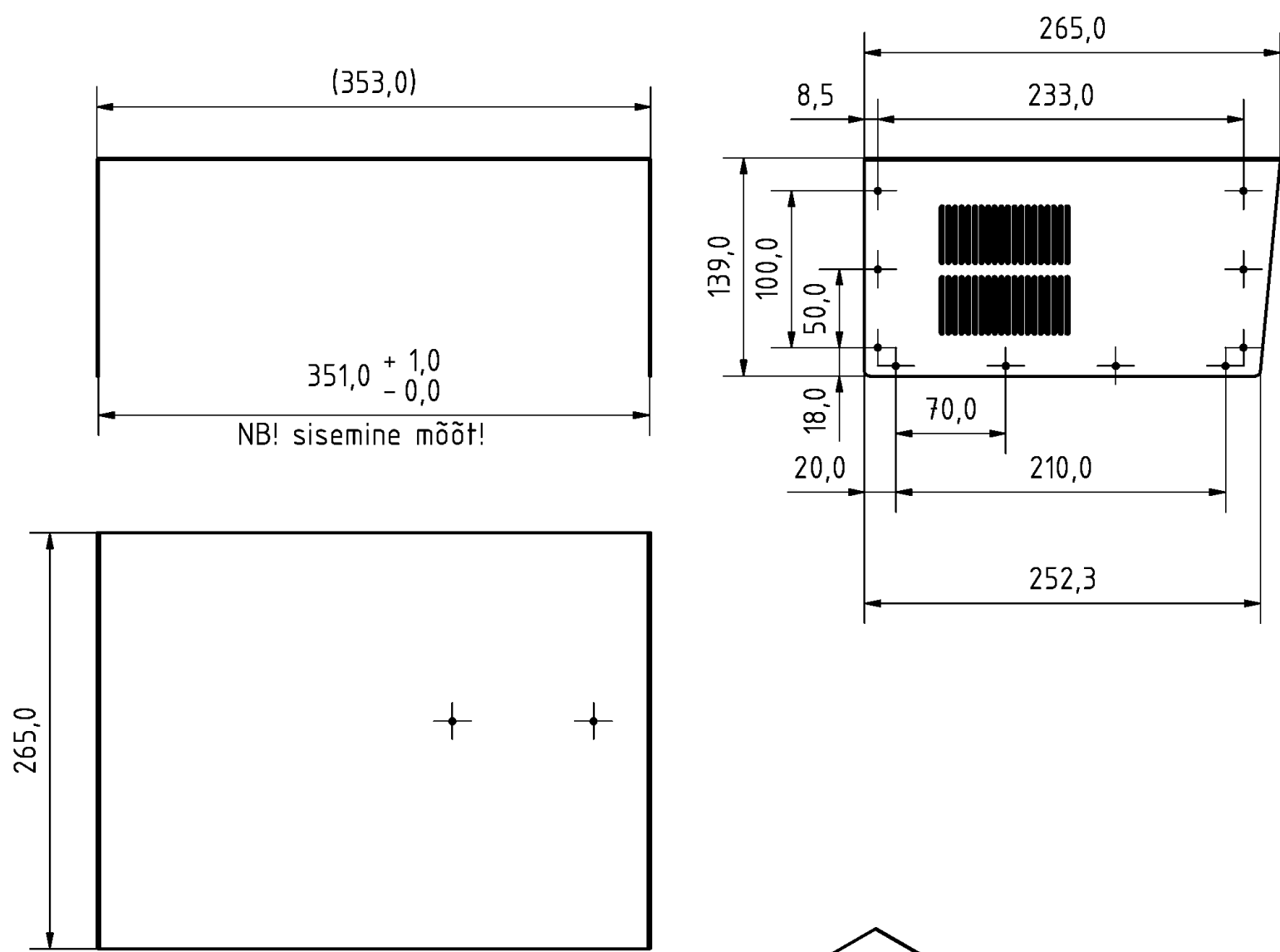
TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/Lehti 2/2
Koostaja: Andres Pärnpuu		Trafo kronstein, leht 2: Kinnitustarvikud	
Juhendaja: Martin Jaanus			
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Labori toiteallika disainimine	



1.0 mm DC01
mass:0.058 kg

Kõik painded 90° R = 1.0 mm pinnalaotusest ülespoole
Märkimata tolerantsid ±0.5 mm

