



INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

NORD POOL ELEKTRITURU HINDA ARVESSE VÕTTEV AKULAADIJA

BATTERY CHARGER THAT CONSIDERS NORD POOL ELECTRICITY MARKET PRICE

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Eke Tominga

Üliõpilaskood: 193628

Juhendaja: Indrek Roasto, vanemlektor

Tallinn 2022

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Eke Tominga,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Nord Pool elektriturude hinda arvesse võttev akulaadija“, mille juhendaja on Indrek Roasto,
 - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2022

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Eke Tominga

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Nord Pool elektrituru hinda arvesse võttev akulaadija

Kuupäev: 18.05.2022

69 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: vanemlektor Indrek Roasto

Töö konsultant: puudub

Sisu kirjeldus:

Juhitamata elektritootjate integreerimine elektrivõrku tõstab elektri tootmise ning elektri hinna volatiilsust. Paindlikud elektritarbijad annavad võimaluse võrku ühendada rohkem taastuvenergia tootjaid samal ajal andes kliendile võimaluse osta elektrit keskmiselt odavamalt hinnalt.

Antud lõputöö eesmärgiks on luua akulaadija prototüüp, mis võtab oma laadimisvõimsuses arvesse Nord Pool elektrituru hindasid. Prototüübi arendus koosneb süsteemi arhitektuuri loomisest, komponentide valimisest, elektriskeemi loomisest, programmikoodi kirjutamisest ning selle testimisest. Lõputöö tulemusena sai kontseptsioon kinnitust, kuid madala võimsuse tõttu prototüüp pole majanduslikult tasuv. Käesolevas lõputöös välja töötatud programmi ja saadud teadmisi on võimalik kasutada palju võimsama akulaadimissüsteemi arendamiseks.

Märksõnad: Nord Pool, toitemuundur, aku laadimine, paindlik tarbimine, prototüüp, bakalaureusetöö

ABSTRACT

Author: Eke Tominga

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Battery Charger that Considers Nord Pool Electricity Market Price

Date: 18.05.2022

69 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Senior Lecturer Indrek Roasto

Consultant(s): none

Abstract:

Integrating intermittent electricity sources into grid increases the volatility of electricity generation and electricity price. Having flexible electricity consumption gives an opportunity to connect more renewable energy sources into grid while giving the consumer opportunity to buy electricity for a lower price per average.

Goal of this thesis is to develop a prototype battery charger, that considers Nord Pool electricity market prices in its charging power. Development of the prototype consists of creating system architecture, choosing components, creating electrical schematics, writing programming code and testing it. As a result of this thesis, feasibility of the concept was confirmed, but because of low power, the charger is not economically feasible. Code developed and knowledge gained can be used for the development of more powerful battery charging system.

Keywords: power converter, battery charging, flexible consumption, prototype, Bachelor thesis

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Akupanga laadimise juhtimine Nord Pool elektrituru hinna järgi
Lõputöö teema inglise keeles:	Battery Charge Control According to Nord Pool Electricity Market Price
Üliõpilane:	Eke Tominga 193628EAAB
Eriala:	Elektroenergeetika ja mehhatroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Indrek Roasto
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	-
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	2022/2023 sügis
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2022

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Mitte-juhitavate elektritootjate osakaalu suurenemisel elektrivõrgus muutub aina olulisemaks ka võimekus tarbimises paindlik olla. Teema on oluline nii põhivõrgu operaatorile, kelle jaoks tekib võimalus tarbimist sujuvalt muuta kui ka tarbijale, kes peab elektri eest vähem maksma – tarbides elektrit siis, kui see on odavam. Majapidamises on suurel hulgal koduelektroonikat (nt mobiiltelefonid, nutikellade, arvutid, robottolmuimejad jne), mis töötavad akutoitel ning mille kasutamise teeks nutikas laadimine soodsamaks. Elektrivõrgu jaoks tähendaks nutika laadimise laialdane kasutuselevõtt ühtlasemat ja kiiresti ning täpselt juhitavat tarbimist, mistõttu on töö mõju ka suuremas mastaabis kui üks majapidamine.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on välja töötada nutika akulaadija prototüüp, millega saab laadida väikeseadmete akusid Nord Pool elektrituru hinna järgi.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Nord Pool elektrihinna kujunemine ja tasuvusarvutuse põhimõtted tarbijatele.
2. Laadimissüsteemi modelleerimine arvutis.
3. Juhtimisalgoritmi väljatöötamine mudeli baasil ja simuleerimine.
4. Aku ja laadimismuunduri vahelise andmeside väljatöötamine. Akude analüüs ja laadimistsüklite mudeldamine
5. Prototüübi projekteerimine ja ehitamine.

4. Lähteandmed

Lähteandmed uurimistöö eesmärkide lahendamiseks tulevad Nord Pool'i poolt avaldatud andmetest ning komponentide ja seadmete andmelehtedest.

5. Uurimismeetodid

Kirjanduse analüüs

Mudelite ja simulatsiooni koostamine

Algoritmi koostamine

Prototüübi arendus ja ehitus

Algoritmi, mudelite ja prototüübi katseline kontroll

6. Graafiline osa

Põhilised joonised: elektriskeemid, mudeli skeemid ning prototüübi mehaanilised joonised. Loogikaskeemid algoritmi tööprotsessist (*flow chart*).

Graafiline osa peamiselt lisades, väikesed alaosüsteemi joonised/skeemid ka põhiosas, et illustreerida tööprintsipi.

7. Töö struktuur

Lõputöö ülesanne

Teema põhjendus

Sissejuhatus

1. Elektriturgu järgiv tarbimine
 - 1.1. Ülevaade Nord Pool elektriturust
 - 1.2. Ülevaade olemasolevatest elektriturgu järgivatest seadmetest ja tarbimise juhtimisest
 - 1.3. Tasuvusanalüüs erinevate seadmete hinnapõhise tarbimise kohta
2. Akude laadimis põhimõtted ja jõuelektroonika
 - 2.1. Pliiakude laadimine
 - 2.2. Li-akude laadimine
 - 2.3. Jõuelektroonika laadimiseks
3. Elektriturgu järgiva toitemuunduri disain
 - 3.1. Laadimismuunduri tehnilised nõuded
 - 3.2. Funktsionaalsus ja süsteemi toimimise printsiibid
 - 3.3. Elektriskeemi koostamine
 - 3.4. Mehaaniline disain ja kasutusliidese loomine
 - 3.5. Liidestamine ja algoritmi loomine
4. Testimine ja tulemuste analüüs
5. Kokkuvõte ja tuleviku tegevused

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Allikatena kasutusel peamiselt teadusartiklid, aruanded ja standardid.

T. Lehtla, Jõuelektroonika ja elektriajamid, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2003.

K. Billings, T. Morey, Switchmode Power Supply Handbook, London: McGraw-Hill Companies, 2011.

P. Horowitz, W.Hill, The Art of Electronics, Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

Texas Instruments, „A Practical Introduction to Digital Power Supply Control,” 2005. [Võrgumaterjal]. <https://www.ti.com/lit/ml/slup232/slup232.pdf> . [Kasutatud 26.10.2021].

9. Lõputöö konsultandid

Tööl puuduvad konsultandid.

10. Töö etapid ja ajakava

Kirjanduse läbitöötamine (21.11.2021)

Teoreetilise osa kirjutamine (07.12.2021)

Modelleerimine (18.01.2022)

Testimine (20.02.2022)

Uuringu tulemuste kirjeldamine (01.03.2022)

Järelduste kirjutamine, kokkuvõtte koostamine (15.03.2022)

Töö esmane versioon valmis (22.03.2022)

Parandatud ja täiustatud versioon valmis (15.04.2022)

Töö lõplik versioon valmis (01.05.2022)

Töö kaitsmiseks esitatud (08.05.2022)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT.....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	12
Lühendite ja tähiste loetelu.....	13
SISSEJUHATUS	14
1 ELEKTRITURGU JÄRGIV TARBIMINE.....	16
1.1 Ülevaade Nord Pool elektriturust.....	16
1.2 Ülevaade olemasolevatest elektriturgu järgivatest seadmetest	17
1.3 Tasuvuse põhimõtted erinevate seadmete hinnapõhise tarbimise kohta	18
2 SÜSTEEMI ARHITEKTUUR JA ALAMSÜSTEEMIDE ANALÜÜS.....	23
2.1 Laadimismuunduri tehnilised nõuded	23
2.2 Süsteemi toitemuunduse osa.....	24
2.2.1 Akude laadimine	24
2.2.2 Süsteemi toitemuunduse osa riistvara valimine.....	26
2.3 Süsteemi USB osa	27
2.3.1 USB kasutamine akude laadimiseks	27
2.3.2 Süsteemi USB osa riistvara valimine	29
2.4 Süsteemi juhtsüsteemi disain	30
3 ELEKTRITURGU JÄRGIVA TOITEMUUNDURI ELEKTRISÜSTEEMI DISAIN	32
3.1 Toitemuunduri disain.....	32
3.1.1 Kõrgepinge sisend, alaldamine ja silumine	32
3.1.2 Toitemuunduri kontrollier	33
3.1.3 Trafo ja transistor	33
3.1.4 Summutusahel ja väljundfilter.....	33
3.1.5 Tagasisideahel	34
3.2 Juhtsüsteemi disain.....	35
3.2.1 Juhtsüsteemi toiteallika disain.....	35
3.2.2 Juhtsüsteemi programmeerimisskeemi disain	36
3.2.3 Juhtsüsteemi sisendid ja väljundid	36
3.3 USB väljundi disain	37
4 SÜSTEEMI PROGRAMMI LOOMINE JA MEHAANILINE DISAIN	39
4.1 Süsteemisise kommunikatsioon	39
4.1.1 Digitaalse reostaadi kontrollimine	41

4.2 Väline kommunikatsioon	42
4.2.1 Masinliidestuse kasutamine elektrituru andmete lugemiseks	43
4.3 Andmete analüüs ja algoritmi rakendamine	43
4.4 Korpuse projekteerimine.....	44
5 TESTIMINE JA TULEMUSTE ANALÜÜS.....	46
5.1 Komplekteerimine ja põhifunktsionaalsuse saavutamine	46
5.1.1 Süsteemi komplekteerimine.....	46
5.1.2 Süsteemi riistvara testimine	47
5.2 Funktsionaalsuse testimine	48
5.2.1 Süsteemi tarkvara toimimine	48
5.3 Tulemuste analüüs ja ettepanekud edasisteks uuringuteks.....	50
KOKKUVÕTE	52
Kasutatud kirjandus.....	54
LISAD	59

EESSÕNA

Lõputöö üldine teema on lõputöö koostaja poolt valitud ning inspireeritud lõputöö koostaja soovist tulevikus ise juhtida enda elektritarbimist soodsaks ja keskkonnasõbralikuks. Lõputöö täpse teema sõnastamisel oli suureks abiks lõputöö juhendaja Indrek Roasto, keda soovin ka tänada igakülgse abi eest nii lõputöö kirjutamisel kui ka andis palju häid näpunäited trükkplaadi disainil.

Veel sooviksin tänada Liisa Kõve abi eest trükkplaadi korpuse disainimesel ning Henri Palmi, et ta omast vabast ajast oli nõus õpetama Solidworks-i kasutamist.

Viimased tänusõnad lähevad Lauri Kütile, kes õpetas mulle mu ülikooliõpingute esimesel aastal väga põhjalikult kõik elektroonika põhitõed ja kuidas süsteeme luua, ilma milleta ma poleks kindlasti võimeline olnud iseseisvalt sellisel määral elektroonikat disainida.

Lühendite ja tähiste loetelu

- AC – Vahelduvvool (ingl. k *Alternating Current*)
- ADC – Analoog-digitaalmuundur (ingl. k *Analog-Digital Converter*)
- API – Masinliidestus (ingl. k *Application Programming Interface*)
- BMS – Aku juhtimissüsteem (ingl. k *Battery Management System*)
- BoM – Tükitalabel (ingl. k *Bill of Materials*)
- CC – Konstantne vool (ingl. k *Constant Current*)
- CO₂ – Süsinikdioksiid
- CSV – Komaga eraldatud väärtused (ingl. k *Comma Separated Values*)
- CV – Konstantne pinge (ingl. k *Constant Voltage*)
- ESD – Elektrostaatiline lahendus (ingl. k *Electrostatic Discharge*)
- GMT – Greenwichi kohalik keskmine päikeseaeg (ingl. k *Greenwich Mean Time*)
- GPIO – Üldise otstarbega sisend-väljund (ingl. k *General Purpose Input-Output*)
- HTTP – Hüperteksti edastusprotokoll (ingl. k *Hypertext Transfer Protocol*)
- HTTPS – Turvaline hüperteksti edastusprotokoll (ingl. k *Hypertext Transfer Protocol Secure*)
- I²C – Integraallülituste vaheline ahel (ingl. k *Inter-Integrated Circuit*)
- IDE – Integreeritud arenduskeskkond (ingl. k *Integrated Development Environment*)
- IPS/UPS - Venemaa ühendatud elektrisüsteem
- JSON – JavaScripti objekti notatsioon (ingl. k *JavaScript Object Notation*)
- LED – Valgusdiod (ingl. k *Light Emitting Diode*)
- Li-ion – Liitium-ioon
- MOSFET - Isoleeritud paisuga väljatransistor (ingl. k *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*)
- MCU – Mikrokontroller (ingl. k. *Microcontroller Unit*)
- OBC – Pardalaadija (ingl. k *On Board Charger*)
- PD – Võimsuse edastus (ingl. k *Power Delivery*)
- PPS – Programmeeritav toiteplokk (ingl. k *Programmable Power Supply*)
- RTC – Reaalajakell (ingl. k *Real Time Clock*)
- SoC – Laetuse olek (ingl. k *State of Charge*)
- TTL- Transistor-transistor loogika (ingl. k *Transistor-Transistor Logic*)
- UART - Universaalne asünkroonne vastuvõtja-saatja (ingl. k *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*)
- USB – Universaalne jadaliides (ingl. k *Universal Serial Bus*)
- V2G – Sõidukist Võrku (ingl. k *Vehicle to Grid*)
- V2H – Sõidukist Majja (ingl. k *Vehicle to Home*)
- V2L – Sõidukist Koormusele (ingl. k *Vehicle to Load*)

SISSEJUHATUS

Tuule-ja päikeseenergia kaudu toodetud elektri osakaal on üle Euroopaliselt kasvamas. Olles ilmast sõltuvad ja seeläbi mitte juhitavad tootjad, siis ei ole võimalik pidevalt elektri tootmist ette ennustada ega vastavalt vajadusele muuta, mis võib tuua nende veelgi suurema kasutuselevõtu korral probleeme elektrisüsteemis. Igal ajahetkel peab tootmine võrduma tarbimisega ning põhivõrgu operaator reaalselt reguleerib tootmisvõimsusi, selleks, et tasakaal püsiks, sest tarbimist pole võimalik täpselt ette ennustada. Käesolev lõputöö pakub välja võimaliku lahenduse, kuidas akulaadimissüsteemi juhtida elektrituru hinna järgi ning selle läbi pakkuda võimaliku lahenduse, kuidas ka tarbimist juhtida.

Töö eesmärgiks on arendada nutika akulaadija prototüüp, millega saab laadida väikeseadmete akusid Nord Pool elektrituru hinna järgi. Autor ise usub, et paindlik tarbimine koos energiasalvestussüsteemidega aitab elektrivõrku muuta palju töökindlamaks ja muudab taastuvenergia võrku ühendamise lihtsamaks ning kulusäästlikumaks, samuti vähendab nõudlust lühiajaliste gaasiga töötavate jaamade käitamise vastu. Seetõttu soovis autor ise uurida, kuidas paindlikult töötav tarbija arendamine ja töötamine reaalsuses välja näeks.

Roheliste energiatehnoloogiate ja elektrisüsteemi digitaliseerimine ja paindlik korraldus on väga aktuaalne ning nii Eesti suured riigifirmad kui ka teadus- ja õppeasutused üritavad koolitada välja inimesi ja luua lahendusi, mis on vajalikud rohepöörde jätkamise ja edasi viimisega.

Selleks et töö eesmärgid täita, on vajalikud ülesanded prototüübi valmimiseks:

1. Nord Pool energiaturu põhimõtete analüüs
2. Laadimissüsteemi modelleerimine arvutis.
3. Aku ja laadimismuunduri vahelise andmeside väljatöötamine ja juhtimissüsteemi välja töötamine.
4. Prototüübi projekteerimine ja ehitamine.

Arendustegevus energiasalvestusseadmete ja juhitud tarbimise vallas käib praegusel ajal väga kiiresti, kuid seda pidurdab ka standardiseerimise puudulikkus ja litsentseerimise keerukus. Suureks probleemiks on see osutunud näiteks elektriautode lülitamisel võrku - kasutades neid kui võrku ühendatud akusüsteeme [1].

Lõputöö koosneb enamikus osas praktilisest projekteerimisest ja arvutustest ning vajalike alamsüsteemide arendamisest ning nende ülevaatest.

Esimeses peatükis on ülevaade Nord Pool elektriturust ja selle toimimisest ning olemasolevatest seadmetest, mis on võimalised võtma arvesse elektriturgu, samuti näide kuidas on võimalik juhtida võimsust võttes arvesse elektriturgu ning selle majandusliku tasuvuse põhitõdedest. Teises peatükis arendatakse süsteemi üldine arhitektuur ning tutvustatakse alamsüsteemide toimimist ja võrreldakse võimalike lahendusi nende loomisel, valitakse välja ka olulisemad kasutatavad komponendid. Kolmandas peatükis koostatakse elektriskeemid, luuakse konkreetseid alamsüsteemid ja arvutatakse komponentide väärtused. Neljandas peatükis arendatakse süsteemile tarkvara, kirjeldatakse kuidas toimib alamsüsteemide vaheline kommunikatsioon ning kommunikatsioon väliste süsteemidega. Viiendas peatükis testitakse süsteemi ja selle funktsionaalsust ning võetakse kokku tulemused ja soovitusel edaspidisteks uuringuteks.

Jõuelektroonika mudeldamiseks kasutatakse programmi PLECS, elektriskeemide loomiseks ja trükkplaadi disainimiseks kasutatakse Altium Designer-it ja trükkplaat disainitud kasutades programmi Altium Designer. Mehaanilise disaini jaoks on kasutatud Solidworks-i ja programmi tarkvara on kirjutatud C++ keeles. Abiprogrammidena on kasutatud näiteks Texas Instruments-i Power Designer Tool Calculator-it ja erinevaid online-kalkulaatoreid, selleks et kiirendada arendusprotsessi. Lisades on välja toodud elektriskeemid, simulatsiooniskeemid, mehaanilised joonised ning tükitabel. Programmikood on oma pikkuse tõttu lisatud Github-i lingina.

1 ELEKTRITURGU JÄRGIV TARBIMINE

1.1 Ülevaade Nord Pool elektriturust

Eesti kuulub teiste Balti riikidega ühendatud elektrisüsteemi BRELL ning töötab sünkroonselt Venemaa ühendatud elektrisüsteemiga (IPS/UPS). See tähendab, et sagedus on Eestis ja muudes Balti riikides sünkroniseeritud Venemaa ja Valgevene sagedusega [2] [3]. Eesti plaanib koos teiste Balti riikidega ennast IPS/UPS elektrisüsteemist lahti ühendada aastal 2025 ning sünkroniseerida end Euroopa elektrivõrguga. Olemasolevad alalisvooluühendused teiste Euroopa Liidu liikmesriikidega on andnud juba võimaluse Eestil ja teistel Baltimaadel võimaluse ühineda Põhjamaade elektribörsiga Nord Pool, mis võimaldab elektriga kauplemist naaberriikidega [3].

Eesti elektriturg on Nord Pool-i osa ja täielikult avatud aastast 2013, mis tähendab, et elektrihinda ei määra Konkurentsiamet, vaid see tekib avatud turu tingimustes. See tähendab, et hind tekib nõudluse ja pakkumise tasakaalupunktis ning see annab võimaluse erasektoril efektiivselt majandades saada konkurentsieelise [2].

Elering on oma 2020. aasta varustuskindluse aruandes toonud välja pikas perspektiivis kolm suurimat mõjutegurit, mis varustuskindlust suurendavad või vähendavad. Nendeks on 2025. aastal toimuv sünkroniseerimine, kliimapoliitika ning majanduse konkurentsivõime toetamine. On toodud välja, et kliimapoliitika viib turult välja paindlikud ette planeeritava tootmistsükliga süsinikuintensiivseid tootmisvõimsuseid ning majanduse konkurentsivõime toetamine tähendab, et Eesti-sisese tootmisvõimsuse garanteerimine suurendab elektrihinda tarbijale ja võib vähendada tootmisseadmete lisandumist võrku [4].

Elektrihinda iseloomustab Nord Pool elektriturul volatiilsus – nii tunnine, päevane, nädalane kui ka aastane. See on põhjustatud nii tootmise kui ka tarbimise muutlikkusest ning elektrituru eripärast, et elektrit pole võimalik suurtes kogustes salvestada. Elektrihinna volatiilsust peetakse suuremaks kui muude kaupade hindade oma. Teadmised, kuidas juhtida tarbimist, et kulusäästlikult elektrienergiat tarbida, on seetõttu väga olulised [5]. On oodata, et mitte juhitava taastuenergia lisandumisega elektriturule suureneb hinna volatiilsus veelgi. Tuule- ja päikeseenergia suurema osakaaluga võib elektritootmine muutuda järsult sõltuvaks ilmastikuoludest [6].

Üks Nord Pool Spot-i iseloomustavatest omadustest on päev-ette turg. See tähendab, et järgneva 24h jaoks saavad kliendid osta ja müüa energiat suletud oksjonil ning hind

kujuneb iga tunni jaoks vastavalt pakutud tootmisvõimsuste ja eeldatavate tarbimisvõimsuste ristumispunktis (piisavalt tootmist, et kõike tarbimist rahuldada ja seda kõige kallima tootja hinnaga) [7].

1.2 Ülevaade olemasolevatest elektriturgu järgivatest seadmetest

Euroopa Liidu direktiivi 2019/944 järgi on Euroopa Liidu elektrituru üheks visiooniks 2015. aastal avaldatud dokumendi „Energiatarbijatele Uue Diili toimetamine“ („Delivering a New Deal for Energy Consumers“) kohaselt kõikide osapoolte osalemine elektrituru toimimises. See tähendab väiketootmise ja hajatootmise suurendamist ning paindlikku tarbimist. Euroopa Liit on astunud mitmeid samme, et vähendada elektrisüsteemi tsentraliseeritust ja teha see uute tootjate ja paindlike tarbijate jaoks rohkem ahvatlevaks [8].

Muutlikku elektri hinda on üritanud kasutada mitmed firmad selleks, et elektri tarbimist odavamaks muuta. Suur potentsiaal on elektriakude paindlik kasutus. On uuritud ja katsetatud mitmete lahendustega, mis kasutavad ära elektriautode suurt akupakki. Mõned lahendused muudavad elektriauto laadimise odavamaks – akut laetakse siis, kui elekter on odavam. Üks sellise lahenduse pakkujatest on Eestis paiknev Gridio. Gridio on tarkvaraline lahendus, mis kasutab ära elektriautodes ja laadimisjaamades olemasolevat riistvara. Hetkel on toetatud ainult mõned automudelid, kuid lahendus on saadaval mitmes riigis ning on hetkel klientidele tasuta [9].

Elektriautodega seotud keerulisem äriplaan on elektriauto akupaki kasutamine kahe-suunaliseks energiavooks. Siinjuures on kasutusel mõisted nagu Sõidukist Võrku (*Vehicle to Grid - V2G*), Sõidukist Majja (*Vehicle to Home - V2H*) ja Sõidukist Koormusele (*Vehicle to Load - V2L*). Kõik need vajavad sarnase võimekusega riistvara, kuid kasutatakse veidi erinevateks otstarveteks [10]. V2G kasutaks elektrisõidukite akupakki ära võrku ühendatud elektri salvestussüsteemina. Tippkoormuse ajal elektrisõiduk oleks võrgu jaoks tootja ning odava elektri korral oleks akupakk võrgu jaoks koormus ning sellega aitaks V2G hoida tasakaalu tarbimise ja tootmise juures. Suuremad salvestusvõimsused aitavad vähendada energiasüsteemi süsinikdioksiidi (CO₂) heidet, andes võimaluse integreerida võrku suuremas koguses taastuvenergiat [1]. V2G süsteemi miinusteks on keerulise pardalaadija (*On Board Charger - OBC*) vajadus. Elektriauto jõuelektronika peab olema võimeline V2G süsteemi toetama [11]. Elektriautodel pole veel ka tekkinud ühtset laadimisstandardit ning veel pole suudetud

standardiseerida V2G tarkvaraline lahendus. Seetõttu on igas elektrivõrgus vaja iga elektrisõiduki mudeli jaoks välja arendada ja modifitseerida tehnoloogiat [12].

Erinevaid elektribörsi hinda jälgivaid hindu toodab Eestis ka Celeon. Firma sihiks on kodus töötavaid elektrilisi seadmeid kasutada siis, kui elektrihind on börsil soodne ning vältida kasutust, kui elektrihind on kõrge. Võimalik on soetada lahendusi põhiliselt kütteks – õhksoojuspumbad, elektriradiaatorid; kuid on võimalik tellida ka „tarku“ pistikupesasid ning kõike juhtida nutitelefoniga rakenduse kaudu [13]. Põrandakütte lahendust on uuritud ka varasemalt TalTech-i uurimistöös raames [14]. Eestis tegutseb firma nimega Fusebox, mis pakub „virtuaalse elektrijaama“ lahendusi. Virtuaalse elektrijaama puhul suurtarbijad, näiteks RIMI, automaatselt vähendavad oma tarbimist elektrisüsteemis energiadefitsiidi korral ja ülejäägi puhul tarbivad rohkem. Kontrollitakse kütet, jahutuskompressoreid, mootoreid jne [15]. Erakliendil on võimalik osta ka intelligentse juhtimisega termostaati, mida kasutada põrandakütte puhul – kütmise optimeerimiseks jälgib termostaat elektri börsihinda ja kütab siis, kui hind on madalam, samas hoides kogu tarbitud energia samana. See võimaldab kütmise just siis, kui taastuvenergia toodang on suurem ja elektri hind seeläbi odavam [16].

1.3 Tasuvuse põhimõtted erinevate seadmete hinnapõhise tarbimise kohta

Taastuvenergia kasutamise suurenedes tekib probleem, kus tarbimine ja tootmine pole tasakaalus, sest näiteks päikeseelektrit toodetakse võrku kõige rohkem kella 13 – 14 vahel, kuid tarbimine on kõige kõrgem õhtul. Väga akuutne on see probleem näiteks Californias, kus on päikesest toodetud energia osakaal väga suur [17]. Probleemiks võib tekkida küsimus, mida teha üleliigse energiaga, mida toodetakse päeval. Üheks lahenduseks pakutakse probleemi lahendamiseks energia salvestust ning kõige tuntumad nendest on akud, hüdropumpjaamad, vesinik ja kokkusurutud õhu energiasalvestus (*compressed air energy storage*). Energiasalvestussüsteemid toimivad lihtsal põhimõttel – energiat salvestatakse juhul kui võrgus on tootmist üleliia ja elektrit toodetakse salvestatud energiast juhul kui võrgus on tootmist liiga vähe [18]. Kuigi energia salvestamine võrgu mastaabis pole veel leidnud väga suurt kasutust, siis arendusprojekte on palju ja loodetakse väga suurele kasvule selles sektoris. Eestis arendatakse ühte suurt projekti: hüdropumpjaam Paldiskis. Planeeritav jaam on võimsusega 500 MW ja aitaks vähendada regiooni CO₂ emissioone tänu salvestussüsteemist lisatud võrgu võimekusele rohkem taastuvenergiat võrku integreerida [19]. Hetkel on suur probleem näiteks akusalvestussüsteemide puhul nende majanduslik tasuvus. Väga palju mõjutab sellise energiasalvestuse tasuvus

asukohast ja elektri hinna volatiilsusest, näiteks Poolas läbi viidud uuring leidis, et eratarbija akusüsteem pole finantsiliselt tasuv. Kõige suuremaks probleemiks toodi seal välja elektri hinna tekkimise komponendid, sest ostes võrgust elektrit, makstakse peale elektri tootmise ka muid tasusid ja nende osakaal on erinev eri Euroopa riikides [20]. Palju on uuringuid viidud läbi ka tarbimise paindlikumaks muutmise kohta pealt. Nelja Euroopa riigi kohta käiv uuring on leidnud, et kuni 18% elektritarbimisest kodumajapidamises oleks võimalik ajaliselt nihutada: põhiliselt kütte ja kodumajapidamistarvete näol. Suuremate väljakutsetena tuuakse välja jällegi tasuvusküsimus: ärimudel pole selge, näiteks kas paindliku tarbimist juhib kasutaja, seadet tootev firma või süsteemi operaator. Samuti on toodud välja kaugelt juhtimise turvapõhised: andmete turvalisus, usaldus tehnoloogia toimimisse ja lihtsalt manuaalsele juhtimisele üleminek [21].

Alternatiivina on võimalik kasutada vesinikku energiasalvestussüsteemina. Vesinikku saab toota odavast taastuvast elektrist ja kasutada kütusena tööstuses, transpordis kui ka elektri tootmiseks, enamasti küll tagavarageneraatorites. Ka Eestis on väga suur osa võimalikest pilootprojektidest vesiniku kasutamiseks näiteks transpordis või tööstuses ja selle kohta on tellinud väga põhjaliku analüüsi Riigikantselei Strateegiabüroo. Analüüsi põhjal ongi mõistlik kasutada seda kui kütust, mitte elektri tootmiseks statsionaarsetes rakendustes, sest seda peetakse suhteliselt kalliks. Pakutakse välja selle võimalikkus tiputarbimise jaama (*peaker plant*) või avariielektrijaama kütusena [22].

Selleks, et hinnata seadmete elektri hinnapõhise tarbimise finantsilist mõistlikkust, oleks tarvis kõigepealt arvutada välja eeldatav tasuvusaeg. Mida lühem on seadme tasuvusaeg, seda kasulikum see on tarbijale [23]. Paindliku tarbimise tasumise kohta on tehtud uuringuid ka varem ning on leitud, et mastaap on oluline ja projekti tasuvus sõltub paindlikult tarbitava energia suuruselt: Taanis 2013. aastal läbi viidud uuring leidis, et olemasolevate seaduste ja toetuste põhjal tasub see ära üle 20 kWh paindliku tarbimisenergia võimekuse puhul, kuid planeeritud seadusemuudatuste korral võib see alaneda 1 kWh peale [24].

Käesoleva lõputöö eesmärk on arendada välja akulaadimissüsteemi prototüüp, mille puhul oleks võimalik sujuvalt laadimisvõimsust vastavalt elektri hinnale muuta. Enamik punktis 1.2 kirjeldatud toodetest töötavad sees-väljas (ON-OFF) printsibiil, kus seade kas töötab või ei tööta. Eestis on kaitstud magistritöö, mis pakkus välja astmelise tarbimisvõimsuse, kus näiteks juhul kui elektri hind on 15...50% päeva keskmisest kõrgem, siis tarbimisvõimsust piiratakse kuni 30% peale maksimaalsest [25]. Käesoleva lõputöö eesmärk on kaotada ka astmelisus ja tarbimisvõimsust juhtida täpselt.

akulaadimissüsteemi prototüübi väljundvõimsuse arvutamiseks kasutatakse suhtelisi hindu, ehk ei kasutata kindlat hinnaniivood, mida võtta referentsväärtuseks, vaid võrreldakse päeva vältel hindu omavahel. Kõigepealt on tarvis seega välja arvutada päeva keskmine hind ning selleks, et jooksva tunni väljundvõimsust arvutada, on tarvis võrrelda jooksva tunni hinda nii päeva keskmise hinnaga kui ka päeva minimaalse ja maksimaalse hinnaga.

Järgnevas tabelis on välja toodud ühe maikuu päeva tunnipõhised elektri hinnad, välja arvutatud väljundvõimsus protsentides paindliku tarbimise korral ning elektri hinna võimsus paindliku tarbimise ja pideva tarbimise vahel juhul kui maksimaalne tarbimisvõimsus on 1 MW.

Tabel 1. Võrdlus paindliku ja konstantse võimsusega tarbimise vahel

Kellaaeg	Hind/MWh (€)	Väljundvõimsus, paindlik tarbimine (%)	Hind, pidev tarbimine (€)	Hind, paindlik tarbimine (€)
00:00-01:00	20,04	100,00	11,11	20,04
01:00-02:00	40,04	85,30	22,20	34,16
02:00-03:00	40,02	85,32	22,19	34,14
03:00-04:00	40,02	85,32	22,19	34,14
04:00-05:00	40,04	85,30	22,20	34,16
05:00-06:00	40,01	85,33	22,19	34,14
06:00-07:00	117,92	36,67	65,39	43,25
07:00-08:00	90,09	49,11	49,95	44,24
08:00-09:00	148,86	22,85	82,54	34,02
09:00-10:00	90,10	49,10	49,96	44,24
10:00-11:00	90,01	49,14	49,91	44,23
11:00-12:00	200,01	0,00	110,90	0,00
12:00-13:00	58,27	71,91	32,31	41,90
13:00-14:00	105,42	42,26	58,45	44,55
14:00-15:00	159,93	17,91	88,68	28,64
15:00-16:00	29,97	92,70	16,62	27,78
16:00-17:00	30,34	92,43	16,82	28,04

17:00-18:00	101,42	44,04	56,24	44,67
18:00-19:00	90,04	49,13	49,93	44,24
19:00-20:00	90,07	49,12	49,94	44,24
20:00-21:00	90,09	49,11	49,95	44,24
21:00-22:00	90,02	49,14	49,92	44,23
22:00-23:00	180,56	8,69	100,12	15,69
23:00-00:00	130,87	30,89	72,57	40,42

Konstantse koormusega tarbides sama energiahulga kasutamiseks peaks töötama tarbija pidevalt 55,45 % võimsusega. Näidiseks on võetud tarbija, mille maksimaalne võimsus on kuni 1 MW ehk pideva tarbimise puhul on pidev koormus 554,5 kW. Sellisel juhul maksaks pidev tarbimine 1172,30 € ja paindliku algoritmi järgi tarbimine 849,30 €, mis tähendab 322,88 € ehk 27,54% suurust hinnasäästu.

Keskmise hinna saab arvutada valemiga:

$$hind_{kesk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n hind_i, \quad (1.1)$$

kus $hind_{kesk}$ on päeva keskmine hind ning $hind_i$ on ühe tunni elektri hind MWh kohta.

Väljundvõimsuse arvutamise aluseks võetakse, et minimaalse hinna puhul töötab süsteem 100% võimsusega, keskmise tunnihinna puhul töötab süsteem 50% võimsusega ja maksimaalse tunnihinna korral süsteem minimaalse ehk 0% võimsusega. Ülejäänud hindade välja arvutamiseks kasutatakse lineaarset seost ehk leitakse võimsuse sõltuvus hetke tunnihinnast kujul $y = mx + b$, kus y on väljundvõimsus protsentides maksimaalsest võimsusest ning x on hetke tunnihind. Selle funktsiooni on võimalik leida kahe olemasoleva punkti abil. Selleks, et arvutada välja m -i kasutatakse valemit:

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{P_{kesk} - P_{max}}{hind_{kesk} - hind_{min}}, \quad (1.2)$$

kus m tähistab väljundfunktsiooni tõusu, P_{kesk} keskmist võimsust ehk 50%, P_{max} maksimaalset võimsust ehk 100%, $hind_{kesk}$ päeva keskmist elektri hindu ja $hind_{min}$ päeva minimaalset elektri hindu.

See valem kehtib ainult juhul, kui elektri hind on odavam kui päeva keskmine. Kõrgema elektri hinna puhul on tarvis arvutada eraldi tegurid. Selleks, et arvutada välja y -i kasutatakse valemit:

$$b = P_{max} - (m \cdot hind_{min}), \quad (1.3)$$

Kus b on arvutatava väljundfunktsiooni vabaliige, P_{max} tähistab maksimaalset võimsust ehk 100%, m tähistab valemis 1.2 välja arvutatud väljundfunktsiooni tõusu ja $hind_{min}$ päeva minimaalset elektri hindu.

Põhimõtteliselt kujutab valem endas vabateguri leidmist, et võrdus $y = mx + b$ kehtiks, juhul kui tegur m on välja arvutatud valemis 1.2 ja hind on päeva odavam. Analoogselt toimub arvutus ka juhul, kui elektri hind on kallim, kui keskmine, kuid siis on kasutusel arvutuses teised võimsused ja hinnad. Lõputöö käigus kasutataud võimsused on teises mastaabis, kuid eelnevad näidisarvutused näitavad reaalsete elektri hindade põhjal paindliku tarbimise majandusliku tasuvuse põhimõtteid.

2 SÜSTEEMI ARHITEKTUUR JA ALAMSÜSTEEMIDE ANALÜÜS

2.1 Laadimismuunduri tehnilised nõuded

Projekteerimise eelduseks peab olema valmis mõeldud ja kirja pandud tehnilised nõuded, millele arendatav süsteem peab vastama. Välja peab töötama, mis funktsioone peab süsteem olema võimeline täitma, mis võimekust omama: seda selleks et disainida süsteem, mis reaalselt vastab vajadustele. Selleks, et tehnilisi nõudeid kirjutada, peab kõige pealt defineerima ootused prototüübile [26], milleks antud juhul on:

- 1) Kontrollitav laadimisvõimsus.
- 2) Elektri tarbimise sõltuvuses elektri hinnast.
- 3) Teiste seadmetega ühilduv läbi standardsete ühenduste.
- 4) Võimekus telefone ja muid seadmeid laadima, vajadusel ilma limiidita.

Nendest ootustest lähtuvalt saab kirja panna tehnilised nõuded. Suuremate projektide puhul on kasutusel isegi eraldi inseneeria haru – nõuete inseneeria (*requirements engineering*), mis on süsteemiinseneeria alaharu. Need nõuded on kõigi järgnevate arenduste aluseks ja on mõeldud selleks, et kindlaks teha et arendatav süsteem saab korrektse, mõistliku ja efektiivse lahenduse [27].

Nendest põhimõtetest lähtudes süsteemi tehnilised nõuded:

- 1) Sisend: nominaalne 230 V vahelduvvoolu (*alternating current* - AC) võrgupinge, ühilduv otse pistikupesaga või läbi standardse kaabli.
- 2) Väljund: USB port standardse pistikuga.
- 3) Madalpinge pool galvaaniliselt eraldatud kõrgepinge poolest ohutuse seisukohast.
- 4) Muunduril on WiFi võimekus, kasuks tuleb Bluetoothi võimekus, et tulevikus arendada välja juhtmeta ühendus mobiiltelefoniga.
- 5) Internetist saadava info põhjal on võimalik väljundvoolu muuta/piirata.

- 6) Seade, mille akut laaditakse, on kaitstud seadme enda vigade (lühised, pinge piigid jne) eest.
- 7) Kasutajal on võimalik voolu piiramine välja lülitada ja/või sujuvalt voolu piiramist vähendada.
- 8) Füüsiline mõõtmine ja testimine peab olema mugav ning seade peab olema võimeline mõõtma pingeid ja voole ka automaatselt.
- 9) Kõrge efektiivsus ja madal volutarve ilma koormuseta.
- 10) Võimalikult iseseisev väliskeskkonnast – ei tohi vajada pidevat internetiühendust, vaid ideaalis korra päevas lühikest aega.
- 11) Võimalikult väike – lõputöö koostaja määrab maksimaalse trükkplaadi suuruse piiriks 100 x 100 mm, sest selle suuruse ületamise korral tõuseb trükkplaadi hind paljudel trükkplaaditootjatel märgatavalt.

Nõuete abil saab välja arendada mitu kontseptsiooni, kuidas võimalik süsteemi luua ja siis tuleb välja valida lahendus, mis sobib kõige paremini prototüübi arendamiseks. Tehniliste nõuete abil on võimalik lahendusi looma hakata, kuidas antud probleem lahendada. Süsteem jaotatakse laiemalt kolmeks, mis on küll omavahel tihedalt seotud: toitemuunduse osa – kus 230 V vahelduvpinges peab muundama USB pordi jaoks sobivaks umbes 5-ks voldiks. Teine suur osa on USB osa, kus tuleb luua süsteem, millega oleks võimalik USB porti ühendatud seadme tarbimisvoolu reguleerimine ja seadme kaitsmine häiringute eest, mis võivad juhtuda prototüübi testimisel. Kolmandaks osaks on internetti ühenduv ja algoritmi jooksvat osa ehk nn. süsteemi aju (kontroller). See peab omakorda ülejäänud süsteemiga ühilduma, et anda komponentidele käsklusi, millist väljundvõimsust kasutada.

2.2 Süsteemi toitemuunduse osa

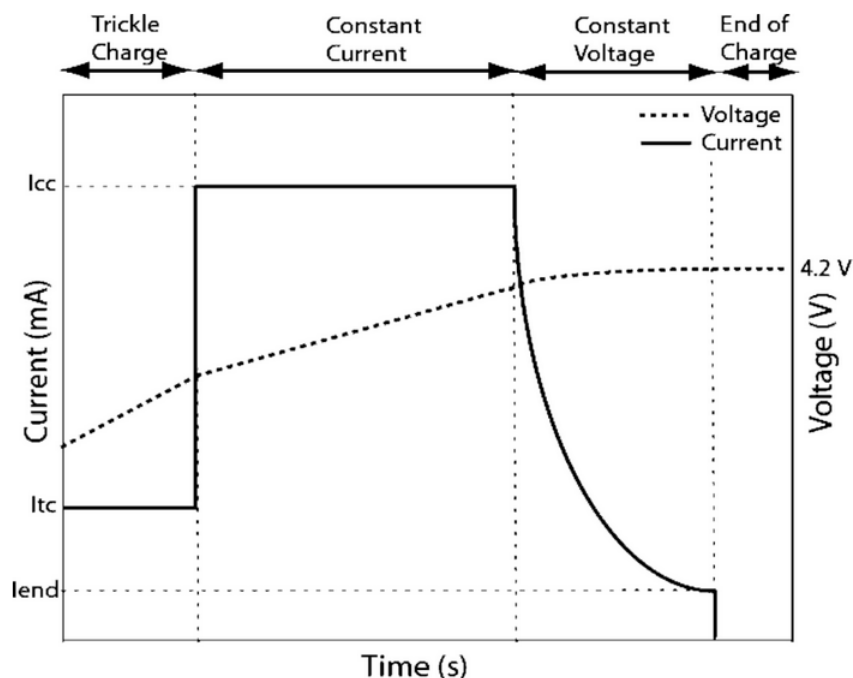
2.2.1 Akude laadimine

Akud on energiasalvestusseadmed, mis koosnevad elektrokeemilistest elementidest. Nad on võimelised salvestama elektrit keemilise energiana enda sees ning vajadusel elektrilist energiat eraldama. Põhiliselt kasutatakse pliiil, niklil ja liitiumil põhinevaid akusid, kuid keemilisest koostisest sõltumata jääb neil tööpõhimõtte samaks. Akude laadimise juhtimiseks kasutatakse palju erinevaid meetodeid, näiteks konstantne pinge (CV – *Constant Voltage*), konstantne pinge – konstantne vool (CC – *Constant Current*),

kahe-astmeline konstantne pinge (*Two Step Constant Voltage*) [28], konstantne vool ja pulsslaadimine (*Pulse Charging*) [29].

Li-akude suurim eelis võrreldes teiste akudega on nende suur energiatihedus [30], mis on keskmiselt mitu korda suurem (varieerub olenevalt mudelist, kuni 7 korda kõrgem) võrreldes pliiakuga. Tänu sellele saab liitiumaku süsteemid teha kergemad ja väiksemad, kui pliiakudega töötavad süsteemid. Samuti on liitiumakud tsükliliseks laadimiseks ja tühjendamiseks paremad, sest kaotavad oma mahutavust aeglasemalt. Kõige suuremaks probleemiks liitiumaku puhul on kõrge hind ning vajadus keeruka aku juhtimissüsteemi järele (*BMS – Battery Management System*) [30] [31].

Enim kasutatud meetod liitium-akude (näiteks mobiiltelefonide) laadimiseks on tühilaadimine – konstantne vool – konstantne pinge (*Trickle Charge – Constant Current – Constant Voltage*) meetod. Selle esimene etapp on tühilaadimine, mida kasutatakse ainult juhul, kui aku on väga tühi – vastasel juhul minnakse kohe järgmise etapi juurde. Teine etapp on konstantne vool, mille puhul hoiab laadimissüsteem laadimisvoolu konstantsena ning seda seni, kuni pinge aku klemmide vahel jõuab ettemääratud pingeväärtuseni (Li-Ion akuelemendi puhul enamasti 4,1 V), pärast mida laetakse akut konstantse pingega (Li-Ion aku puhul enamasti 4,2 V) kuniks laadimisvool muutub väga madalaks ning laadimisprotsess loetakse lõpetatuks [32].