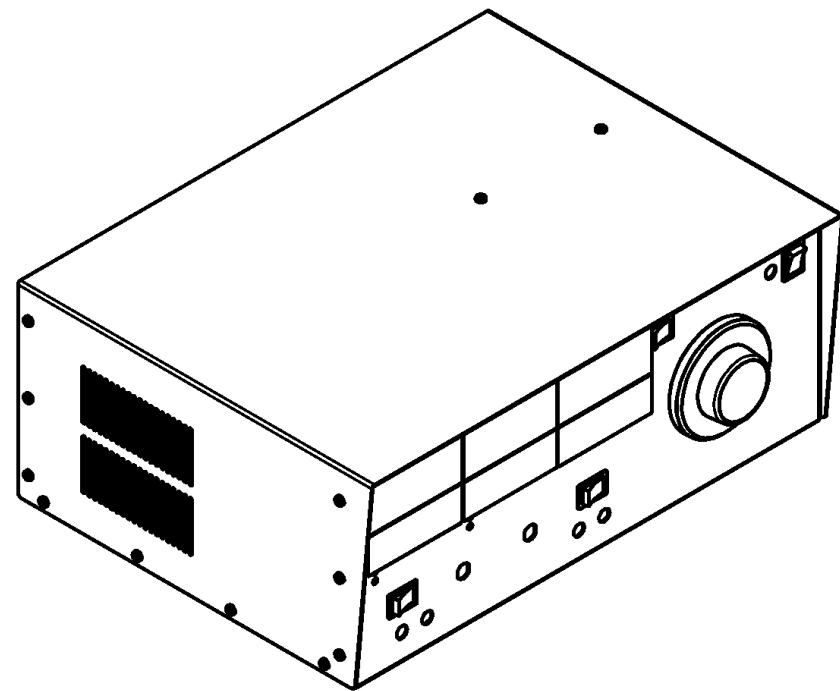
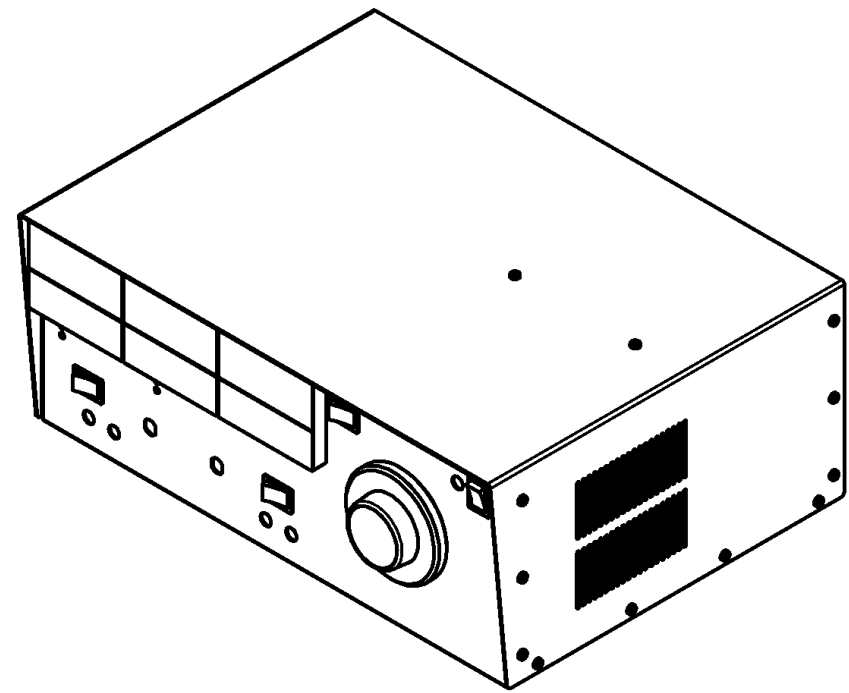
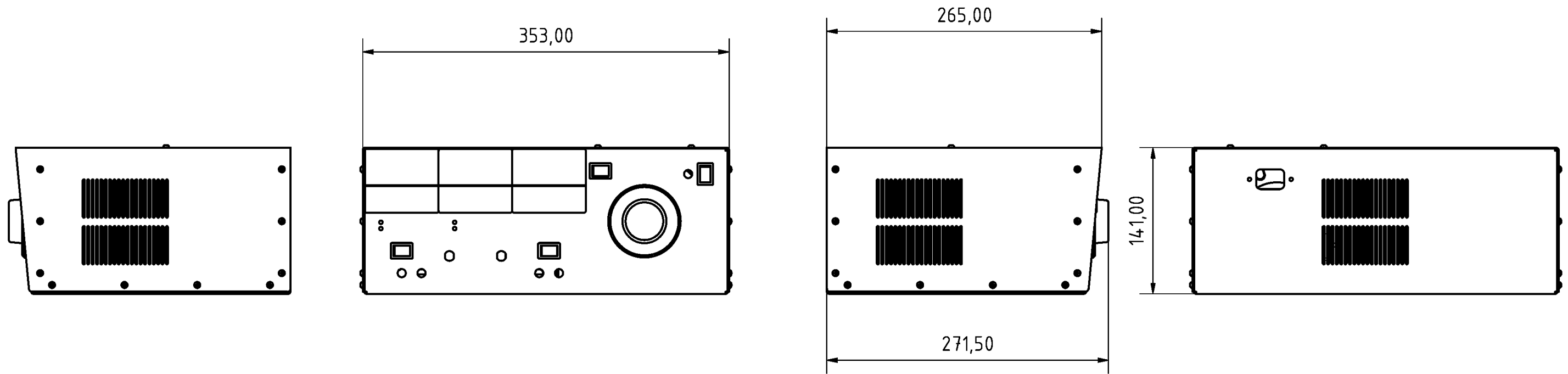
TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/Lehti 1/1
Koostaja: Andres Pärnpuu		Trükkplaadi kandur	
Juhendaja: Martin Jaanus			
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Labori toiteallika disainimine	