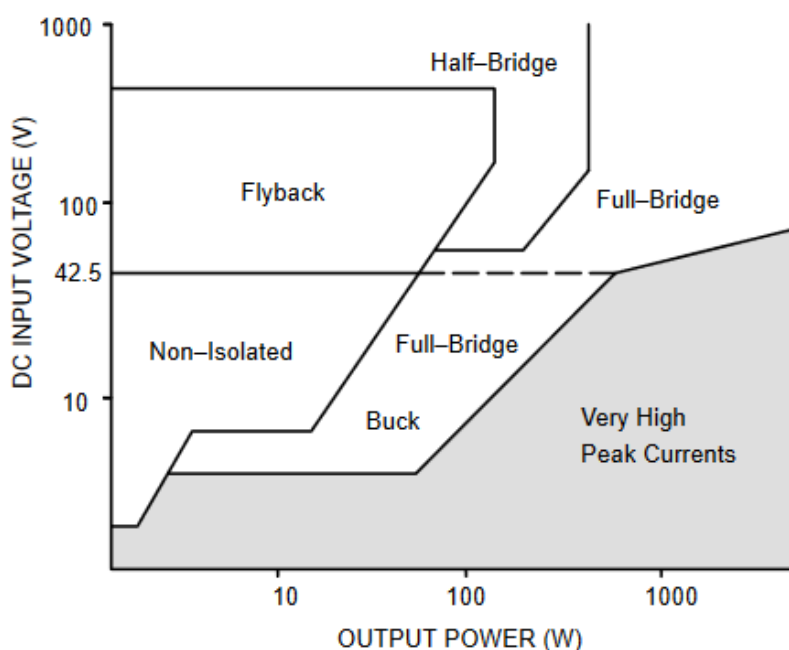
Joonis 2.1 Li-aku laadimistsükli näidis [33]

Li-akusid kahjustab pikaajaline väga kõrge laetuse olek (*State of Charge – SoC*), samuti väga kõige või madal aku temperatuur, SoC-i kõikumine ning laadimis/tarbimisvoolu

kõrge suurus. Tihti laetakse näiteks mobiiltelefone öösiti, mille puhul telefon laeb ennast väga kiiresti täis ning püsib laetuna hommikuni. Seda on peetakse üheks suurimaks aku vananemise põhjuseks. Aku elueale mõjub hästi, kui ta pole kaua 100% täituvuse lähedal ning teda laetakse madala laadimisvooluga [34]. Mõned firmad, näiteks Lenovo, pakuvad eraldi tarkvara, et sülearvuti laadimistsükli optimeerida ja ka võimalusena piirata maksimaalset SoC. Nii on võimalik pikendada aku eluiga [35]. Uuringud on leidnud, et umbes 45% inimestest jätavad oma telefoni ööseks laadima ja umbes 45% inimestest laeb oma telefoni kuni 100% täituvuseni ja peale seda eemaldavad telefoni elektrivõrgust ning ainult 10% inimestest laevad oma telefoni mittetäielikult täis. Umbes veerand inimesi ütlevad, et uue telefoni ostmise põhjuseks on just see, et telefoni aku ei tööta enam piisavalt hästi või üldse [36]. On arvatud, et iga aastal kulutatakse 22 miljonit dollarit elektrihinna näol, hoides telefone telefoni laadimisadapteri otsas kauem kui vajalik [37].

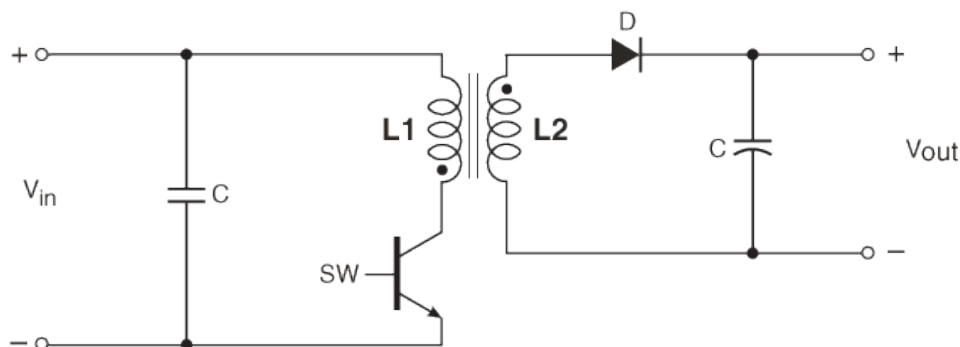
2.2.2 Süsteemi toitemuunduse osa riistvara valimine

Süsteemi toimimiseks on vaja muundada võrgust tulev elektrienergia USB väljundi jaoks sobivate parameetritega elektrienergiaks. Tehnilised nõuded, mida tuleb arvestada süsteemi toitemuunduse osa valimisel on 1), 2), 3), 5), 9), 11). Toitemuunduri topoloogia valimisel tuleb arvesse võtta mitut aspekti, kuid prototüübi jaoks olulisemad nendest on: vajalik väljundvõimsus, sisend- ja väljundpinge ning galvaanilise isolatsiooni vajadus [38]. Kõrge sisendpinge ning madala soovitud võimsuse tõttu otsustati vastulülituses diodiga (*Flyback*) topoloogia kasuks.



Joonis 2.2 Soovituslik topoloogia sõltuvalt väljundvõimsusest ja sisendpingest [38]

Lihtsustatud vastulülituses diodiga muunduri topoloogia ja põhilised komponendid on näha joonisel 2.3.



Typical Flyback Converter Schematic

Joonis 2.3 Vastulülituses diodiga muunduri lihtsustad topoloogia [39]

Alguses kaaluti võrgu vahelduvvoolu kohest madaldamist tavalise trafoga, selle aldamist ning soovitud pinge saavutamist kasutades pinget madaldavat (*Buck*) topoloogiat, kuid peale pikemat kaalumist, otsustati selle vastu. Põhjuseks väga suure ja kalli transformeri vajadus, selleks et pinget madaldada 50 Hz juures. Pinge aldamine ning sellest uuesti vahelduvvoolu tegemine annab võimaluse kasutada väga kõrgeid sagedusi kasutades lülitamiseks transistori. Näiteks 100 kHz juures saab kasutada palju madalama induktiivsusega trafosid, sest trafo südamik ei lähe nii kiiresti küllastusse – induktori näivtakistus tõuseb sagedusega [40]. Trafo elektromotoorjõu saab nimelt arvutada valemiga:

$$E = 4.44 \cdot f \cdot \phi, \quad (2.1)$$

kus E tähistab indutseeritud elektromotoorjõudu, f on sagedus ja ϕ on magnetvoo tihedus. Valem näitab, et tõstes sagedust, on tarvis madalamat magnetvoo tihedust ja seega ka induktiivsust, et saavutada sama elektromotoorjõud [41].

2.3 Süsteemi USB osa

2.3.1 USB kasutamine akude laadimiseks

Lõputöö raames toimub akulaadimissüsteemi prototüübi arendus, millega on võimalik laadida kõiki USB (*USB - Universal Serial Bus*) laadimist kasutavaid akusid. USB standardeid akude laadimiseks on väga mitmeid generatsioone ja on võimalik kasutada väga erinevaid lahendusi vastavalt vajalikele funktsioonidele. Selleks, et teha valik, millest lahendust kasutada, tuleb analüüsida olemasolevaid võimalusi.

Enamik kaasaskantavaid seadmeid, sealjuures ka enamik mobiiltelefone, kasutavad oma akude laadimiseks USB liidest [42]. USB standard arendati välja paljude juhtivate tehnoloogiafirmade poolt juba aastal 1996 selleks, et väliseid seadmeid ühendada arvutiga. USB süsteem koosneb peremehest (*host*) ja seadmest (*device*). USB füüsiline liides koosneb toiteliinist (enamasti tähistatud kui *VBUS* ja *GND*) ning diferentsiaalpaarist (klassikaliselt tähistatud kui *D+* ja *D-*, kuid uuematel ja kiirematel USB versioonidel on andmeliine mitu). Toiteliin on konstantse 4,4 – 5,25 V juures ja selle kaudu klassikaliselt USB peremees varustab seadmeid energiaga [43]. Käesolev lõputöö hõlmab endast USB kasutamist akude laadimiseks, seega see keskendub põhiliselt USB standarditele toiteliinidel ja erinevate toiteskeemide tuvastamist andmeliinidel – kuid mitte suurt osa andmevahetusprotokollist.

USB kasutamist teeb keerulisemaks väga paljude generatsioonide ja alaspetsifikatsioonide olemasolu, mis vajavad erinevat riistvaralist võimekust. Kõige varasemad USB versioonid (USB 1 ja USB 2.0) olid mõeldud üksnes seadmete otseseks toitmiseks ning mitte akude laadimiseks. Kasutusel oli „kõrge võimsuse“ ja „madala võimsuse“ USB toiteport. Kõrge võimsus tähendas maksimaalset laadimisvoolu 500 mA ning madal võimsus 100 mA mõlemal puhul nominaalse 5 V toitepinge juures. Selleks, et saada rohkem voolu USB pordist, mõtlesid paljud firmad välja omaenda protokollid. Ühtse laadimisstandardi loomiseks oli tarvis arendada välja ka USB standardne laadimisspetsifikatsioon, mida nimetatakse Aku Laadimise Spetsifikatsiooniks (*Battery Charging Specification*) – see määrab ära kuidas kasutada USB porti kuni 1,5 A toitevoolu saamiseks [42].

Enamikel USB seadmetel on reaalne laadimisskeem/integraallülitus (*integrated chip*) koos vajalike komponentidega ehitatud seadmesse sisse – toitemuundur/toiteadapter on võrgu vahelduvvoolu muundamiseks 5 V peale. Seega mobiiltelefon tegeleb täpse laadimisvoolu, pinge, tsükli määramisega ise, vastavalt sellele kuidas telefon on disainitud. USB port on selle jaoks lihtsalt 5 V toiteallikas ning mobiiltelefon muundab selle Li-aku jaoks sobivaks laadimispingeks ja vooluks [44].

Selleks, et USB seadme sisene laadimisskeem tunneks ära, kui palju voolu on USB port võimeline välja andma turvaliselt, kasutatakse riistvaralist käte pigistust (*handshake*). Selleks toiteplokk manipuleerib USB pordis *D+* ja *D-* liini ning selle põhjal on võimeline USB porti kasutatav seade aru saama, mis võimekus ja mis spetsifikatsiooni järgi on port võimeline voolu välja andma [42].

Uuemate USB standardite jaoks on kasutusele võetud ka uus pistik: USB Type-C, mis on saanud väga populaarseks ja enamik mobiiltelefone ja ka palju muud koduelektroonikat kasutabki seda pistikut. Tegu on ovaalse pistikuga, mille puhul pole

vahet, mis pidi see pistikupessa sisestada, sest töötab mõlemat pidi. Kaabel ja pistik on enamasti võimelised edasi andma ligi 100W võimsust. Sellise võimsuse nõude on tekitanud USB Võimsuse Edastuse (*Power Delivery* - PD) kasutusele võtt - protokoll, mis võimaldab võrreldes varasemate USB standarditega palju suuremaid võimsusi edasi kanda. Kõikidel Võimsuse Edastuse võimekusega seadmetele see seadme peal kirjas. USB PD üks suurimaid erinevusi peale kõrgema maksimaalse voolu, on võimekus erinevaid pingeid välja anda [45]. USB PD uus revisioon 3.1 lubab juba maksimaalset võimsust 240 W ning seda kuni 48 V juures. Samuti võimaldab see kahesuunalist energialiikumist ning optimeeritud võimsuse juhtimist [46]. Pinge ja voolu juhtimise koha pealt on kõige täpsem ja paindlikum USB Programmeeritav Toiteplokk (*Programmable Power Supply* - PPS), mille protokoll loodi USB PD versiooniga 3.0. Selle abil saab tarbija küsida väga täpselt endale sobivat pinget ja voolu [45]. Kui tavalise USB PD puhul on saadaval eri pinged 5 V, 9 V, 12 V, 15 V ja 20 V, siis USB PPS puhul on võimalik seadmel küsida pinget 3,3 V kuni 22,1 V ning seda 20 mV astmete kaupa. Samuti on võimekus küsida voolu kuni 5 A ja seda 50 mA astmete kaupa [47].

2.3.2 Süsteemi USB osa riistvara valimine

Süsteemi üldist toimimist mõjutab arvatavasti kõige rohkem, millist USB protokollit ja mis USB standardi järgi USB pordid arendatakse välja. Tehnilised nõuded, mida tuleb arvestada süsteemi aju valimisel arvestada on 2), 5), 6), 7), 9), 11). Suurim probleem on, et tuleb arvestada, et tarbija on see, kes paneb paika, millist pinget ja voolu ta kasutab laadimiseks ja arendatav seade peab aru saama kõigist tarbijatest, mis USB pistikusse ühendatakse. Põhiliselt on süsteem mõeldud aga telefonide laadimiseks. Enamik mobiiltelefoni laevad end 5 V juures, kuid mõned on võimelised ka kasutama kiiret laadimist (*fast charging*), mis võib kasutada kõrgemaid pingeid ja kõrgemaid voole, kui USB standardis kirjas - tootjad on loonud iseenda spetsifikatsioonid, kuidas suhtlus toitemuunduri ja telefoni sees oleva laadimisskeemi vahel käib, näidetena võib tuua Qualcomm Quick Charge ja Samsung Super Fast Charging [48]. Kõige parema lahendusena kasutatakse riistvara, millel on USB PD 3.0 võimekus, et oleks võimalik kasutada paindlike lahendusi, mida see pakub. Näitena võib tuua STMicroelectronics'i näidistootet, millel on vajalik võimekus olemas [49].

Prototüüpimise eesmärgil otsustati kasutada aga USB Laadimisporti (*Dedicated Charging Port* - DCP) kontrollerit koos toitekontrolliga, mille abil on võimalik voolu piirata. Tegemine on üpris lihtsa lahendusega ja seetõttu implementeerimine võtab vähem aega ja on väiksem tõenäosus vigade tegemiseks. Lihtsustab see ka toitemuunduse osa arendamist, sest USB Laadimisporti kontrolleri vajalik sisendpinge on teada. USB PD implementeerimiseks vajalike komponente on raske leida kataloogidest, sest enamikke

komponente pole kohe laos olemas. Nii USB osa riistvara kui ka toitemuunduse osa riistvara valiku tegemine oligi väga suures osas tehtud arvestades komponentide väga pikku tarneaegu ning rahulduti töötava süsteemi loomiseks vajalike komponentidega, mis on laos olemas elektroonika komponentide edasimüüjatel. Lõputöö praktiline osa põhiline eesmärk on kontseptsiooni tõestamine ja prototüüpi on kindlasti võimalik optimeerida ja edasi arendada.

Valituks osutus Texas Instruments-i poolt toodetud TPS2540. Selle kiibiga on võimalik voolu piirata vastavalt takistuse suurusele, mis kiibi külge ühendada [50]. Selleks, et oleks võimalik voolu limiiti paindlikult muuta, kasutatakse digitaalset reostaati, mis töötab samamoodi nagu tavaline reostaat, kuid füüsilise manipuleerimise abil muudab digitaalne reostaat oma takistust vastavalt kontrolleri poolt kasutatud käsule. Võttes arvesse USB kiibi parameetreid, on tarvis kuni 100 kilo-oomise takistusega digitaalset reostaati. Valituks osutus Microchip-i mudel MCP4652 [51], põhjuseks võrreldes sarnaste komponentidega hea dokumentatsioon ja lihtne juhtimine. MCP4652 suhtleb kontrolleri läbi I2C liidese, mille võimekust on seega kontrolleriil vaja. Valitud USB kiip võimaldab kahte kanalit kasutada voolulimiidi jaoks ja nende kahe vahel valida, mis annab võimaluse ka ainult ühe digitaalse signaaliga voolulimiit pordilt maha võtta.

2.4 Süsteemi juhtsüsteemi disain

Tehnilised nõuded, mida tuleb arvestada süsteemi aju valimisel arvestada on 4), 5), 7), 8), 9), 10), 11). Vaja on WiFi (Bluetooth) võimekusega, vähemalt 10 üldise otstarbega sisend-väljund (*General Purpose Input-Output* – GPIO) viiguga (*pin*), madala voolutarbe ja väikeste mõõtmetega programmeeritavat juhtseadet.

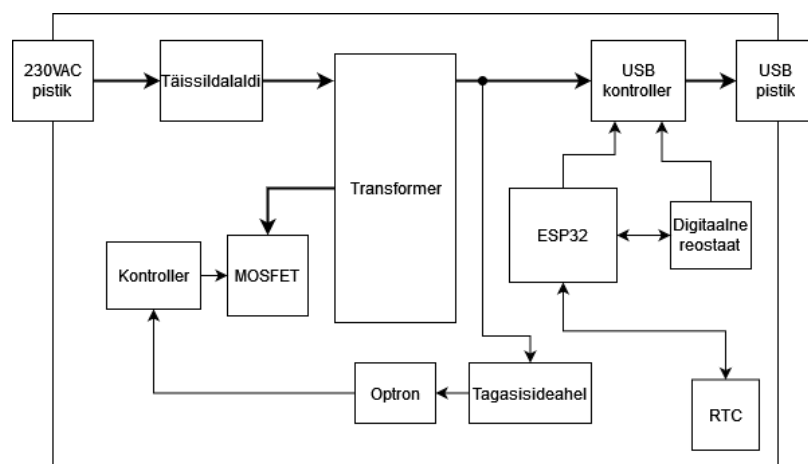
Sellistele vajadustele täitmiseks sobib kõige paremini oma väikese voolutarbe ja mõõtmete ja suure arvu sisendite-väljendite tõttu mikrokontroller (*Microcontroller Unit* - MCU) või seda sisaldav Süsteem Kiibil (*System on Chip*). Paljudel on ka WiFi protokoll võimekus sisse ehitatud, kuid selle prototüüpimise keerukuse tõttu otsiti sisseehitatud WiFi saatja ja antenniga lahendust, mida enamasti kutsutakse MCU WiFi mooduliteks või Süsteem Kiibil WiFi mooduliteks. Kui nii protsessor, WiFi saatja, kontrollitud näivtakistusega rajad ja testitud antenn on ühes moodulis, siis see teeb prototüüpimise palju kergemaks ning minimaliseerib tekkivate vigade hulka [52].

Selliseid lahendusi on mitmeid, näiteks on moodullahendusi järgnevatele mikrokontrolleritele: ESP32, CC3200, SAMW25 [52] või 88MW32X [53]. Nende hulgast osutus valituks ESP32 ja täpsema mooduli ESP32-WROOM-32E [54], mis on kõige uuem moodul ESP32-WROOM tooteperekonnast, millel on kõik vajalik võimekus olemas.

Samuti on selle kohta väga palju informatsiooni ja näidisprojekte internetis olemas, mis kindlasti lihtsustab arendust. Seda saab kasutada erinevate integreeritud arenduskeskkondadega (*Integrated Development Environment – IDE*), mis lihtsustab koodi kirjutamist, kuna lõputöö autor saab kasutada endale tuttavat IDE-t.

Moodulile on vaja juurde disainida üksnes programmeerimiseks vajalik skeem. Prototüübile lisati ka väline Reaalajakell (*Real time clock – RTC*), et oleks võimalik kellaega jälgida ka siis, kui süsteem pole ühendatud elektrivõrku ning WiFi ära kadumisel. RTC-le saab lisada tagavara väikese patareitoite, millega ta suudab kella jälgida isegi kui süsteemil endal pole voolu.

Lõputöö autor sooviks oli ka ESP32 kasutamist ja programmeerimist õppida, sest tegu on laialdaselt kasutuses oleva seadmega, mille rakendamise kogemust sooviks ta isiklikust huvist. Vastavalt tehnilistele nõuetele ja eelmises peatükis valitud komponentidele on üldine süsteemi plokk skeem järgmine:



Joonis 2.4 Prototüüplahenduse plokk skeem

Prototüübi sisendiks on vahelduvvool võrgust, mis aldatakse ning silutakse. Alaldatud kõrge pinge läbib trafo ning sellest kõrgesagedusliku vahelduvvoolu saamiseks lülitab juhtkontroller isoleeritud paisuga väljatransistori (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistor – MOSFET*). Kindla väljundpinge saavutamiseks saab kontroller tagasiside trafo sekundaarpoolelt, kus tagasisideahel annab läbi optroni MOSFET-i kontrollerile tagasisidesignaali. Sekundaarpoolel hoitakse stabiilset 5 V, mida juhitakse läbi USB kontrolleri USB pistikusse. USB kontrolleri lülitab sisse ESP32 ning voolu kontrollib USB kontrolleri digitaalse reostaadi poolt saadud takistust mõõtes. Digitaalse reostaadi takistust muudab ESP32 läbi internetist saadavate elektrihindade. Kõrge elektri hinna puhul saadab ESP32 digitaalsele reostaadile signaali oma takistust tõsta ning USB kontrolleri mõõdab seda takistust ja vastavalt sellele piirab pistikust välja antavat voolu.

3 ELEKTRITURGU JÄRGIVA TOITEMUUNDURI ELEKTRISÜSTEEMI DISAIN

3.1 Toitemuunduri disain

Topoloogia valimise põhjused on kirjeldatud punktis 2.2.2 ning selles peatükis tutvustatakse elektriskeemi loomise põhimõtted. Toitemuundur koosneb trafost, transistorist, kontrolleriist, tagasisideahelast, filtrist ja summutusahelast.

3.1.1 Kõrgepinge sisend, aldamine ja silumine

Toitepinge süsteemi ühendamiseks on kasutusel IEC 60320 kõige populaarsem pistik ja pistiku vastus: C13 ja C14. Standardset pistikut kasutades on lihtne süsteemi kasutada ja kuigi nii pistik kui ka pistiku vastus on võimelised edastama kuni 10A, mis on umbes 100 korda rohkem kui süsteem tarbib, siis oma odavuse tõttu on see sobilik valik [55]. Elektromagnetiliste häiringute kaitseks on kasutuses sisendi poolel passiivne LC filter [56].

Vahelduvpinge aldamiseks on kasutuses täissild dioodalaldi. Alaldi osas saab arvutada pinget siluva kondensaatori mahtuvuse järgneva valemiga [57]:

$$\Delta U = \frac{I}{f \cdot C} \rightarrow C = I \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U}, \quad (3.1)$$

kus ΔU on lubatud pingekõikumine (*voltage ripple*), I tähistab voolutugevust, f tähistab sagedust ning C tähistab kondensaatori mahtuvust.

Voolutugevuse primaarpoolel saab arvutada välja valemiga:

$$P = U \cdot I \rightarrow I = \frac{P}{U}, \quad (3.2)$$

kus P tähistab võimsust ning U tähistab pinget. Arvestades umbkaudseks süsteemi võimsuseks 10 W, lubatud pingekõikumiseks umbes 20% saab valemis 3.1 asendada valemist 3.2 saadud voolutugevuse. Kokku saab järgneva valemi:

$$C = \frac{P}{U} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U} = \frac{10}{230} \cdot \frac{0,01}{40} = 10,9 \mu F \quad (3.3)$$

Arvestades, et keskmine väljundvõimsus jääb alla 10 W ning seda saab vajadusel piirata, on kasutuses 10 μF kondensaator maksimaalse pingetaluvusega 400 V.

3.1.2 Toitemuunduri kontrollid

Toitemuunduri skeemi tegemisel oli kõige suuremaks raskuseks kiipide ja trafode vähesus – hetkel on väga suur kriis *flyback* kontrollite tarnetel. Käesolevas lõputöös on kasutusel Infineon Technologies kiip XDPL8219, mis pole küll ideaalne, kuid andmelehe järgi üpris lihtsasti integreeritav ja sellel on olemas demoskeem [58]. Selle kontrolleri jaoks on kataloogides olemas ka sobiv trafo. Tagasiside toimub läbi optroni ja on üpris lihtsalt implementeeritav.

3.1.3 Trafo ja transistor

Flyback topoloogia puhul on tegelikult õige öelda, et tegu pole trafoga, vaid drosseliga, mis salvestab energiat oma südamikus ja siis see edastatakse vastastikust induktiivsust omavale teisele drosselile. Sellest hoolimata nimetatakse seda enamasti trafoks ja ka selles lõputöös lihtsuse huvides kasutatakse sõna trafo, sest funktsioon on tal väga sarnane trafodele [39]. Sobiliku trafo valiku puhul olid kõige olulisemad sisendpinge, keerdude arvu suhe, maksimaalne võimsus ning primaarpoolel sobiliku teise mähise olemasolu kontrolleri jaoks. Valitud sai *flyback* trafo Würth Elektronikult [59].

Transistori valikul kõige olulisem parameeter oli V_{DS} , mis näitab neelu (*drain*) ja lätte (*source*) vahelist maksimaalset pinget (ehk maksimaalne pinge, mida MOSFET suudab lülitada) ning V_{GS} , mis näitab millise pingega MOSFET-i saab lülitada, mis peab ühtima kontrolleri pingega. Samuti on oluline MOSFET-i neelu ja lätte vaheline takistus ($R_{DS(on)}$) ja paisu laenguhulk (Q_g – *gate charge*), mille puhul madalam väärtus vähendab vastavalt kadusid voolu juhtivas olekus ja kadusid lülitustel. Valituks osutus Infineon-i transistor IPD50R500CEAUMA1 [60].

3.1.4 Summutusahel ja väljundfilter

Flyback trafo üheks negatiivseks omaduseks on transistori lülitamisel tekkiv järsk pingetõus, mida põhjustab trafo lekkeinduktiivsus. Pinge saab arvutada järgneva valemiga: [61]

$$U_{max} = I_P \cdot \left(\sqrt{\frac{L_{LP}}{C_P + C_O}} \right) + U_{sisse} + \frac{U_{välja}}{N}, \quad (3.5)$$

kus U_{max} on maksimaalne pinge piik, I_P on voolutugevus läbi MOSFET-i, L_{LP} on trafo lekkeinduktiivsus, C_P ja C_O on trafo ning MOSFET-i parasiitmahtuvused, U_{sisse} on sisendpinge, $U_{välja}$ transformeri väljundpinge ja N on primaar- ja sekundaarmähiste keerdude arvu suhe.

Lülituse hetkel on seetõttu tihti märgata kõrgesagedusliku võnkumist, mis on kahjulik nii transistorile kui ka terve süsteemi elektromagnetilise ühilduvuse omadustele. Selleks, et vähendada liigset pinget, tuleb kasutada summutusahelat (*snubber circuit*). Ülepinge ja võnkumise vähendamiseks kasutatakse vastupinge diodist, takistist ja kondensaatorist koosnevat summutusahelat [62]. Valitud trafo andmelehel [59] on kirjas tüüpiline trafo lekkeinduktiivsus 18-27 μH . Arvutuste tegemiseks kasutati Texas Instruments-i Power Designer Tool Calculator-it.

Väljundfiltri disain on väga lihtne tänu flyback trafo omadusele olla mitte otseselt trafo, vaid induktor. Seega on vaja ainult mahtuvusliku osa. Suurema energiahulga jaoks on kasutuses alumiinium elektrolüüt kondensaator, millel on väga kõrge energiatihedus. Kõrgemate sageduste välja filtreerimiseks kasutatakse kahte keraamilist kondensaatorit, millel on seevastu parem ekvivalentne jadainduktiivsus (equivalent series inductance) ja madal ekvivalentne jadatakistus (equivalent series resistance), mis aitavad hoida kondensaatori näivtakistuse madala just kõrgete sageduste juures [63].

3.1.5 Tagasisideahel

Kontroller töötab tagasiside põhiselt – sellel on sisend viik (*input pin*), millel on sisemine ülestõmbetakisti (*pullup resistor*) ning tagasisideahel võimaldab tõmmata selle sisendi madalaks, juhul kui väljundpinge tõuseb üle soovitud suuruse [58]. Selleks, et väljundi ja sisendi vahel püsiks galvaaniline eraldatus, on kasutuses optron, mille abil on signaali võimalik edasi kanda ilma galvaanilise sidustuseta [64].

Väljundpinge täpseks reguleerimiseks on kasutuses programmeeritav pinge referents (*voltage reference*), mis on olemuselt zener diod, mis hakkab voolu juhtima kui pinge tema referentsviigul ületab teatud kindla väärtuse. Enim levinud komponent selleks on TL431 [65], mida kasutan ka iseenda tagasisideahelas.

Selleks, et saavutada väljundpinge 5 V, on tarvis TL431 referentsviiku saada pinge 2,495 V sel juhul, kui väljundpinge on täpselt 5 V. Lõputöös kombineeritakse kasutuses olevatest takistitest selline pingejagur. Kasutan teise tüübi kompensatsiooniahelat, selleks et stabiliseerida tagasisideahel ja saada stabiilsem väljundpinge. Selleks, et tagasisideahelas paiknev optron ei oleks mõjutatud pingest, mida ta reguleerib, kasutatakse zener diodi, et saavutada stabiilne pinge ning optroni toitepinge poleks seotud otseselt väljundpingega ja selle ebastabiilsus et mõjutaks tagasiside tööd [66].

3.2 Juhtsüsteemi disain

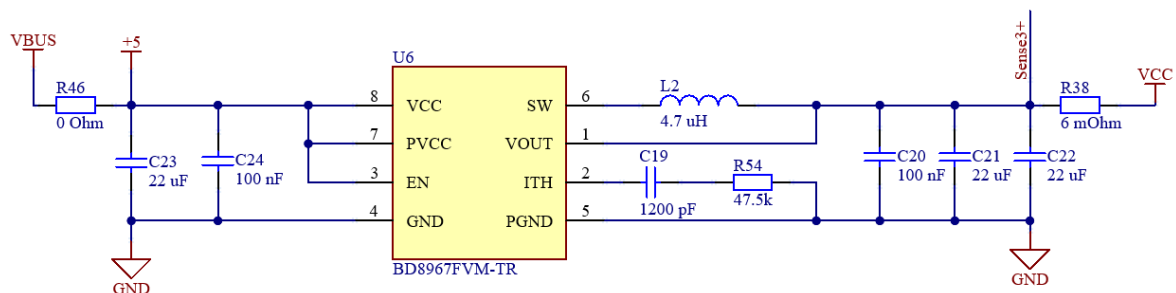
3.2.1 Juhtsüsteemi toiteallika disain

Valitud juhkontrolleri kasutamiseks on vaja sellele luua kaks suuremat alasüsteemi: üks selle toiteks, kuna ESP32-WROOM nominaalne toitepinge on 3,3 V ja ta pole võimeline töötama 5 V toitega (andmelehel toodud absoluutne maksimaalne pinge, mida ta talub kui 3,6 V [54]). Teiseks on tarvis luua alamsüsteem mugavaks programmi alla laadimiseks kontrollerile.

Selleks, et valida sobiv toitepinge allikas, tuleb kaardistada 3,3 V süsteemi maksimaalne voolutarve. Kõige suuremat toitevoolu vajab ESP32, mille puhul keskmine voolutarve on umbes 80 mA, kuid mille puhul WiFi-t kasutades tõuseb voolutarve üle 200 mA ning tootja andmeleht nõuab, et toiteallikas peab olema võimeline vähemalt 500 mA välja andma [54]. Programmeerimiseks vajalik kiip CP2102 maksimaalne tavaoleku toitevool on 26 mA [67] ning RTC ja digitaalne reostaat on mõlemad väga madala voolutarbega olenemata kiibimudelidest (<1 mA) ehk nendega ei pea arvestama.

Lineaarse muunduri asemel tehti valik kasutada lülitavat muundurit, et kadusid vähendada. Prototüübi arendamise lihtsustamiseks on kasutuses integreeritud transistoriga integraallülitus, millele saab disainida vastavalt funktsioonile ja väljundvoolule sobiliku väljundfiltri. Soovitud on leida ka sisemise tagasiside pingejaguriga muundurit, et vähendada väliste komponentide hulka ning parandada süsteemi töökindlust: juhul kui tagasisideahel on pakendis sees, siis on see trükkplaadil oleva elektromagnetilise mõjutuse eest paremini kaitstud.

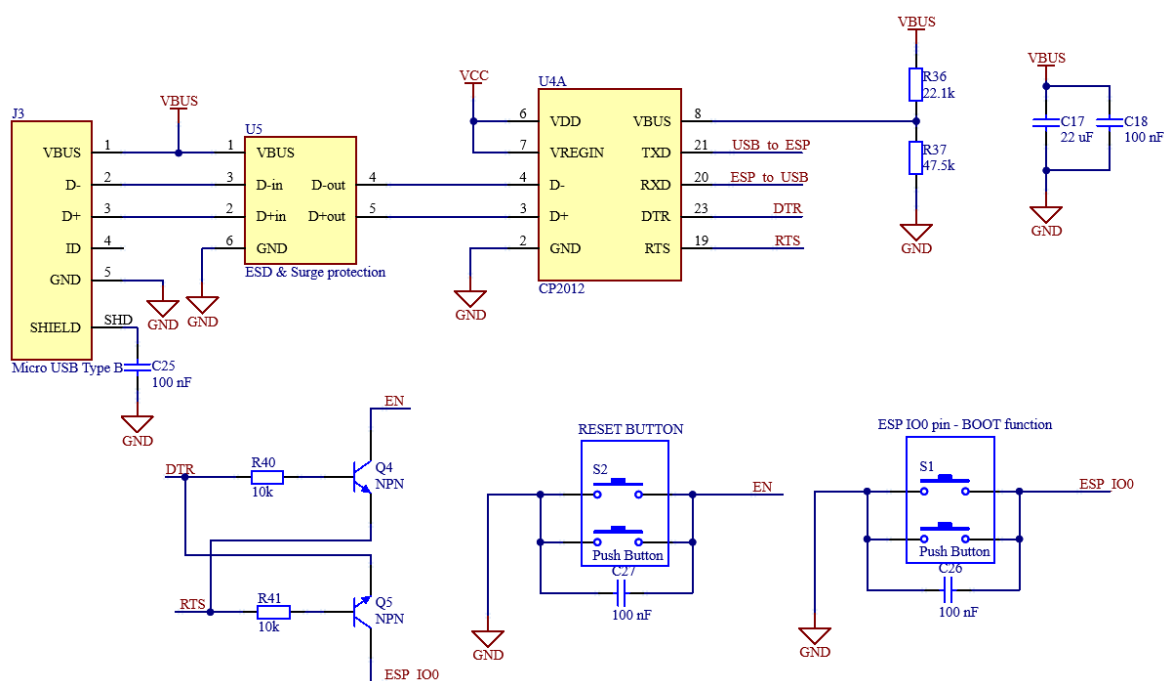
Kiibiks osutus valituks BD8967 Rohm Semiconductor'ilt, selle kõrge efektiivsuse tõttu minu tüüpilise koormusvoolu juures (u. 100 mA) ning kuna tegu on odava ja lihtsa lahendusega [68]. Kõrge lülitussagedus aitab hoida väljundfiltri väiksena, mis aitab hoida trükkplaadil ruumi kokku.



Joonis 3.1 Juhtsüsteemi toiteallika skeem

3.2.2 Juhtsüsteemi programmeerimisskeemi disain

Mikrokontrollerile programmi peale laadimiseks on tarvis, et see oleks tema jaoks õiges formaadis. ESP32 puhul on kasutusel standardne lahendus, kus programmikood edastatakse universaalse asünkroonse vastuvõtja-saatja jadaliidese (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* - UART) kaudu. Tänapäeval pole peaaegu ühelgi tavakasutaja arvutil sobivat väljundporti ning vajalikuks lahenduseks on kasutada USB – UART adapterit. Prototüübi projekteerimise raames kasutatakse sarnast skeemi, kui ESP32-WROOM arendusplaadil, et minimeerida võimalust vea tegemisel [69].



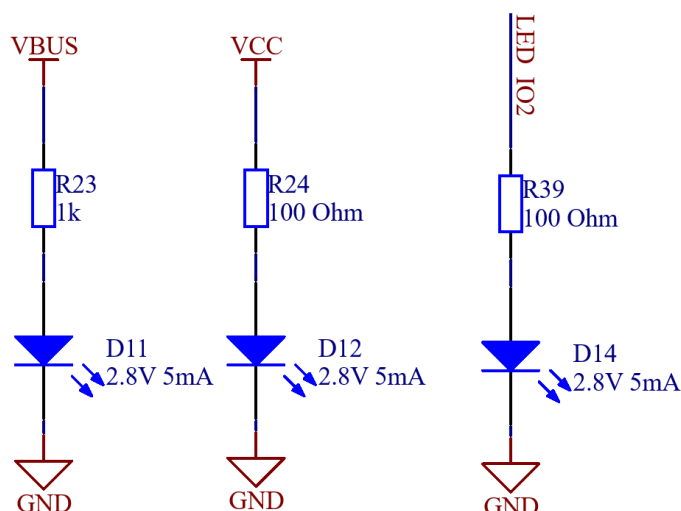
Joonis 3.2 ESP32 programmeerimise skeem

Kasutuses on hetkel kättesaadavaid komponendid et luua samaväärne skeem kui ESP32 arendusplaadil, kõige suurema erinevusega on kasutuses ülepingete ja elektrostaatilise lahenduse (*electrostatic discharge* - ESD) eest kaitsmiseks kaitsekiip, mis koosneb diodidest ja takistitest. Kõik käesolevas lõputöös kasutusel olevad pistikud on kaitstud sarnaselt.

3.2.3 Juhtsüsteemi sisendid ja väljundid

Mikrokontrolleri põhiliseks ülesanneteks on WiFi kaudu andmete alla laadimine, digitaalse reostaadi juhtimine, RTC-st andmete saamine, mõõtmiste tegemine ja USB portide sisselülitamine ja juhtimine. Prototüübi projekteerimisel on kasutatud mitmeid

sisendeid-väljundeid, mille jaoks veel pole vajadust, kuid lisati juhuks, kui on vaja funktsionaalsust lisada. Kokku on süsteemis ka 6 LED-i (*LED – Light Emitting Diode*), mis teevad testimise lihtsamaks.



Joonis 3.3 Indikaatorituled koos eeltakistitega

Enamasti on LED-idel vaja eeltakistit, selleks et piirata neist läbi minevat voolu. Eeltakisti suuruse saab välja arvutada valemiga:

$$R_{LED} = \frac{U_{sisse} - U_{fLED}}{I_{fLED}}, \quad (3.6)$$

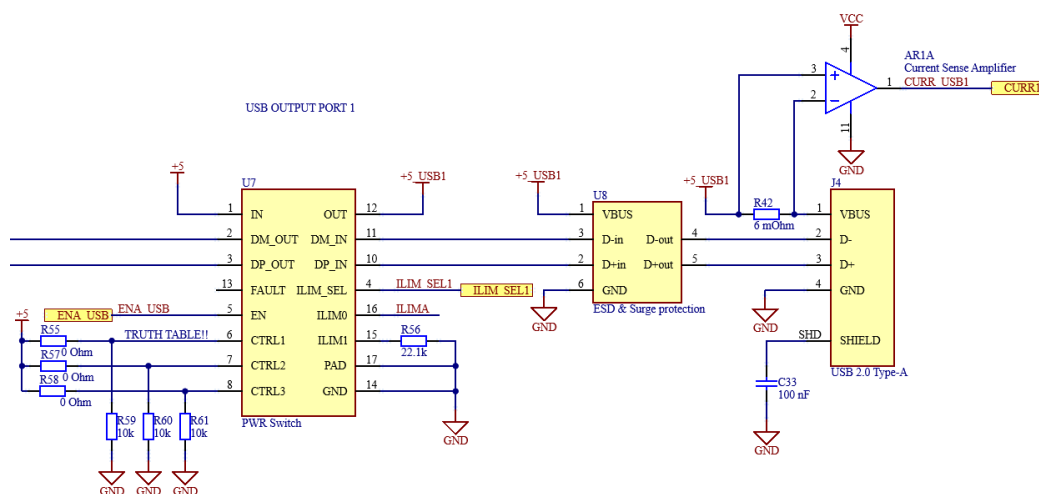
kus R_{LED} on eeltakisti takistus, U_{sisse} on toitepinge, I_{fLED} on diodi läbiv vool ning U_{fLED} on diodil esinev pingelang I_{fLED} -i korral. LED-i pingelangu seost LED-i läbiva vooluga saab leida LED-i andmelehel, kasutades voolu-pinge sõltuvuse graafikut.

3.3 USB väljundi disain

USB pistikuna on kasutuses väga laialtlevinud USB 2.0 Type-A pistik. Väljundvoolu ja pinget mõõdetakse ja saadetakse mikrokontrollerisse, täpsemalt sellest peatükis 3.5.1.

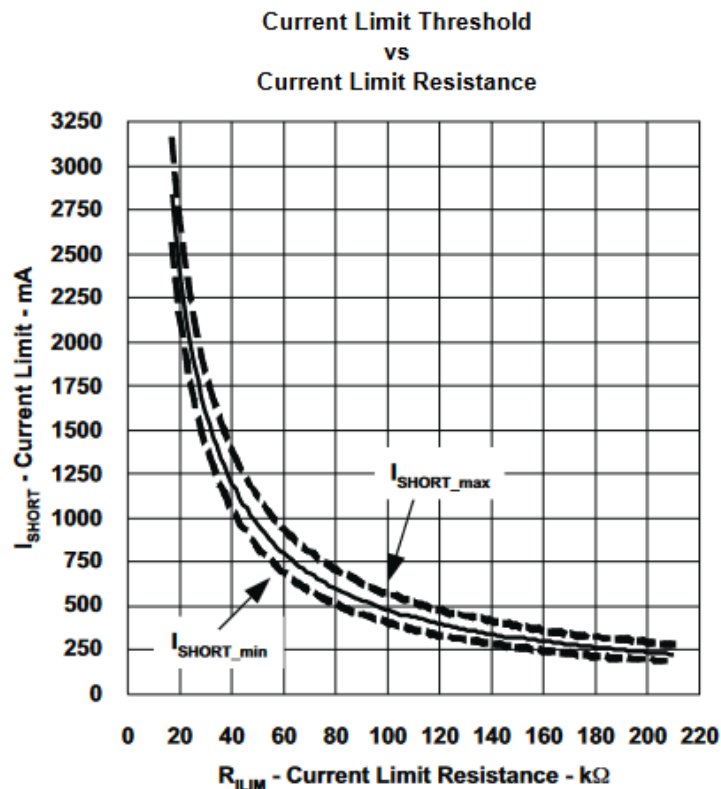
Põhilise kiibina on kasutuses TPS2540, millega on võimalik seada voolulimiiti ning mis suhtleb USB seadmega. Seda on võimalik mikrokontrolleriga sisse lülitada ja digitaalsete sisenditega ka valida, mis konfiguratsioonis see töötab [50]. Selleks, et valida, mis konfiguratsioonis süsteem töötab, otsustati hoida kokku mikrokontrolleri väljundeid ning valiti et konfiguratsiooni valimist on kõige mõistlikum teha riistvaraliselt. Ülestõmbe (*pull-up*) või allatõmbe (*pull-down*) takistitega saab anda niimoodi kiibile sisendid. Selleks, et seadistada kiip kui *Dedicated charging port* koos automaatse tuvastusega

(kas BC1.2 või *Divider Mode*) ühendati CTRL1 sisendi maandusega, ning CTRL3 sisendi +5 V-ga.



Joonis 3.4 USB pordi disain

Voolulimiiti saab kontrollida takistiga. Maksimaalse voolutugevuse sõltuvus sellest takistist on välja toodud TPS2540 andmelehel. Vooluga juhtimine toimibki selle järgi, kus digitaalset reostaati on võimalik juhtida ning sellega voolulimiiti muuta.



Joonis 3.5 TPS2540 voolulimiidi sõltuvus sinna ühendatud takistist

4 SÜSTEEMI PROGRAMMI LOOMINE JA MEHAANILINE DISAIN

4.1 Süsteemisene kommunikatsioon

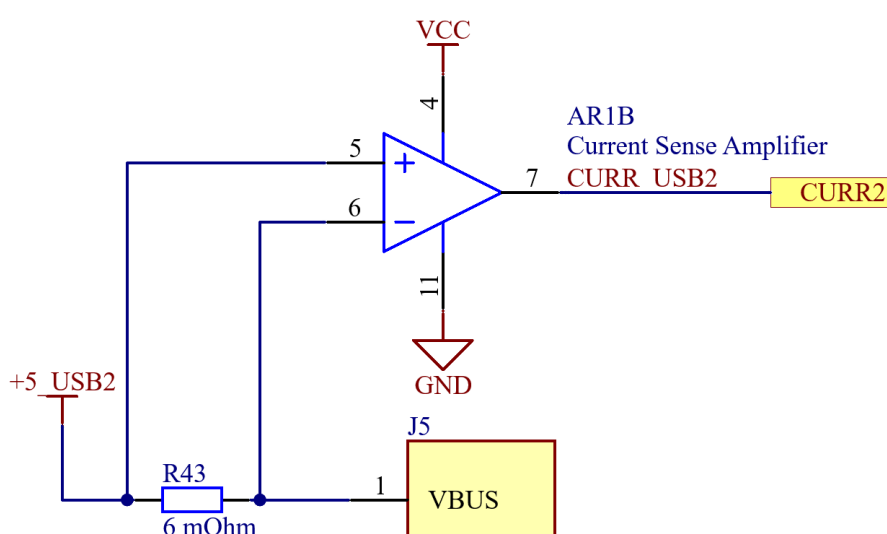
Enamik süsteemi juhtimist toimib lihtsate digitaalsete sisendite-väljundite abil transistor-transistor loogika juures (*transistor-transistor logic – TTL*). Neid on väga lihtne lugeda ja kirjutada valitud programmeeritava juhtseadmega. Süsteem pidevalt mõõdab mitmes kohas pingeid ning samuti voolu. Nende puhul toimub mõõtmine analoogsignaalide kujul.