1.0 mm DC01
mass:1.244 kg

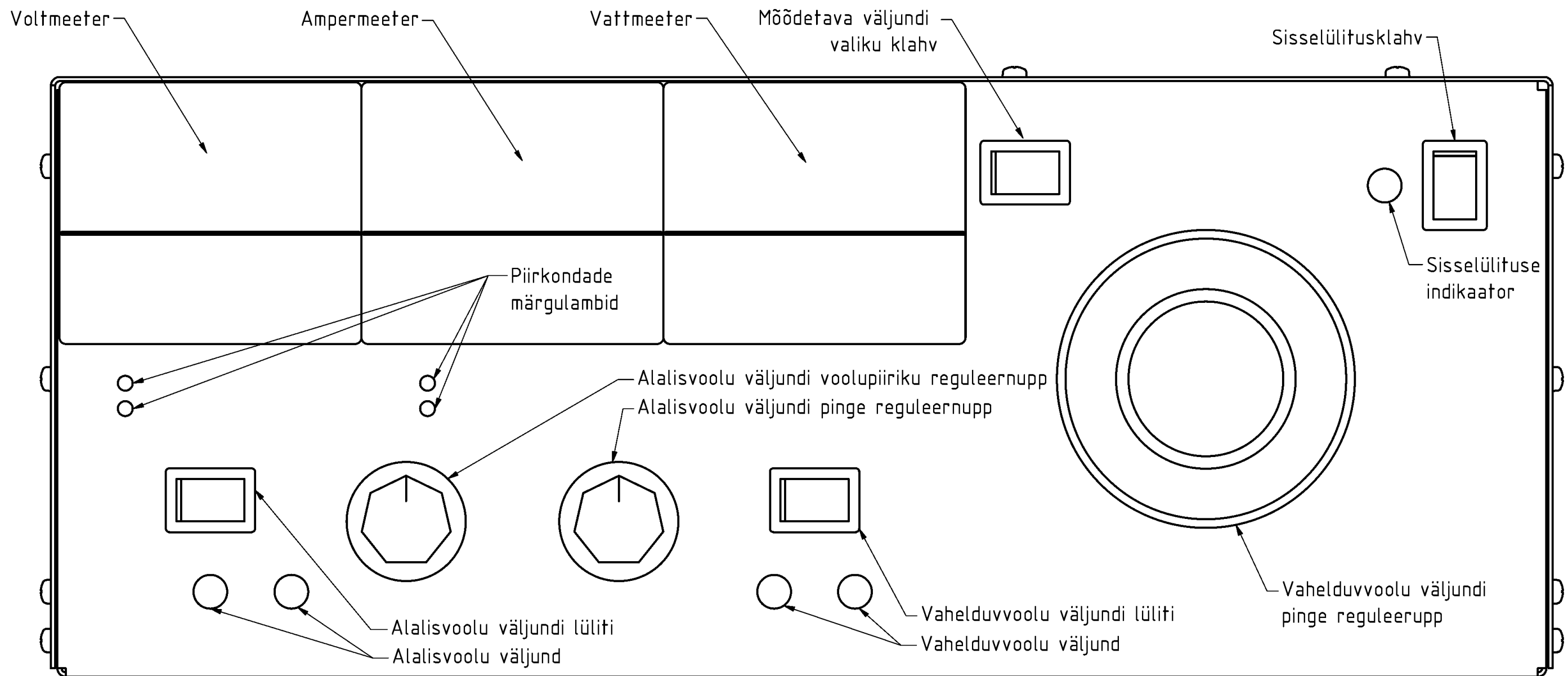
Mõlemad painded 90° R = 1,0 mm pinnalaotusest ülespoole
Märkimata tolerantsid ±0.5 mm

TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/Lehti 1/1
Koostaja: Andres Pärnpuu		Korpuse kaas	
Juhendaja: Martin Jaanus			
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Labori toiteallika disainimine	



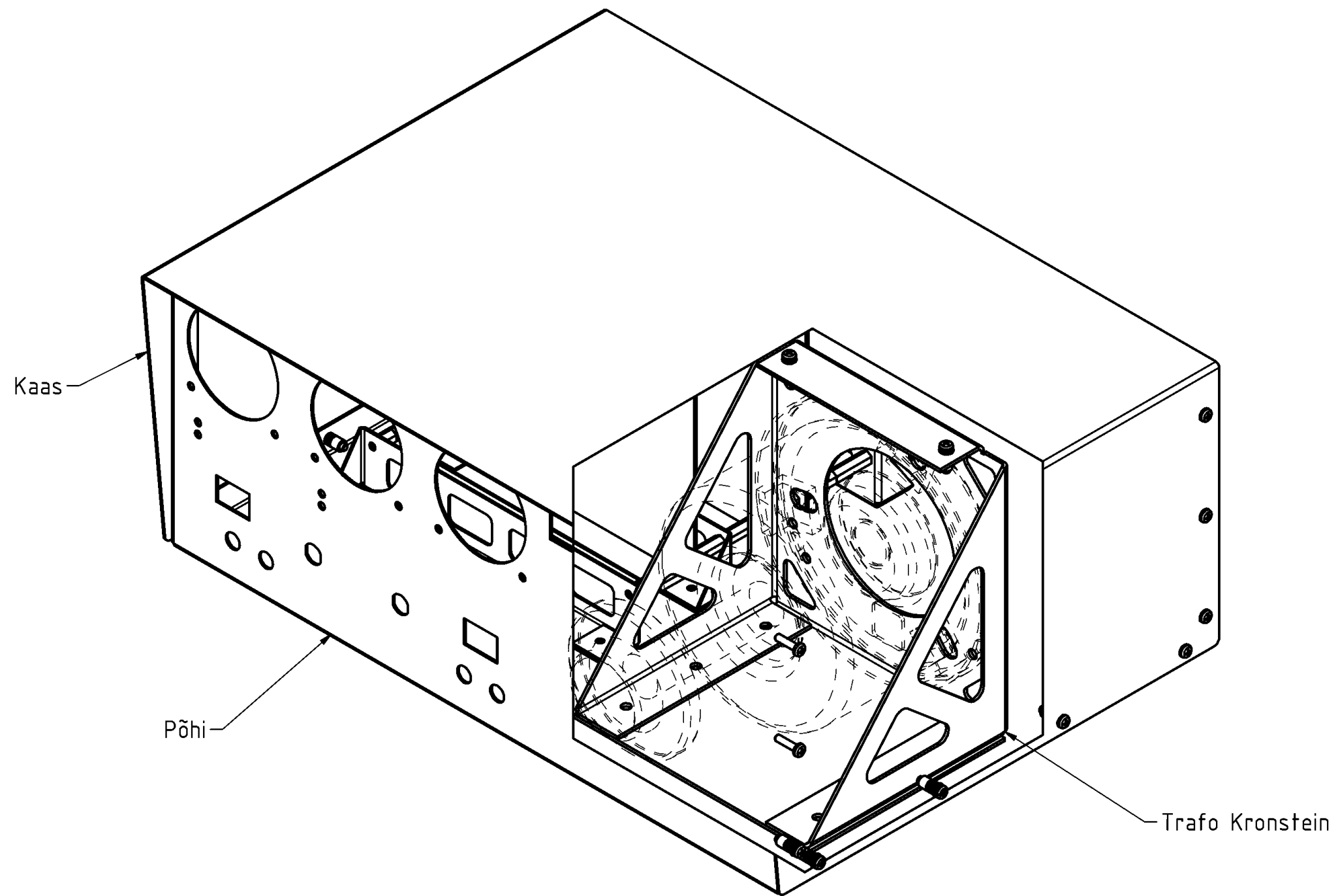
mass: 8 kg

TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/Lehti 1/4
Koostaja: Andres Pärnpuu		Aparaadi koostujoonis, leht 1: Välisvaated	
Juhendaja: Martin Jaanus			
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Labori toiteallika disainimine	