Voolu mõõtmiseks kasutatakse šunttakistit ja spetsiaalset kiipi, mis võimendab šundil oleva pingelangu signaali. Soovitakse mõõta kuni 2 A voole ning kasutuses on kiip INA4180, mille võimendustegur on 200 [70]. ESP32 analoog-digitaalmuundur (*analog-digital converter – ADC*) on võimeline mõõtma pingeid kuni 2450 mV.

$$I \cdot R_{\text{šunt}} \cdot k < ADC_{Vref} \rightarrow R_{\text{šunt}} < \frac{ADC_{Vref}}{I \cdot k} < \frac{2,45}{2 \cdot 200} < 0,006125 \Omega = 6,125 \text{ m}\Omega, \quad (4.1)$$

kus I tähistab mõõdetavat voolutugevust, $R_{\text{šunt}}$ on šunttakisti takistus, k on võimendi võimendustegur ning ADC_{Vref} on signaali mõõtvat analoog-digitaalmuunduri maksimaalne mõõdetav pinge.

Sellest johtuvalt valiti šundi takistuseks 6 mΩ, et kasutada võimalikult laia ADC pingevahemikku, mitte ületades ADC poolt mõõdetavat maksimaalset pinget.



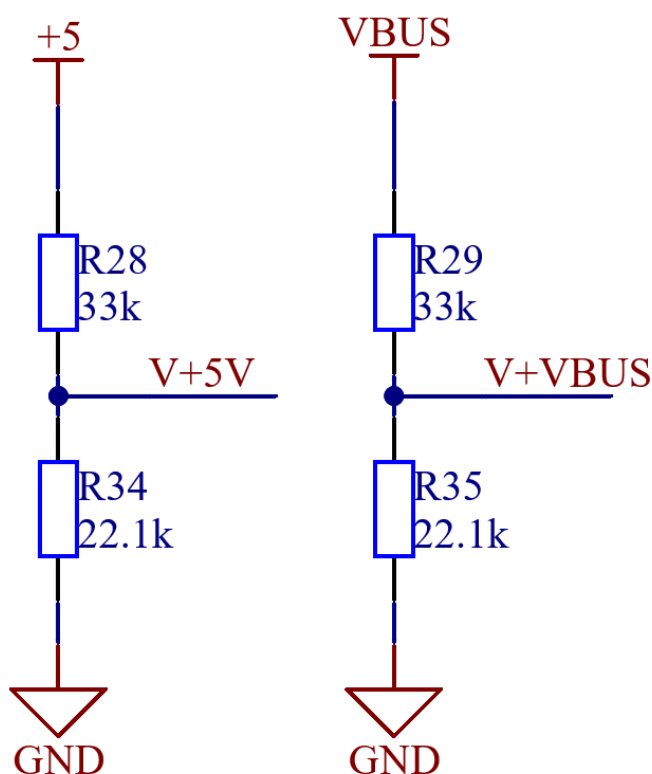
Joonis 4.1 Voolu mõõtmine šunttakisti ja võimendiga

Pinge mõõtmiseks kasutatakse samuti ADC-d ning pingejaguriga saavutatakse vajalik pingevahemik, mille mõõtmiseks ADC on võimeline. Selleks, et mõõta vahemiku kuni 5,5 V on vaja pingejagurit. Pingejaguri valem on:

$$U_{välja} = U_{sisse} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (4.2)$$

kus $U_{välja}$ on pingejaguri väljundpinge, U_{sisse} on pingejaguri sisendpinge, R_1 on toitepinge poolse takisti takistus ning R_2 on maanduse (pinge referentsi) poolse takisti takistus.

Takistite suurused võiksid olla kõrged, selleks et kaod oleksid võimalikud väikesed, kuid samas nad ei tohi olla liiga suured, et ADC enda sisendtakistus hakkaks mõjutama väljundpinget märkimisväärselt. Sellest johtuvalt valiti takistid sellised, mis on juba projektis kasutuses, et vähendada tükitabeli (*Bill of Materials* - BoM) suurust.



Joonis 4.2 Pingejagurid alamsüsteemide pingete mõõtmiseks

Pingejaguri väljundpinge 5,5 V juures valitud takistitega on 2,206 V, mis on natuke vähem kui 2,45 V ning seega on ADC võimeline mõõtma isegi kõrgemaid pingeid kui soovitud.

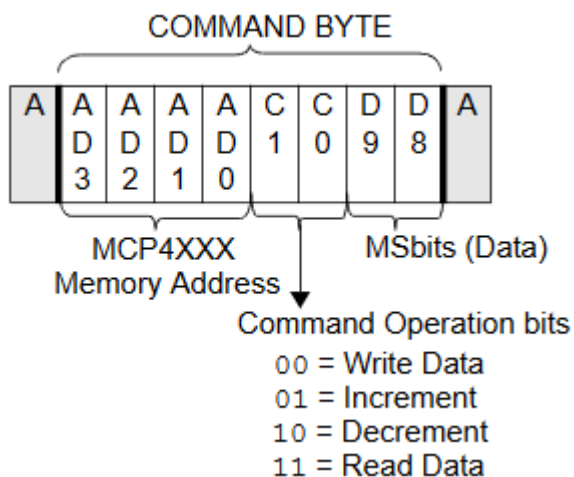
Süsteemi sisesest kommunikatsioonist on standardiseeritud liidesena kasutuses ainult Integraallülituste Vaheline Ahel (*Inter-Integrated Circuit* - I2C). I2C on ühe ülemaga (*master*) ja kuni 1008 alamaga (*slave*) jadasiin, mille jaoks on vaja kahte juhet –

andmete juheta ja kella juheta. Kella kasutatakse et bittide lugemist sünkroniseerida ja kellatakti annab välja ülem. I2C sõnum koosneb 7-10 bitisest aadressist (kõigil seadmetel on oma aadress nende identifitseerimiseks), kahest 8-bitisest andmete kaadrist ning sõnumi algus- ja lõppkonditsioonist. Andmete õigsuse ja kättesaamise kontrolliks on kasutusel ka mitu kinnitusbitti. Nii kell kui ka andmeliin on tõmmatud *pullup* takistitega üles, enamasti 3,3 V või 5 V peale [71]. Käesoleva aplikaatsiooni puhul on ülemseade ESP32-WROOM ning alamseadeid on kaks: RTC ja digitaalne reostaat.

4.1.1 Digitaalse reostaadi kontrollimine

Avatud lähtekoodiga päisefailide lisamine teeb prototüüpide arendamise palju kiiremaks. I2C puhul on ESP32 jaoks loodud päisefail *Wire.h*, mis teeb ülemseadme programmeerimise väga lihtsaks ning taktsignaali loomine käib ühe koodireaga. Lihtne on ka I2C sõnumi edastamine – kindlate funktsioonidega on võimalik alustada, kirjutada sõnumeid ja lõpetada kaader. Reostaadi aadressiks on 45 ning sõnumeid tuleb alustada alati õige aadressi kirjutamisega. Sõnumi sisu pole I2C puhul standardiseeritud ning selle jaoks tuleb digitaalse reostaadi andmelehte uurida.

Ülemseadme poolt tehtud käsklus (*command*) koosneb reostaadi puhul maksimaalsest kahest baidist. Esimese baidi nimi on käsklusbait (*command byte*) ja see määrab ära, mis mäluaadressile ülemseade käskluse saadab ning mis käsklusega on tegu. Käsubaidi hulka kuulub ka kaks andmebitti, mis on kasutusel ainult juhul kui kirjutatakse andmeid või loetakse andmeid.



Joonis 4.3 Digitaalse reostaadi käsklusbaidi sisu

Mäluregistreid on kasutusel kolm: mõlema reostaadi liuguri (*wiper*) jaoks üks ning kolmas seadme konfigureerimiseks: TCON register. TCON registri aadress on binaarsüsteemis *0b0100*, liugur 0 aadress on *0b0000* ja liugur 1 aadress on *0b0001*.

Käskluse teine bait on andmebait ja sinna on võimalik kirjutada väärtus 0 kuni 255 vastavalt soovitud reostaadi takistusväärtusele.

4.2 Väline kommunikatsioon

Kogu süsteemi kommunikatsioon väliste süsteemidega toimub läbi ESP32-WROOM-i. ESP32 kasutamine on väga mugav, sest sinna sisse on integreeritud nii WiFi antenn, WiFi saatja kui ka tarkvaraline võimekus paljude ametlike ja kasutajate poolt koostatud koodiosadega. ESP32 on võimeline ühenduma 2,4 GHz IEEE 802.11 b/g/n standardsete WiFi ühenduspunktidega (*access point*).

Tänu sellele, et kasutusel olev kontrolleri on väga tuntud ning populaarne, siis on selle kohta tehtud väga palju erinevaid teke ja päisefaile (*header*), mis aitavad prototüüpimise teha palju kiiremaks ja lihtsamaks. WiFi-ga ühendamiseks on EspressIf-ilt saadaval otsekohe päisefailid, mida lisades saab kasutada nendes peituvaid funktsioone, tänu millele pole tarvis kogu koodi ise kirjutada.

Tänu päisefailile ja selle implementeerimist näitava näidiskoodile, kuidas WiFi-ga ühendada, on võimalik väga lihtsalt saada internetiühendus, näidiskood TalTechi võrguga ühendamise kohta:

```
Serial.begin(115200); //Jadaandmeside arvuti ja kontrolleri vahel
WiFi.mode(WIFI_STA); //Kasutusel WiFi station'na mitte Access pointina
WiFi.begin(ssid, NULL); //SSID on TalTech, parooli ei ole
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { //Seniks kuni WiFi staatus EI OLE ühendatud
  delay(500);
  Serial.println("Yhendamine WiFi-ga..."); //Kirjuta serial monitori et ühendamine käib
}
Serial.println("Yhendatud!"); // Kui ühendatud siis prindi välja ja mine edasi
Serial.println(""); Serial.print("WiFi connected to: ");Serial.println(ssid);
Serial.println("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
delay(500); |
```

Joonis 4.4 Programm, mis ühendab seadme internetiga läbi WiFi

Koodijupp alustab arvuti ja kontrolleri vahel suhtlust ning kasutab *Wifi.h* funktsioone, selleks et ühendada süsteem TalTechi kooli WiFi võrguga. Süsteem prindib oma staatust ning pärast WiFi-ga ühendamist ka võrgu parameetreid.

4.2.1 Masinliidestuse kasutamine elektrituru andmete lugemiseks

Elering on Eesti võrguoperaator ja samuti koondab Elering andmeid energiakaubanduse kohta. Elering pakub võimalust alla laadida andmeid ka masinliidestuse (API – *Application Programming Interface*) kaudu. Elering API dokumentatsiooni lehelt pakub süsteemile huvi *nps-controller* (NPS – *Nord Pool Spot*) alaleht, kust on võimalik alla laadida päev-ette turu hindasid [72]. Veebileht pakub võimalust laadida alla soovitud päeva elektri hindu tunnipõhiselt ning seda kas .csv-failina (CSV – *comma-separated values*) või siis JSON (JSON – *JavaScript Object Notation*) formaadis. Otsustati kasutada CSV-formaati, mis nõuab vähem programmeerimise välgmälü ja sellega ei pea uut päist lisama ja selle funktsioone õppima. JSON-formaadi plussiks on aga, et andmete alla laadimine ja lugemine JSON objekti sees on väga lihtne.

Selleks, et andmeid küsida Eleringi serverilt, tuleb saata õiges formaadis päring. Eleringi lehel on kirjas, et andmete küsimiseks tuleb saata GET päring. GET päring toimub läbi HTTP protokoll (HTTP – *Hypertext Transfer Protocol*), mis määrab kuidas käib internetis serveri ja kliendi vaheline info edastus. Selle lõputöö raames on akulaadimissüsteem klient, mis küsib andmeid serverilt.

Juhtkontroller peab töötama seega kui HTTP klient ja saatma GET päringu, peale mida vastuse salvestama. Koos kasutatud IDE ja kontrolleriga on saadaval selleks jällegi mitu väga kasulikku päisfaili, mis teeb prototüüpimise palju kiiremaks. HTTP päringute saatmiseks on väga kasulik päis *HttpClient.h*. Eleringi veebileht toetab turvalist ehk krüpteeritud andmeside, mis tähendab, et suhtlus toimuks läbi HTTP laienduse HTTPS (HTTPS – *Hypertext Transfer Protocol Secure*). Selleks, et seda kasutada, on vaja lisakoodi, selleks, et HTTPS andmeside alustada. Seda oleks võimalik teha digitaalse sertifikaadiga millega andmeid krüpteerida ja lahti krüpteerida [73]. Käesoleval lõputöö seda võimalust ei kasuta ning suhtlus pole turvatud, sest selleks puudub vajadus.

4.3 Andmete analüüs ja algoritmi rakendamine

Elering annab andmed välja kindlas formaadis, millel on kolm eripära, mis teevad andmete kasutamise tülikaks: esiteks ei kasuta Elering Eesti aega, vaid tuleb kasutada kas Greenwichi kohaliku keskmist päikeseaega (GMT – *Greenwich Mean Time*) või siis eraldi küsida kindla ajatsooni aega. Hetkel asub Eesti ajatsoonis GMT+3, kuid see muutub koos sellega, kui kaks korda aastas keeratakse kella. Algoritmi lihtsuse huvides ja mikrokontrolleri väga piiratud mäluressursi tõttu ei oska praegu akulaadimissüsteem kella keeramisega automaatselt kaasas käia. Prototüübi edasiarenduse korral tuleks

kindlasti võtta ette tarkvaraarendus selleks. Valitud juhtkontroller ESP32 puhul oli komponentide tellimise ajal laos saadaval ainult versioon ESP32-WROOM-E-N4, mis tähendab, et väikmälu on sellel ainult 4 MB. Sellest on olemas ka 16 MB väikmälu versioon, mida polnud aga tellimise ajal saada ja see tähendab, et kirjutatud kood peab olema võimalikult optimeeritud.

Teine lahendust vajav probleem andmetega oli vajadus alla laetud andmed teha komponentideks ning välja valida vajalikud osad. Alla laadides on väga palju üleliigset informatsiooni andmetes, mis vajab eemaldamist. Näidis, millised on saadud andmed enne korrastamist, leiab jooniselt 5.2. Kõigepealt oli vajalik saadud stringist teha massiiv *char*-andmetüübi pointeritest. See andis võimaluse kasutada C-keeles funktsiooni *strtok()*, millega on võimalik jaotada pikk massiiv osalõikudeks nii, et mingi kindel sümbol näitab, kust tuleks massiivi lõikuda. Kuigi Eleringilt nimetab andmeid komaga eraldatud väärtusteks, siis väärtusi eraldavad omavahel kõige paremini jutumärgid. Kasutades jutumärki lõikamispunktidega, saan *char*-tüüpi pointerid, kus iga kuues saadud sümbolimassiivi pointer on minu poolt soovitud tunnihind.

Edasi tuleb *char** tüüpi muutuja teisendada numbrilisele kujule, et seda kasutada arvutustes – et saada võimsust panna hinnast sõltuma. C-keeles on selleks juba funktsioon loodud. Sellega on võimalik teisendada sobivas kujus *char** kas *float*, *double* või *int* tüüpi muutujaks. Probleemiks on Eleringi poolt antud andmekuju – komakoht on antud komaga, mitte punktiga nagu on C-keeles numbri komakoht tähistatud. See teeb teisendusprotsessi väga palju keerukamaks ning prototüüplahenduse esialgseks töötamiseks otsustan sendikoha eemaldada ning teiseks kõik tunnihinnad *int*-muutujateks ühes pikas massiivis. Nende põhjal saab arvutada välja tunnipõhised laadimisvoolud.

4.4 Korpuse projekteerimine

Mehaanilise disaini vajaduse tekitab toitemuunduris kasutusel olevad kõrged pinged. Toitemuunduri sisendi poolel võivad pinged olla väga kõrged: võrgupinge 230 V amplituudväärtuse korral tõuseb pinge kuni:

$$U_{max} = U_{RMS} \cdot \sqrt{2} = 230 \cdot \sqrt{2} = 325 \text{ (V)} , \quad (4.3)$$

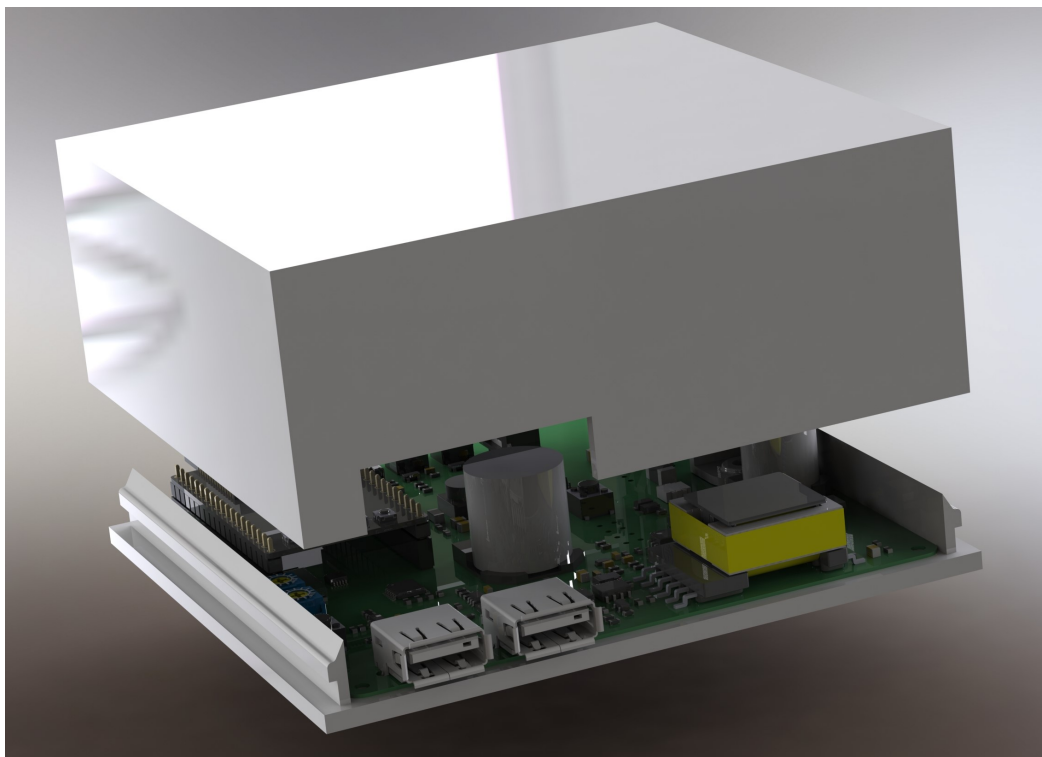
kus U_{max} on pinge amplituudväärtus ja U_{RMS} on pinge ruutkeskväärtus.

Juba üle 50 V pinged võivad olla inimestele väga ohtlikud, põhjustades südamehäireid, hingamisprobleeme ja lihaskokkutõmbeid [74]. Selleks, et ära hoida võimalust, kus mõni inimene (või lõputöö tegija ise) saaks eluohtliku elektrilöögi, sest katsus

pingestatud trükkplaadi peal valesid kohti, on vajadus mehaanilisele isoleerivale kestale ümber trükkplaadi. Samuti võtab see ära lühiseohu, kui trükkplaat paigutada elektrit juhtivast materjalist (näiteks metallist) alusele.

Karbi projekteerimiseks on väga täpselt vaja teada trükkplaadi mõõtmeid, et paigutada avad ja kinnitused õigestesse kohtadesse. Altium Designer-st on võimalik eksportida *.step* formaadis 3d-mudel ning juhul kui kõikide elektroonikakomponentide 3d-mudelid on olemas ja korrektsed, on see ka väga täpne. Projekteeritud koostu joonis on leitav Lisa 6 alt.

Projekteerides on vaja ka arvestada tootmisprotsessiga, et sellele vastavalt disaini teha. Tegu on protoüüplahendusega ning masstootmisesse see ei lähe, samuti on lõputöö koostajal soov katsetada erinevaid disainilahendusi kujunduse mõttes, seega osutus valituks trükkplaadi ümbrise 3d-printimine. Seega peab looma korpuse nii, et seda oleks võimalik printida ning teatud geomeetria projekteerimise puhul on printimiseks vaja teha väga palju lisatööd (näiteks kui vaja tugistruktuure printida, siis tuleb pärast neid puhastada). Selleks, et trükkplaati oleks võimalik karpi sisse panna, tuleb korpus disainida kahes tükis ning omavahel kokku sobitada. Kahe tüki omavahel fikseerimiseks kasutan plöksliidet. Plöksliite detailne joonis on leitav LISA 6, detailvaade B alt.



Joonis 4.5 Korpuse ja trükkplaadi Solidworks-is renderdatud mudel

5 TESTIMINE JA TULEMUSTE ANALÜÜS

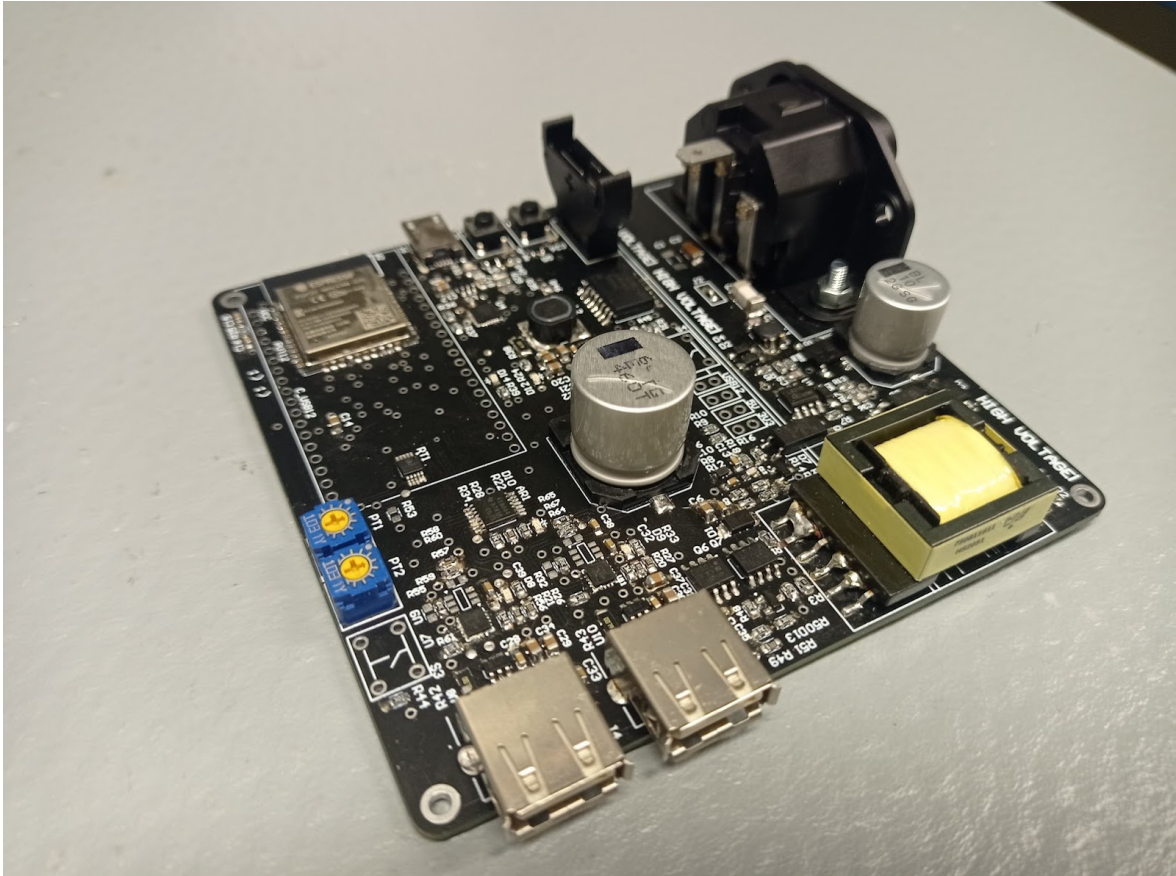
5.1 Komplekteerimine ja põhifunktsionaalsuse saavutamine

5.1.1 Süsteemi komplekteerimine

Komponendid trükkplaadi jaoks telliti Digi-Key-st ja Mouser-st. Trükkplaadi tootmiseks kasutati JLCPCB teenuseid. Komponentide haldamisel on kasutusel Altium Designer-i sisseehitatud võimekust ning iga komponendi puhul on seotud programmis olev komponent realselt näiteks Digi-Key-s oleva ostutootega. Sellega saab kindel olla, et iga komponent on ka realselt olemas ning peale seda kui skeem on valmis, saab genereerida väga lihtsalt BoM-i ja seda kasutada, et komponendid ära tellida.

Trükkplaat on disainitud arvestades, kuidas see komplekteeritakse. Iga komponent on loodud koos 3d mudeliga, mis annab selge arusaama, kuidas realselt komponendid paiknevad, mis annab väga hea eelduse, milline näeb trükkplaat välja koos komponentidega ja teeb komponentide paigutamise lihtsamaks. 3d-mudelid genereerib Altium ise, kui kasutada IPC Footprint Wizard-it, kuid juhul kui tegu pole standardse pakendiga komponendiga (näiteks trafo), siis nende puhul oli komponenteide valiku tegemisel üheks nõudeks, et tootja poolt on saada komponendi 3d-mudel. Sellega on võimalik ka kontrollida kas komponendi jalajälg (*footprint*) on õigete mõõtmetega. Trükkplaat on disainitud eeldusega, et kõik komponendid on käsitsi joodetavad.

Trükkplaadi komplekteeris lõputöö autor väga suures enamuses käsitsi jootekolviga kasutades ainult jootekolbi ja jootetina. Enamike kiipide jootmiseks kasutati ka jootvedelikku (*flux*), mis aitab komponentide jalgu mitte omavahel kokku joota. Kõik pakendid, mille puhul ulatusid jalad välja, kasutati ainult neid vahendeid. Pakendite jaoks, mille puhul komponendi jalad on pakendi all peidus, kasutati jootepastat (*solder paste*), mida soojendati kuuma õhuga. Komplekteerimist alustastati keerulisematest ja väiksematest komponentidest, et nende jootmise jaoks oleks võimalikult palju ruumi ning vea puhul oleks kaotatud töö hulk kõige väiksem.



Joonis 5.1 Komplekteeritud trükkplaat

5.1.2 Süsteemi riistvara testimine

Väga oluline asi enne süsteemi esmakordset käivitamist on selle testimine vigade osas. Kõigepealt kasutati multimeetri takistuse mõõtmise seadet, et mõõta kiipide jalgade omavahelisi lühiseid, kiipide vahelisi ühendusi, takistusi maanduse suhtes, selleks, et teha kindlaks, kas süsteem on piisavalt töökorras, et seda võiks pingestada. Juhul kui komplekteerimisel on tehtud mõni viga ja süsteem pingestatakse, võib see komponente halvimal juhul hävitada.

Esmakordsel testimisel pingestati süsteemi ainult madalpinge osa. Kasutati seatava voolulimiidiga labori toiteploki ning 5 V pingestamisel selgus, et toiteplokk läheb kiiresti voolupiirajasse. Sama probleem juhtus ka, kui pingestada süsteem 3,3 V sisendi pealt. Kuna mõlema toiteliini takistus maa suhtes oli normaalne, siis kahtlustati lühist mõnel kiibil, mis hakkab tööle alles toite lisamisel. Kiiresti selguski, et 3,3 V toitekontroller on joodetud valesti ning peale selle õigesti jootmist töötasid süsteemil kõik toiteliinid nagu eeldatult. Vea leidmisel olid väga suureks abiks indikaator tulukesed, mis näitasid, millises süsteemi osas on probleem.

Edasi süsteemi riistvara testimisel tuli parandada mõnda külmjoodet, kuid üldises plaanis töötas riistvara nagu projekteeritud ja komplekteerimisel rohkem vigu ei ole tehtud. Järgmine suurem probleem tekkis, kui üritati arvuti ja juhtkontrolleri vahel suhtlust luua ja väga lihtsat indikaatortulukese programmi kontrollerile peale laadida. Probleemi jälile saamiseks vahetati kaablit (programmi peale laadimiseks tarvilik Micro-USB kaabel), peale mida mõõdeti kõikide programmi peale laadimiseks vajalike ühenduste takistused, kuid süsteem endiselt ei töötanud. Peale seda süveneti kasutatud USB-UART kiibi andmelehte ja leiti projekteerimisel tehtud vea, kus polnud ühte vajalikku ühendust teinud. See ühendus tehti käsitsi plaadile, mis parandas probleemi. Veaks oli, et CP2102 viik nimega V_{IO} polnud ühenduses 3,3 V toiteliiniga.

5.2 Funktsionaalsuse testimine

Süsteemi kasutamisel tuleb kindlasti arvestada kontrolleri ühe eripäraga, mille tõttu enamik süsteemi ADC-d ei saa funktsioneerida samal ajal, kui süsteem kasutab WiFi sidet. See tähendab, et enamike mõõtmisi saab teha ainult siis, kui WiFi on koodiga välja lülitatud. Tegemist pole küll suure probleemiga, kuid sellega tuleb arvestada koodi kirjutamisel. ADC sisendid tuleks parandatud versioonis teha teistmoodi, sest hetkel puudub kontrolleril võime mõõta kõike, mida soovitud, sest ADC-d jääb väheseks. Arvatavasti oleks mõistlik kasutada multiplekserit, mille puhul saaks kasutada kõigiks mõõtmisteks ainult kahte kanalit – üks millega valida sisend ja teine millega lugeda pingeväärtust. Elektriskeemis tehtud veana võib välja tuua ka, et 3,3 V süsteemil pole võimalik pinget mõõta, sest mõõteskaala on maksimaalselt 2450 mV ning 3,3 V toiteliin pole pingejaguriga toodud kontrollerini. Samuti on tehtud viga ühe USB pordi toitepinge puhul, kui pingejaguri väljundsignaal on ühendatud juhtkontrolleri kanaliga, mis pole võimaline analoog-digitaalmuunduseks.

5.2.1 Süsteemi tarkvara toimimine

Süsteemi tarkvara on täies mahus kätte saadav lõputöö koostaja GitHub-s aadressil: <https://github.com/ekeTominga/Loputoo.git>. Süsteemi tarkvara töötab suurel määral kahes osas: süsteemi algseadistamine ja peale seda süsteemi monitoorimine ja ajale vastavalt muudatuste tegemine.

Kõik süsteemis kasutatud GPIO-d tuleb alguses seadistada kas sisenditeks või väljunditeks ning I2C andmeside tuleb konfigurereida õige kiiruse peale. Pärast seda ühendab seade internetiga ning kõigepealt küsib *time.h* päise abil serverilt kellaaja ja kuupäeva. Selle kuupäeva järgi on võimalik saata Eleringi API-le kuupäevale vastav

päring. Jadamonitorile prinditakse süsteemi staatus ja saadud andmed ning süsteemi seadistamisel on jadamonitoris näha järgnevaid sõnumeid:

```
Yhendamine WiFi-ga...
Yhendamine WiFi-ga...
Yhendamine WiFi-ga...
Yhendatud!

WiFi connected to: TalTech
IP address:
10.224.18.10
HTTP Response code: 200
"Ajatempel (UTC)";"Kuupäev (Eesti aeg)";"NPS Eesti"
"1652389200";"13.05.2022 00:00";"40,04"
"1652392800";"13.05.2022 01:00";"65,49"
"1652396400";"13.05.2022 02:00";"50,1"
"1652400000";"13.05.2022 03:00";"50,08"
"1652403600";"13.05.2022 04:00";"50,09"
"1652407200";"13.05.2022 05:00";"74,86"
"1652410800";"13.05.2022 06:00";"133,26"
"1652414400";"13.05.2022 07:00";"226,93"
"1652418000";"13.05.2022 08:00";"242,74"
"1652421600";"13.05.2022 09:00";"242,29"
"1652425200";"13.05.2022 10:00";"225,02"
"1652428800";"13.05.2022 11:00";"168,78"
"1652432400";"13.05.2022 12:00";"120"
"1652436000";"13.05.2022 13:00";"106,66"
"1652439600";"13.05.2022 14:00";"102,61"
"1652443200";"13.05.2022 15:00";"99,63"
"1652446800";"13.05.2022 16:00";"93,48"
"1652450400";"13.05.2022 17:00";"99,04"
"1652454000";"13.05.2022 18:00";"117,36"
"1652457600";"13.05.2022 19:00";"133,3"
"1652461200";"13.05.2022 20:00";"220,36"
"1652464800";"13.05.2022 21:00";"130,06"
"1652468400";"13.05.2022 22:00";"130,05"
"1652472000";"13.05.2022 23:00";"130,03"
```

Joonis 5.2 Jadamonitori prinditud WiFi-ga ühenduse saamine ja Eleringi API-st saadud andmed

Saadud andmed tuleb filtreerida, et saada nendest kasulik informatsioon, milleks on elektrihind. Täpsemad funktsioonid, mis on kasutuses, leiab alapeatükist 4.3 ning kommenteeritud programmikood on saadaval Github-s, mille link on saadaval alapeatüki 5.3 lõpus.

Peale süsteemi esialgset konfigureerimist hakkab süsteem kella järgima ning ootama, millal muutub muutuja *int currentHour* väärtus, mille puhul süsteem annab digitaalsele reostaadile uue väärtuse. Reostaadi tunnipõhised väärtused asuvad massiivis ning

arvutatakse süsteemi algseadistamisel kohe päeva kohta välja. Takistusele vastavalt ennustab süsteem väljundvoolu ja prindib selle jadamonitoris välja. Peale praeguse kella ja eeldatava praeguse väljundvoolu prindib kontrolleri välja tabeli, kus süsteem on kellaajaliselt välja arvutanud süsteemi võimsuse ja eeldatava väljundvoolu terve päeva kohta. Süsteem töötab maksimaalse võimsuse korral 1,5 A väljundvooluga ja minimaalse võimsuse korral 0,5 A väljundvooluga.

Kell on: 12.21
 Kuupäev: 13.5.2022
 Päeva keskmine hind on: 126.83 €
 Maksimaalne hind on: 242 €
 Minimaalne hind on: 40 €
 Praegune hind on: 120 €... Eeldatav väljundvool on: 1.04 A

0.00 - 1.00	Elektri hind: 40 €/MWh	Võimsus: 100.00 %	Eeldatav väljundvool: 1.50 A
1.00 - 2.00	Elektri hind: 65 €/MWh	Võimsus: 85.60 %	Eeldatav väljundvool: 1.36 A
2.00 - 3.00	Elektri hind: 50 €/MWh	Võimsus: 94.24 %	Eeldatav väljundvool: 1.44 A
3.00 - 4.00	Elektri hind: 50 €/MWh	Võimsus: 94.24 %	Eeldatav väljundvool: 1.44 A
4.00 - 5.00	Elektri hind: 50 €/MWh	Võimsus: 94.24 %	Eeldatav väljundvool: 1.44 A
5.00 - 6.00	Elektri hind: 74 €/MWh	Võimsus: 80.42 %	Eeldatav väljundvool: 1.30 A
6.00 - 7.00	Elektri hind: 133 €/MWh	Võimsus: 47.32 %	Eeldatav väljundvool: 0.97 A
7.00 - 8.00	Elektri hind: 226 €/MWh	Võimsus: 6.95 %	Eeldatav väljundvool: 0.57 A
8.00 - 9.00	Elektri hind: 242 €/MWh	Võimsus: -0.00 %	Eeldatav väljundvool: 0.50 A
9.00 - 10.00	Elektri hind: 242 €/MWh	Võimsus: -0.00 %	Eeldatav väljundvool: 0.50 A
10.00 - 11.00	Elektri hind: 225 €/MWh	Võimsus: 7.38 %	Eeldatav väljundvool: 0.58 A
11.00 - 12.00	Elektri hind: 168 €/MWh	Võimsus: 32.13 %	Eeldatav väljundvool: 0.82 A
12.00 - 13.00	Elektri hind: 120 €/MWh	Võimsus: 53.93 %	Eeldatav väljundvool: 1.04 A
13.00 - 14.00	Elektri hind: 106 €/MWh	Võimsus: 62.00 %	Eeldatav väljundvool: 1.12 A
14.00 - 15.00	Elektri hind: 102 €/MWh	Võimsus: 64.30 %	Eeldatav väljundvool: 1.15 A
15.00 - 16.00	Elektri hind: 99 €/MWh	Võimsus: 66.03 %	Eeldatav väljundvool: 1.16 A
16.00 - 17.00	Elektri hind: 93 €/MWh	Võimsus: 69.48 %	Eeldatav väljundvool: 1.20 A
17.00 - 18.00	Elektri hind: 99 €/MWh	Võimsus: 66.03 %	Eeldatav väljundvool: 1.16 A
18.00 - 19.00	Elektri hind: 117 €/MWh	Võimsus: 55.66 %	Eeldatav väljundvool: 1.06 A
19.00 - 20.00	Elektri hind: 133 €/MWh	Võimsus: 47.32 %	Eeldatav väljundvool: 0.97 A
20.00 - 21.00	Elektri hind: 220 €/MWh	Võimsus: 9.55 %	Eeldatav väljundvool: 0.60 A
21.00 - 22.00	Elektri hind: 130 €/MWh	Võimsus: 48.63 %	Eeldatav väljundvool: 0.99 A
22.00 - 23.00	Elektri hind: 130 €/MWh	Võimsus: 48.63 %	Eeldatav väljundvool: 0.99 A
23.00 - 24.00	Elektri hind: 130 €/MWh	Võimsus: 48.63 %	Eeldatav väljundvool: 0.99 A

Joonis 5.3 Ekraanipilt jadamonitori prinditud töödeldud andmetest

5.3 Tulemuste analüüs ja ettepanekud edasisteks uuringuteks

Lõputöö põhieesmärk oli koostada prototüüp, mis laeb akusid võttes arvesse elektrituru hinda ning see eesmärk sai täidetud. Prototüübi projekteerimine ja prototüüpimine

annab väga kasulikku infot ja kogemust, kuidas ehitada süsteem, mis tarbib elektrit paindlikult ning millised kitsaskohad ja probleemid seda projekteerides tekivad.

Olemasolevat süsteemi on samuti võimalik paremaks teha. Süsteemi voolutarvet oleks võimalik suures osas vähendada kasutades eraldiseisvat RTC-d selle asemel, et internetist pidevalt uuendada kella. Hetkel pole programmikoodi RTC kasutamist implementeeritud. Kasutusel oleva RTC saaks süsteemi alguses konfigureerida ning sünkroniseerida maailmakellaga, pärast mida oleks see võimeline töötama väga pikalt ka ülejäänud süsteemi voolu kadumisel tänu eraldiseisvale varupatareile ning RTC väga madalale voolutarbele. RTC-l on võimekus saata signaal välja iga kord kui algab uus tund ning seda saaks kasutada süsteemi kontrolleri äratussignaalina, mille peale arvutab ta välja vajadusel uued parameetrid ning pärast mida läheb madala voolutarbega unerežiimi (*sleep mode*) tagasi.

Süsteemi prototüüpimine osutus üpriski kulukaks ning kõik komponendid koos trükkplaadi tootmisega maksid üle 70 €. Arvestades süsteemi suhteliselt madalat väljundvõimsust ei ole majanduslikult kuni 10 W akulaadimissüsteem tulus. Kindlasti tuleks selleks, et paindlik tarbimine oleks ka kliendile majanduslikult tasuv arendada välja suure võimsusega akulaadimissüsteem, mille puhul muutuks nutika tarbimise lisamine süsteemi kogumaksumusega võrreldes väga palju odavamaks. Suure võimsusega akulaadimissüsteemi arendamine ja prototüüpimine väärrib kindlasti uurimist, kuid arvestades töö mahtu tuleks seda teha kas magistri- või doktoritöö raames.

Selleks, et optimaalselt kasutada paindliku tarbimist ja otseselt juhtida aku laadimist, tuleks arendada akulaadija, millega oleks võimalik laadida otse akuelemente. USB laadija puhul on akulaadimissüsteem (BMS) enamasti USB alamseadmesse sisse ehitatud ning võimalik on kontrollida ainult USB laadija väljundvoolu. Sarnaselt muunduri võimsuse lisamisega, tõstab ka see arendus keerukust ning väärriks edasist uurimist.

Lõputöö käigus välja arendatud ESP32 programmikood, millega on võimalik alla laadida Nord Pool Spot-i elektrituru andmeid automaatselt reaalaja järgi ning nende konverteerimine lihtsasti kasutatavateks massiivideks kiirendab kindlasti järgnevate paindlikut tarbimist kasutavate süsteemide arendamist. Kood on kõikidele kättesaadaval GitHub-s aadressil: <https://github.com/ekeTominga/Loputoo.git>

KOKKUVÕTE

Töö peamiseks eesmärgiks oli arendada välja akulaadija prototüüp, mis võtab arvesse Nord Pool elektriturude hindu. Paindlik elektri tarbimine aitab tõsta taastuvenergia osakaalu praeguses elektrivõrgus.

Lõputöö esimene peatükk koosneb Nord Pool elektriturude ülevaatest, muudest elektriturude järgivatest seadmete uurimisest ning analüüsist ja üldistest arvutustest, kuidas elektri hindu teades arvutada välja aku laadimisvõimsused. Teine peatükk koosneb süsteemi arhitektuuri valimisest, erinevate alamsüsteemi variantide analüüsist ning süsteemi üldisest kirjeldusest, samuti mõne tähtsama komponendi valikust. Kolmandas peatükis on kirjeldatud elektriskeemide koostamine, spetsiifiliste kiipide valikute põhjendused, alamsüsteemide täpsed kirjeldused ja komponentide väärtuste arvutused. Neljas peatükk hõlmab endas süsteemi tarkvara loomise kirjeldust, kirjeldust kuidas alamsüsteemide vaheline kommunikatsioon toimib ning kuidas kirjutati kood internetist vajalike andmete saamiseks ja nende töötlemiseks. Viies peatükk võtab kokku endas tulemused ja testimise – kuidas süsteem komplekteeriti, kuidas tarkvara tööle saadi ning kuidas see töötas, samuti dokumenteeriti trükkplaadi prototüübi disainimisel tehtud vead ja soovitusel edaspidisteks uuringuteks.

Lõputöö suurimaks tulemuseks on projekteeritud ja komplekteeritud trükkplaat (pilt joonisel 5.1), mis on võimeline akulaadimise võimsust juhtima. Sellega kaasneb ESP32 peal välja töötatud programmikood, mille funktsionaalsuse hulka kuuluvad lisaks süsteemi üldisele juhtimisele ka programmiosa, mis laeb ajapõhiselt internetist masinliidese kaudu päeva elektri hindu ning teisendab nad erinevateks massiivideks (andmed joonisel 5.3), mida saab kasutada peale selle lõputöö ka näidiskoodina teiste paindliku elektritarbimist kasutavate seadmete puhul.

Lõputöö raames projekteeritud prototüüp tõestas, et akulaadimissüsteem, mis toetub laadimisvõimsuse arvutamisel Nord Pool elektriturude hindadele, on võimalik ning andmete alla laadimine ja teisendamine lihtsasti kasutatavateks andmeteks on võimalik teha ka odava mikrokontrolleri baasil. Kindlasti on perspektiivikas edasi uurida suure võimsusega akulaadimissüsteemi majanduslikku tasuvust näiteks magistri- või doktoritöö raames suure võimsusega muunduri prototüübi projekteerimisega.