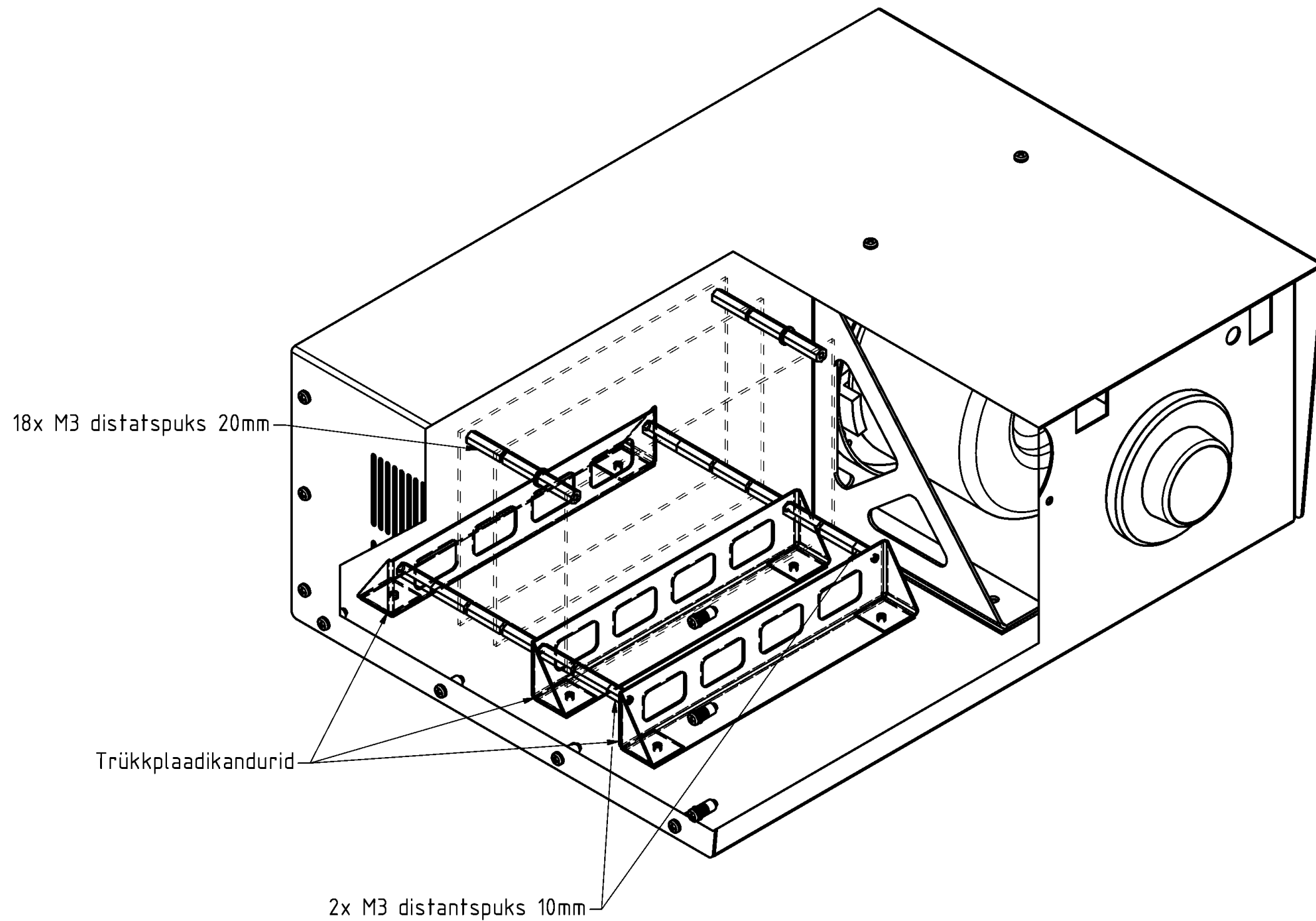
mass: 8 kg

TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/Lehti 2/4
Koostaja: Andres Pärnpuu		Aparaadi koostujoonis, leht 2: Esipaneeli indikaatorid ja juhtseadised	
Juhendaja: Martin Jaanus			
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Labori toiteallika disainimine	



mass: 8 kg

TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/Lehti 3/4
Koostaja: Andres Pärnpuu		Aparaadi koostujoonis, leht 3: Sisevaade trafo kronsteinile	
Juhendaja: Martin Jaanus			
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Labori toiteallika disainimine	



mass: 8 kg

TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/Lehti 4/4
Koostaja: Andres Pärnpuu		Aparaadi koostujoonis, leht 4: Sisevaade elektroonikamoodulite kinnitusele	
Juhendaja: Martin Jaanus			
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Labori toiteallika disainimine	