Prototüübi arendamine andis lõputöö koostajale juurde palju oskusi elektroonika arendamisel ning esimese kogemuse interneti ühilduva manussüsteemi iseseisva programmeerimisega. Lõputöö maht kasvas oodatust palju suuremaks ning paljud tehtud arvutused, analüüsid ja võrdlused ei mahtunud lõputöö kirjalikku ossa. Paljude

alasüsteemide ülesehitusest ega komponentide valimisest pole üldse juttu komponentide ja alasüsteemide suure hulga tõttu, samuti pole analüüsitud programmikoodi loomist süvitsi ning toodud välja üksnes sellega saadud tulemused – dokumenteeritud programmikoodiga on võimalik tutvuda alapeatükis 5.3 välja toodud Github-i lingi kaudu.

Kasutatud kirjandus

- [1] H. Lund ja W. Kempton, „Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G,” 2008. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421508002838>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [2] Elering AS, „Elektriturg,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/elektrituru-kasiraamat/3-elektriturg>. [Kasutatud 12 03 2022].
- [3] E. Valgemäe, „Eesti elektrisüsteemi ümbersünkroniseerimise võimalikud riskid,” 2019. [Võrgumaterjal]. Available: https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/5144/Edi_Valgem%c3%a4e_2019MA_LV_t%c3%a4istekst.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Kasutatud 13 03 2022].
- [4] Elering, „Eesti elektrisüsteemi varustuskindluse aruanne 2020,” 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/sites/default/files/public/VKA2020.pdf>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [5] J. Vetsvanags, „Elektrihinna muutlikkuse mõjutavate tegurite analüüs,” 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/en/Item/7bc338dc-98fd-4ffb-b652-f5655392893e>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [6] J. M. Uribe, S. Mosquera-López ja M. Guillen, „Characterizing electricity market integration in Nord Pool,” 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220314754>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [7] Nord Pool, „Day-ahead market,” Nord Pool AS, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/Day-ahead-market/>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [8] The European Parliament, „Directive on common rules for internal market for electricity,” 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0944&from=EN>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [9] Gridio, „Gridio Frequently Asked Questions,” Gridio, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.gridio.io/faq>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [10] P. Siano ja K. Jamuna, *Advances in Smart Grid Technology*, Singapore: Springer Nature, 2020.
- [11] N. Wong ja M. Kazerani, „A review of bidirectional on-board charger topologies for plugin vehicles,” 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6334957>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [12] S. j. Vadi, „A Review on Communication Standards and Charging Topologies of V2G and V2H Operation Strategies,” 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/19/3748/htm>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [13] Celeon, „Elektriseadmete juhtimine,” Celeon, [Võrgumaterjal]. Available: <https://celeon.eu/>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [14] E. Kulderknap, „Elektrilise pörandakütte elektrikibörsi põhine juhtimisseade,” 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/en/Item/2e330260-641d-4ee5-a130-4902bb4a15e6>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [15] Fusebox, „Case Studies,” Fusebox, [Võrgumaterjal]. Available: <https://fusebox.energy/case-studies/>. [Kasutatud 13 03 2022].

- [16] Themo, „Kuidas Themo toimib?“, Smart Load Solutions OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.themo.ee/et/how-it-works>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [17] Resource innovations, „Financing Energy Storage, a New Factor in Grid Management“, 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.resource-innovations.com/resources/financing-energy-storage-new-factor-grid-management-0>. [Kasutatud 03 04 2022].
- [18] G. Maggio, A. Nicita ja G. Squadrito, „How the hydrogen production from RES could change energy and fuel markets: A review of recent literature“, 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919311292>. [Kasutatud 03 04 2022].
- [19] Energiasalv, „Project Energiasalv“, Energiasalv, 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://energiasalv.ee/project/>. [Kasutatud 03 04 2022].
- [20] R. Dzikowski ja B. Olek, „Capacity sharing — Economic analysis of home battery systems“, 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7981991>. [Kasutatud 03 04 2022].
- [21] E. Mata, J. Ottosson ja J. Nilsson, „A review of flexibility of residential electricity demand as climate solution in four EU countries“, 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab7950/meta>. [Kasutatud 03 04 2022].
- [22] Civitta, „Eesti vesinikuressurside kasutuselevõtu analüüs“, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://envir.ee/media/1219/download>. [Kasutatud 03 04 2022].
- [23] A. Amar, „Profitability Analysis Guide“, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.datarails.com/profitability-analysis-guide/>. [Kasutatud 06 04 2022].
- [24] B. j. Biegel, „Value of flexible consumption in the electricity markets“, 2013. [Võrgumaterjal]. Available: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/203984547/Energy2014_Value_of_flexible.pdf. [Kasutatud 06 04 2022].
- [25] T. Pärle, „Kodumajapidamisseadmete elektrienergia tarbimise juhtimine elektrihinna alusel“, 2016. [Võrgumaterjal]. Available: https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/2931/Timo_P%c3%a4rle_MA2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Kasutatud 23 04 2022].
- [26] NASA, NASA Systems Engineering Handbook Rev 2, Washington DC, 2016.
- [27] Z. Jin, Environment Modeling-Based Requirements Engineering for Software Intensive Systems, Peking: Morgan Kaufmann, 2017.
- [28] S. j. Murtaza, „Comparison of Characteristics-Lead Acid, Nickel Based, Lead Crystal and Lithium Based Batteries“, %1 *International Conference of Modelling and Simulation*, Cambridge, 2015.
- [29] R. Cope ja Y. Podrazhansky, „The art of battery charging“, *IEEE*, kd. 2, pp. 437-442, 2001.
- [30] R. Korthauer, Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications, Kriftel: Springer, 2013.
- [31] AllCell Technologies LLC, „A Comparison of Lead Acid to Lithium-ion“, 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.batterypoweronline.com/wp-content/uploads/2012/07/Lead-acid-white-paper.pdf>. [Kasutatud 12 03 2022].
- [32] E. Ayoub ja N. Karami, „Review on the charging techniques of a Li-Ion battery“, %1 *Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering*, Beirut, 2015.
- [33] B. Valle, C. Wentz ja R. Sarpeshkar, „An Area and Power-Efficient Analog Li-Ion Battery Charger Circuit“, 2011. [Võrgumaterjal]. Available:

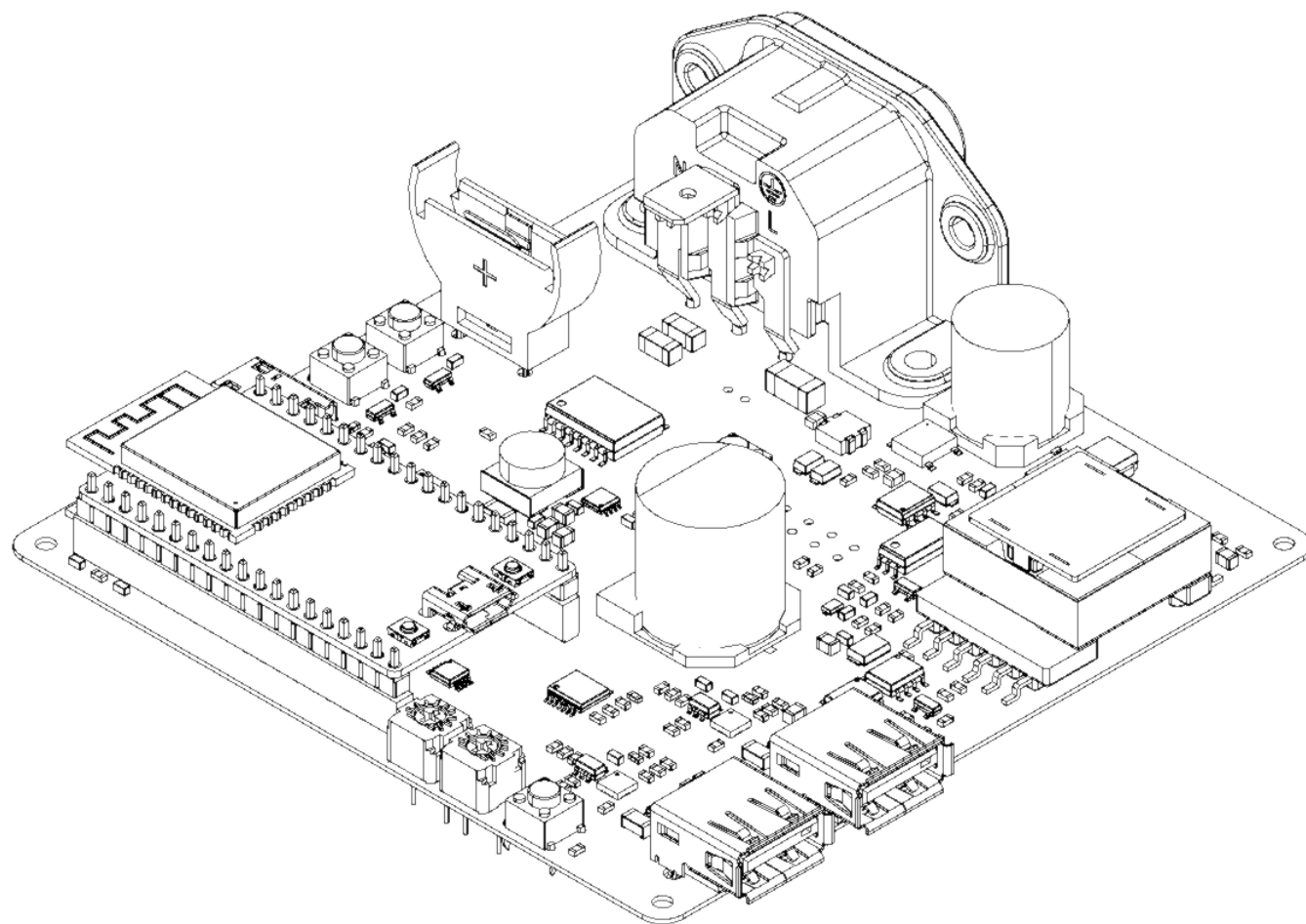
- https://www.researchgate.net/publication/249319678_An_Area_and_Power-Efficient_Analog_Li-Ion_Battery_Charger_Circuit. [Kasutatud 24 04 2022].
- [34] A. j. Pröbstl, „Smart2: Smart Charging for Smart Phones,” %1 *Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications*, Hong Kong, 2015.
- [35] Lenovo, „Lenovo Power and Battery Driver for Windows 11,” Lenovo, [Vörgumaterjal]. Available: <https://support.lenovo.com/us/en/downloads/ds541411-lenovo-settings-power-manager-for-windows-10-version-1703-or-later-thinkpad>. [Kasutatud 12 03 2022].
- [36] V. Levashenko, E. Zaitseva ja I. Androulidakis, „An empirical study on green practices of mobile phone users,” 2016. [Vörgumaterjal]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11276-015-1097-7>. [Kasutatud 12 03 2022].
- [37] G. Goos, J. Hartmanis ja J. v. Leeuwen, „Pervasive Computing,” 2011. [Vörgumaterjal]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-21726-5.pdf>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [38] ON Semiconductor, „SWITCHMODE Power Supply Reference Manual,” ON Semiconductor, [Vörgumaterjal]. Available: https://www.bonavolta.ch/hobby/files/ON_SwitchingSupplies.pdf. [Kasutatud 12 03 2022].
- [39] Coilcraft, „A Guide to Flyback Transformers,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.coilcraft.com/en-us/edu/series/a-guide-to-flyback-transformers/>. [Kasutatud 03 04 2022].
- [40] M. Ashraf ja N. Samah, „Flyback converter design for low power application,” 2015. [Vörgumaterjal]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7381410>. [Kasutatud 12 03 2022].
- [41] Electrical Deck, „EMF Equation of Transformer - Turn & Transformer Ratio,” Electrical Deck, [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.electricaldeck.com/2020/11/emf-equation-of-transformer-turn-and-transformation-ratio.html>. [Kasutatud 12 03 2022].
- [42] L. Sherman, „The Basics of USB Battery Charging,” Maxim Integrated, 2010. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/4/4803.html>. [Kasutatud 20 03 2022].
- [43] R. Murphy, „USB 101: An Introduction to Universal Serial Bus 2.0,” Cypress, 2017. [Vörgumaterjal]. Available: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN57294_USB_101_An_Introduction_to_Universal_Serial_Bus_2.0-ApplicationNotes-v09_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c7cdc391c017d072d8e8e5256&utm_source=cypress&utm_medium=referral&utm_campaign=202110_globe_en_all_integration-a. [Kasutatud 20 03 2022].
- [44] M.-G. Jeong, S.-H. Kim ja C. Yoo, „Integrated Circuit for Mobile Devices in a 130-nm BCDMOS Process,” IEEE, Seoul, 2016.
- [45] B. Rose, „Explore the Basics of USB-C and USB Power Delivery,” ASME, 2021. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.asme.org/topics-resources/content/explore-the-basics-of-usb-c-and-usb-power-delivery>. [Kasutatud 23 03 2022].
- [46] USB-IF, „USB Charger (USB Power Delivery),” USB-IF, [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.usb.org/usb-charger-pd>. [Kasutatud 23 03 2022].

- [47] D. Conradie, „USB-C Programmable Power Supply For Any Project,” Hackaday, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://hackaday.com/2021/01/16/usb-c-programmable-power-supply-for-any-project/>. [Kasutatud 23 03 2022].
- [48] S. Hill, A. Revilla ja S. Chandler, „How does fast charging work? Here’s every single standard compared,” Digitaltrends, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.digitaltrends.com/mobile/how-does-fast-charging-work/>. [Kasutatud 26 03 2022].
- [49] STMicroelectronics, „STEVAL-USBPD27S,” STMicroelectronics, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/steval-usbpd27s.html>. [Kasutatud 26 03 2022].
- [50] Texas Instruments, „TPS2541,” Texas Instruments, 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ti.com/product/TPS2541>. [Kasutatud 26 03 2022].
- [51] Microchip, „MCP4652,” Microchip, 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP4652>. [Kasutatud 26 03 2022].
- [52] I. Hübschmann, „How to Choose the Best IoT WiFi Module,” Nabto, 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.nabto.com/how-to-choose-best-wifi-module-for-iot/>. [Kasutatud 23 03 2022].
- [53] NXP, „88MW32X 802.11n Wi-Fi® Microcontroller SoC,” NXP Semiconductor, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.nxp.com/products/wireless/wi-fi-plus-bluetooth/88mw32x-802-11n-wi-fi-microcontroller-soc:88MW32X>. [Kasutatud 23 03 2022].
- [54] Espressif Systems, „ESP-32-WROOM-E Datasheet,” Espressif Systems, 2022. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf. [Kasutatud 23 03 2022].
- [55] Interpower, „Designing Products with IEC 60320 C13 Connectors and C14 Inlets,” Interpower, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.interpower.com/ic/InfoPower/iec-60320-c13-c14.html>. [Kasutatud 29 03 2022].
- [56] H. Mölder, „Elektromagnetiline ühilduvus,” 2014. [Võrgumaterjal]. Available: http://egdk.ttu.ee/files/2013/EMY_loengukonspekt.pdf. [Kasutatud 29 03 2022].
- [57] ElectronicsTutorials, „Full Wave Rectifier,” AspenCore, Inc, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_6.html. [Kasutatud 12 03 2022].
- [58] Infineon Technologies, „XDPL8219 Digital Flyback Controller IC,” 2020. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-XDPL8219-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d46272aa54c00172c1d42f3c599b. [Kasutatud 02 04 2022].
- [59] Würth Elektronik, „Tranformer 750811611,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.we-online.com/katalog/datasheet/750811611.pdf>. [Kasutatud 13 03 2022].
- [60] Infineon , 2015. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.mouser.ee/datasheet/2/196/Infineon-IPD50R500CE-DS-v02_02-EN-1731773.pdf. [Kasutatud 03 04 2022].
- [61] Maxim Integrated, „Tutorials: 848,” Maxim Integrated Products, Inc, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/8/848.html>. [Kasutatud 12 03 2022].
- [62] R. Ridley, „Flyback Converter Snubber Design,” 2005. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.ridleyengineering.com/images/phocadownload/12_%20flyback_snu_bber_design.pdf. [Kasutatud 12 03 2022].

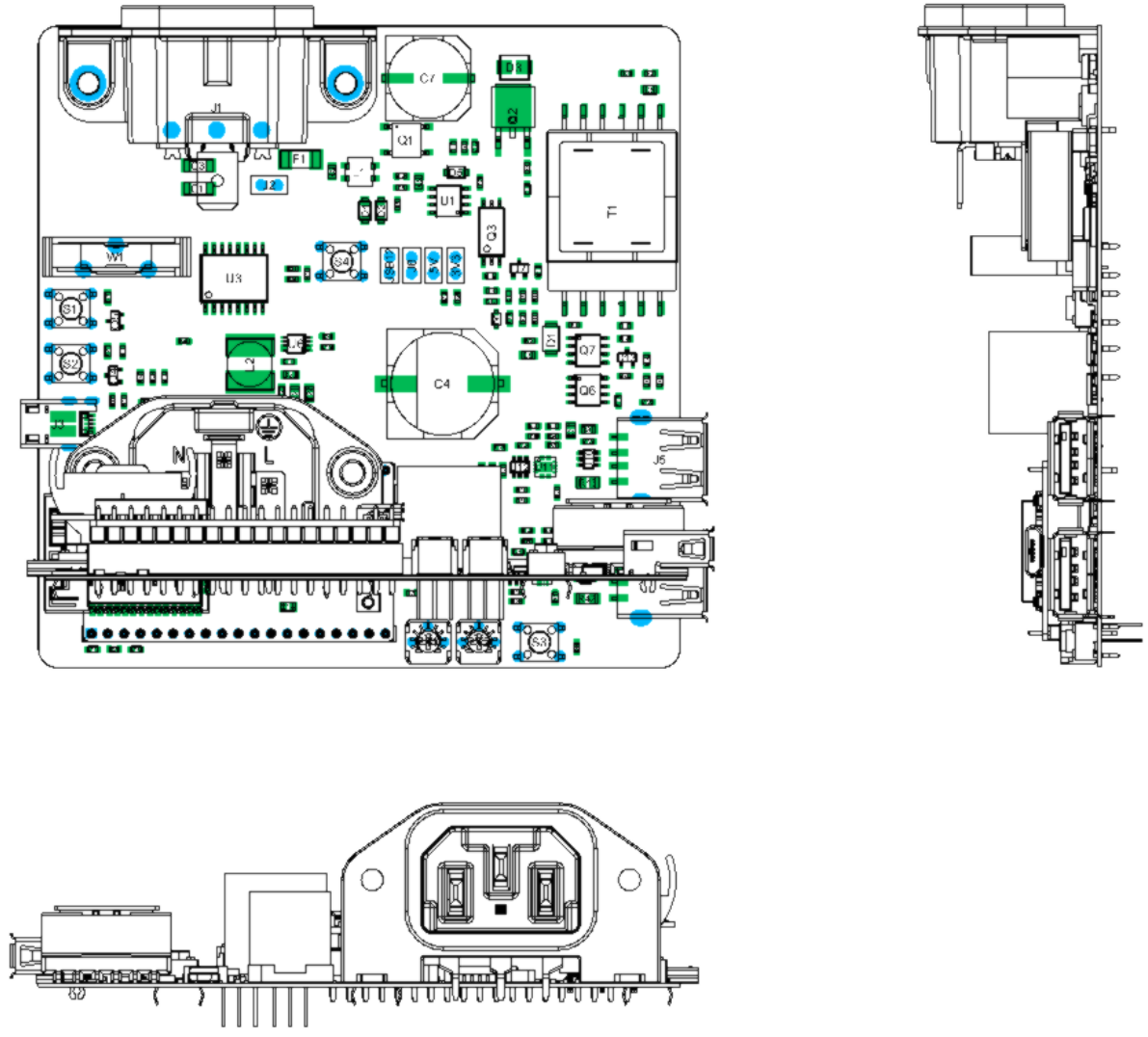
- [63] Passive components blog, „4 types of capacitor for filtering applications in switch mode power supply systems,” 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://passive-components.eu/4-types-of-capacitor-for-filtering-applications-in-switch-mode-power-supply-systems/>. [Kasutatud 03 04 2022].
- [64] Toshiba , „TLP383,” 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=28831&prodName=TLP383>. [Kasutatud 03 04 2022].
- [65] Texas Instruments, „TL431 / TL432 Precision Programmable Reference,” 2018. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf?ts=1648972278956&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Kasutatud 03 04 2022].
- [66] ON Semiconductor, „The TL431 in the Control of,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/TND381-D.PDF>. [Kasutatud 03 04 2022].
- [67] Silicon Labs, „CP2102/9,” 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/CP2102-9.pdf>. [Kasutatud 24 04 2022].
- [68] Rohm Semiconductor, „BD8967FVM Datasheet,” 2015. [Võrgumaterjal]. Available: https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/power/switching_regulator/bd8967fvm-e.pdf. [Kasutatud 24 04 2022].
- [69] EspressIf, „ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>. [Kasutatud 24 04 2022].
- [70] Texas Instruments, „INA4180,” Texas Instruments, 2022. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.ti.com/product/INA4180?HQS=ti-null-null-verifimanuf_manuf-manu-pf-octopart-ww. [Kasutatud 26 03 2022].
- [71] S. Campbell, „Basics of the I2C communication protocol,” CircuitBasics, 2. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/>. [Kasutatud 29 03 2022].
- [72] Elering AS, „Elering dashboard API documentation,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://dashboard.elering.ee/assets/api-doc.html>. [Kasutatud 01 05 2022].
- [73] techtutorialsx, „ESP32 Arduino: HTTPS GET Request,” 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://techtutorialsx.com/2017/11/18/esp32-arduino-https-get-request/>. [Kasutatud 01 05 2022].
- [74] Health and Safety Executive, „Electrical injuries,” Health and Safety Executive, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.hse.gov.uk/electricity/injuries.htm>. [Kasutatud 26 03 2022].

LISAD

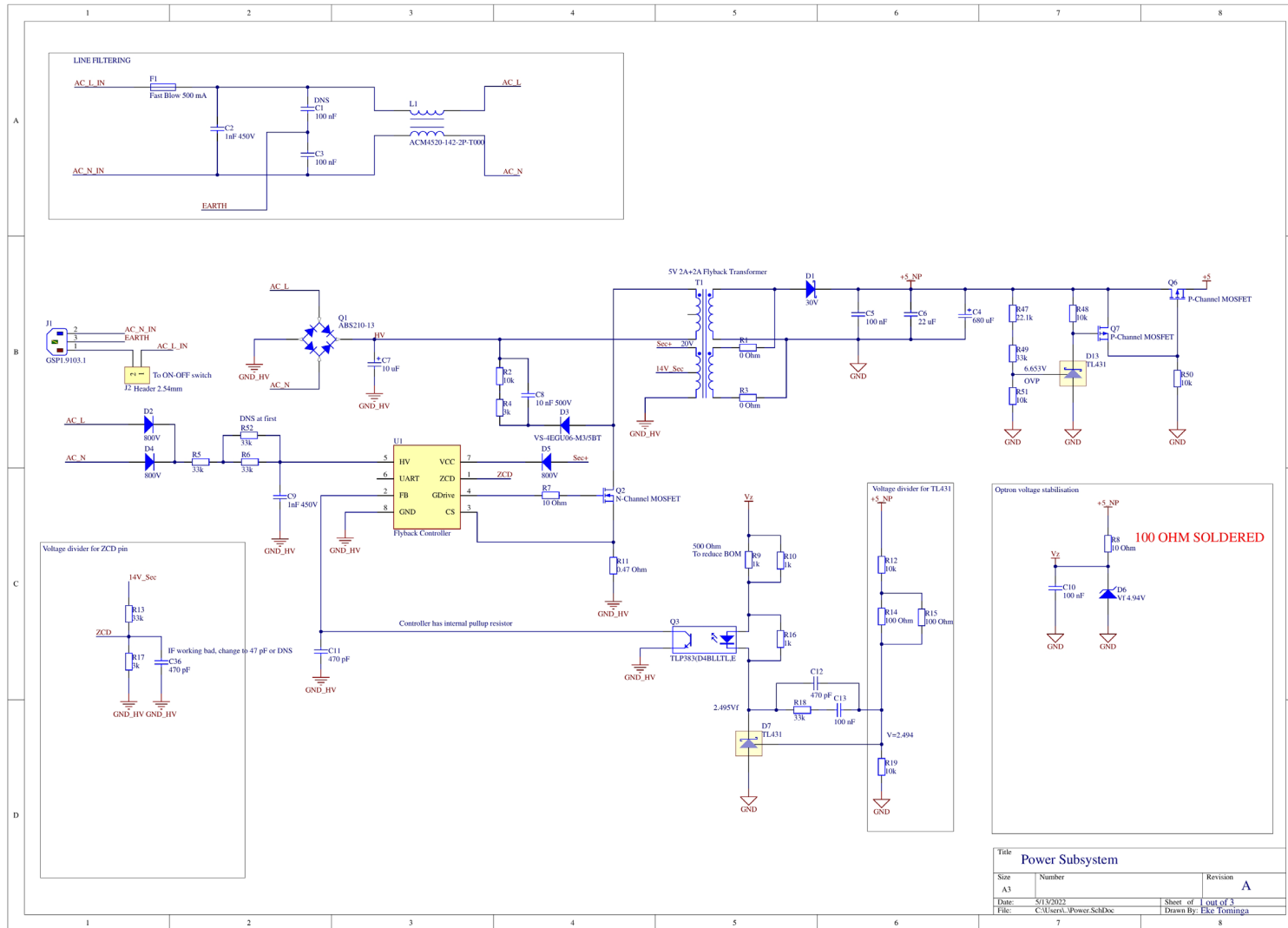
Lisa 1 Isomeetriline vaade projekteeritud trükkplaadist



Lisa 2 Kolmvaade projekteeritud trükkplaadist

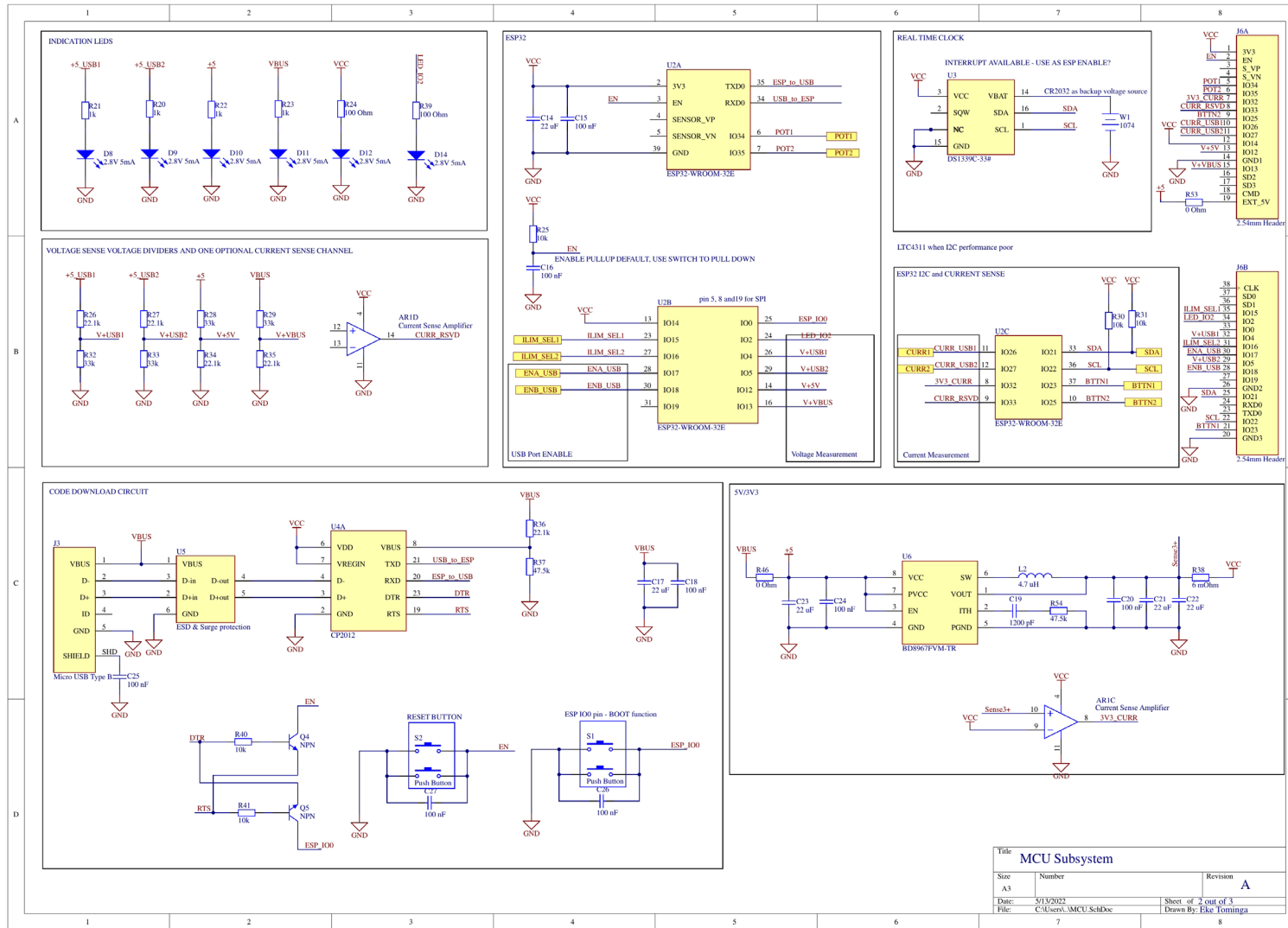


Lisa 3 Koostatud elektriskeemi toitemuunduse osa

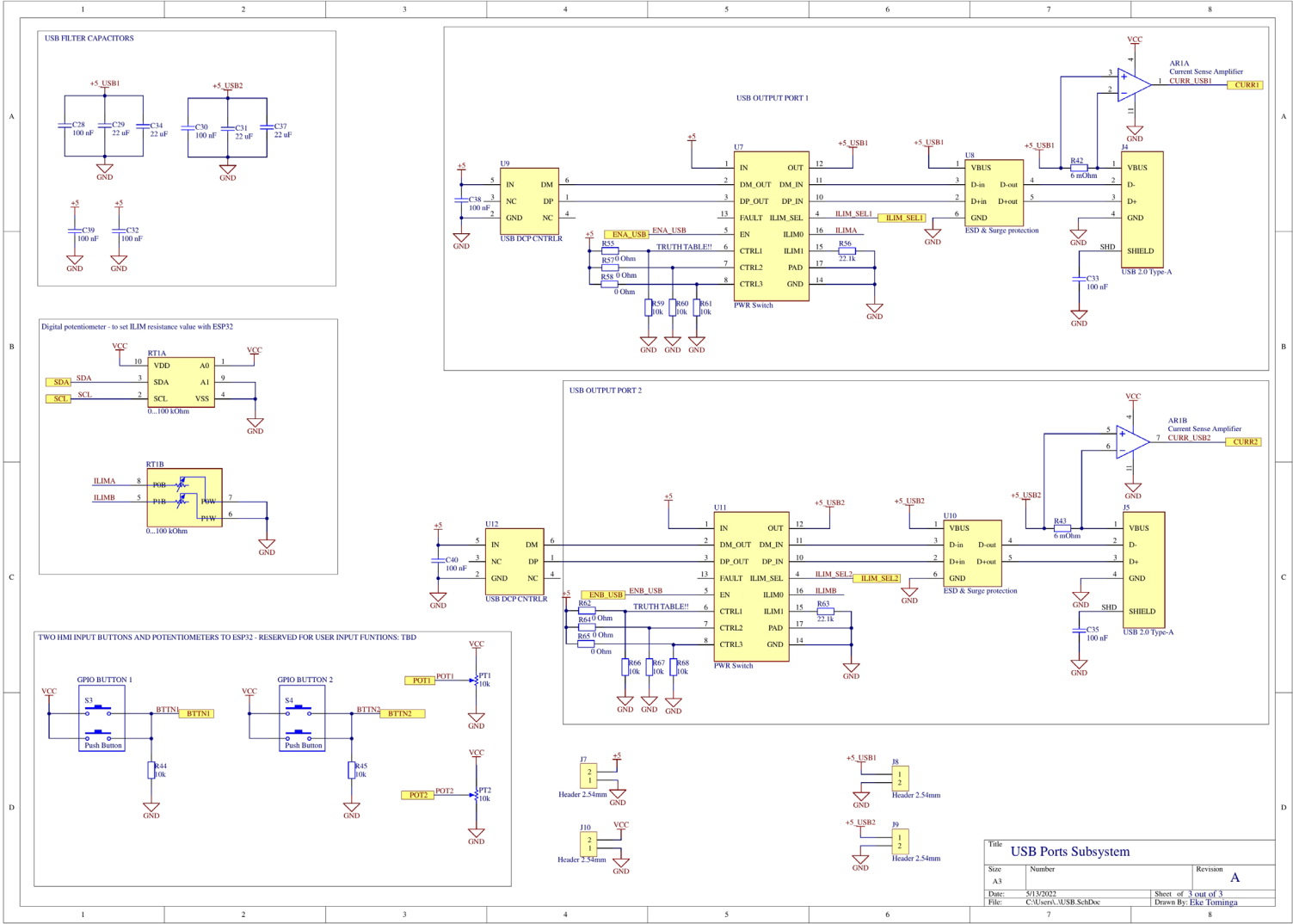


Title: Power Subsystem		
Size: A3	Number:	Revision: A
Date: 31.10.2023	Sheet of: 1	out of 3
File: C:\Users\...PowerSchDoc	Drawn By: Eke Tominga	

Lisa 4 Koostatud elektriskeemi kontrollsüsteemi osa

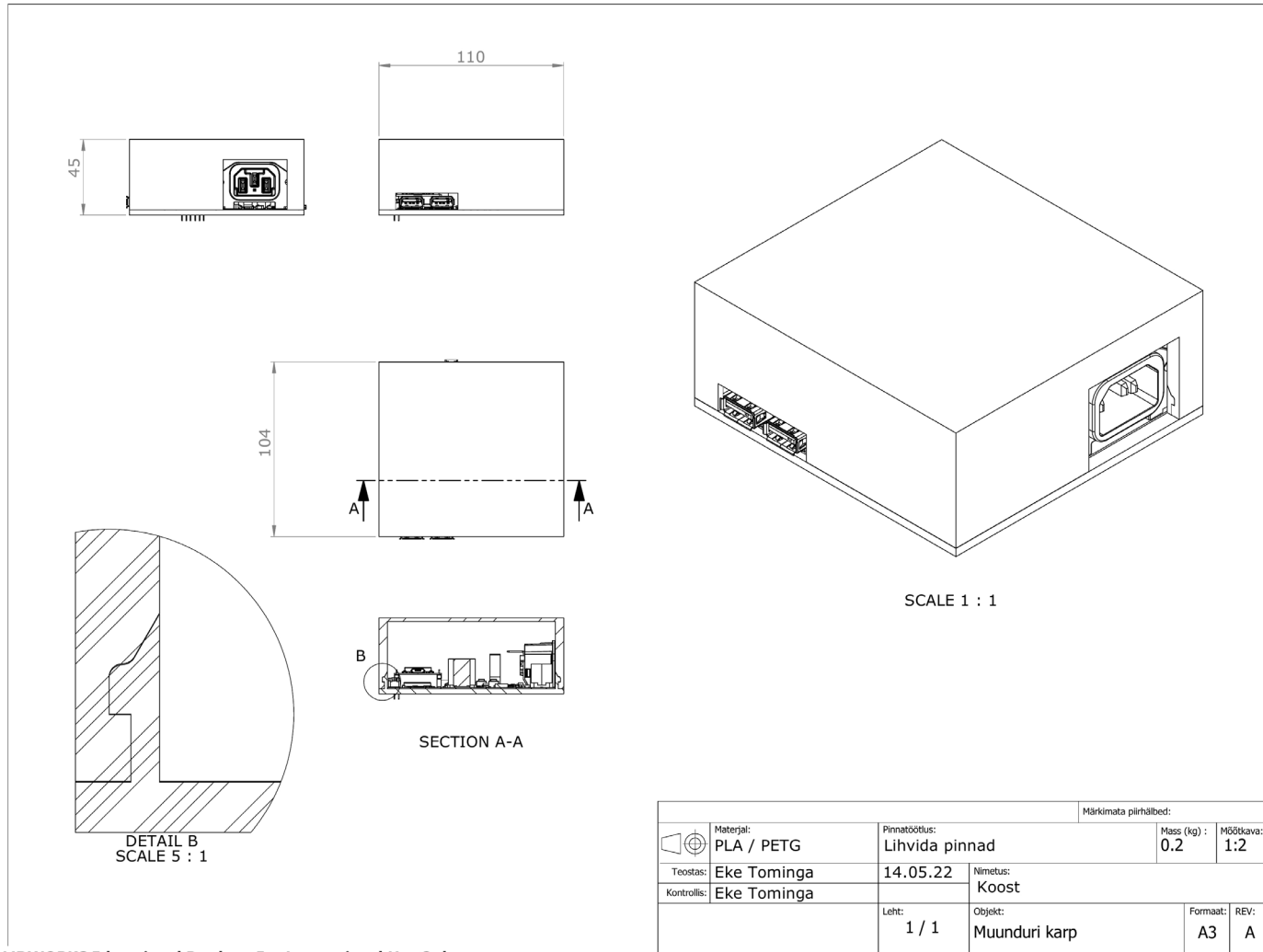


Lisa 5 Koostatud elektriskeemi USB osa



Title		
USB Ports Subsystem		
Size	Number	Revision
A3		A
Date:	2/13/2025	Sheet of 3 out of 3
File:	C:\Users\USB\SchDoc	Drawn By: Eke Tominga

Lisa 6 Projekteeritud trükkplaati kaitsev karp



Lisa 7 Prototüübi tükitabel

	Name	Description	Designator	Quantity	Manufacturer 1	Manufacturer Part Number 1	Supplier 1	Supplier Part Number 1
1	0 Ohm	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/3W 0603	R1, R3, R46, R53, R55, R57, R58, R62, R64, R65	10	Vishay Dale	CRCW06030 000Z0EAHP	Digi - Key	541- 0.0SBTR-ND
2	0...100 kOhm	IC DGT POT 100KOHM 257TAP 10MSOP	RT1	1	Microchip	MCP4652T- 104E/UN	Digi - Key	MCP4652T- 104E/UNCT- ND
3	0.47 Ohm	RES 0.47 OHM 5% 1/10W 0603	R11	1	Yageo	RL0603FR- 070R47L	Digi - Key	311-.47QCT- ND
4	1k	RES 1K OHM 1% 1/10W 0603	R9, R10, R16, R20, R21, R22, R23	7	TE Connectivity	CRGCQ0603 F1K0	Digi - Key	A129688CT- ND
5	1nF 450V	CAP CER 1000PF 450V C0G 0805	C2, C9	2	TDK	C2012C0G2 W102J060A A	Digi - Key	445-15299- 1-ND
6	2.54mm Header		J6	1				
7	2.8V 5mA	LED BLUE CLEAR CHIP SMD	D8, D9, D10, D11, D12, D14	6	Vishay Lite-On	LTST- C191TBKT- 5A	Digi - Key	160-2212-1- ND
8	3k	RES 3K OHM 1% 1/10W 0603	R4, R17	2	Yageo	RC0603FR- 073KL	Digi - Key	311- 3.00KHRTR- ND
9	4.7 uH	FIXED IND 4.7UH 3.3A 29 MOHM SMD	L2	1	Würth Electronics	744787047	Digi - Key	732-4525-1- ND
10	5V 2A+2A Flyback Transformer	SMD OFFLINE TRANSFORMER WE-UNIT	T1	1	Würth Electronics Midcom	750811611	Digi - Key	1297-1088- 1-ND

1 1	6 mOhm	RES 0.006 OHM 1% 1W 1206	R38, R42, R43	3	Rohm	PMR18EZPF U6L00	Digi - Key	RHM.006ALC T-ND
1 2	10 nF 500V	10000 pF ±10% 500V Ceramic Capacitor X7R 0805 (2012 Metric)	C8	1	Wurth Electronics	885342207 014	Digi - Key	732-12169- 1-ND
1 3	10 Ohm	RES 10 OHM 1% 1/10W 0603	R7	1	Stackpole Electronics	RMCF0603F T10R0	Digi - Key	RMCF0603FT 10R0CT-ND
1 4	10 Ohm	RES SMD 100 OHM 1% 1/10W 0603	R8	1	TE Connectivity	CRG0603F1 00R	Digi - Key	A106047CT- ND
1 5	10 uF	CAP ALUM 10UF 20% 400V SMD	C7	1	Rubycon	400SGV10M 12.5X13.5	Digi - Key	1189-4102- 1-ND
1 6	10k	RES 10 KOHM 0.50% 1/10W 0603	R2, R12, R19, R25, R30, R31, R40, R41, R44, R45, R48, R50, R51, R59, R60, R61, R66, R67, R68	19	Yageo	AC0603DR- 0710KL	Digi - Key	13- AC0603DR- 0710KLCT- ND
1 7	10k	TRIMMER 10K OHM 0.5W PC PIN TOP	PT1, PT2	2	Nidec Copal	CT6EP103	Digi - Key	CT6EP103- ND
1 8	22 uF	CAP CER 22UF 16V X5R 0805	C6, C14, C17, C21, C22, C23, C29, C31, C34, C37	10	Samsung	CL21A226M OQNNNE	Digi - Key	1276-2909- 1-ND
1 9	22.1k	RES 22.1K OHM 1% 1/10W 0603	R26, R27, R28, R29, R36, R47, R56, R63	8	Yageo	RC0603FR- 0722K1L	Digi - Key	311- 22.1KHRCT- ND
2 0	30V	DIODE SCHOTTKY 30V 5A SOD128. 360 mV Vf	D1	1	Nexperia USA	PMEG3050E P,115	Digi - Key	1727-5317- 1-ND
2 1	33k	RES 33K OHM 1% 1/10W 0603	R5, R6, R13, R18, R32, R33, R34, R35, R49, R52	10	TE Connectivity	4-2176339- 3	Digi - Key	A129706CT- ND

2 2	47.5k	RES 47.5K OHM 1% 1/10W 0603	R37, R54	2	Yageo	RC0603FR- 0747K5L	Digi - Key	311- 47.5KHRCT- ND
2 3	100 nF	CAP CER 0.1UF 25V X7R 0603	C5, C10, C13, C15, C16, C18, C20, C24, C25, C26, C27, C28, C30, C32, C33, C35, C38, C39, C40	19	Samsung	CL10B104K A8NNNC	Digi - Key	1276-1006- 2-ND
2 4	100 nF	CAP CER 0.1UF 500V X7R 1808	C1, C3	2	KEMET	C1808C104 KCRAC7800	Digi - Key	399-15177- 1-ND
2 5	100 Ohm	RES SMD 100 OHM 1% 1/10W 0603	R14, R15, R24, R39	4	TE Connectivity	CRG0603F1 00R	Digi - Key	A106047CT- ND
2 6	470 pF	CAP CER 470PF 50V C0G/NP0 0603	C11, C12, C36	3	Walsin Technologies	0603N471J 500CT	Digi - Key	1292-1530- 1-ND
2 7	680 uF	CAP ALUM 680UF 20% 25V SMD	C4	1	Panasonic	EEV- TG1E681M	Digi - Key	PCE3642CT- ND
2 8	800V	1.1V Vf, 700mA	D2, D4, D5	3	Vishay Semiconductors	S1FLK-M-08	Digi - Key	S1FLK-M- 08GICT-ND
2 9	1074	BATT HLDR COIN 20MM 1 CEL PC PIN	W1	1	Keystone Electronics	1074	Digi - Key	36-1074-ND
3 0	1200 pF	CAP CER 1200PF 50V C0G/NP0 0603	C19	1	Murata	GRM1885C1 H122JA01D	Digi - Key	490-1453-2- ND
3 1	ABS210-13	Full Bridge Rectifier, 2A	Q1	1	Diodes	ABS210-13	Farn ell	3127183
3 2	ACM4520- 142-2P-T000	CMC 1.7A 2LN 1.4KOHM SMD	L1	1	TDK	ACM4520- 142-2P- T000	Digi - Key	445-6136-1- ND

3 3	BD8967FVM- TR	IC REG BUCK 3.3V 800MA 8MSOP	U6	1	Rohm	BD8967FVM -TR	Digi - Key	BD8967FVMC T-ND
3 4	CP2012	USB to UART, 3 V, 3.6 V, QFN, 24 Pins, -40 °C	U4	1	Silicon Labs	CP2102N- A02- GQFN24	Farn ell	3013847
3 5	Current Sense Amplifier	IC CURR SENSE 4 CIRCUIT 14TSSOP	AR1	1	Texas Instruments	INA4180A4I PWR	Digi - Key	296-49097- 1-ND
3 6	DS1339C- 33#	IC RTC CLK/CALENDAR I2C 16-SOIC	U3	1	Analog Devices	DS1339C- 33#	Digi - Key	DS1339C- 33#-ND
3 7	ESD & Surge protection	IC ESD/EMI PROT DIODES	U5, U8, U10	3	Semtech	ECLAMP212 2S.TCT	Digi - Key	ECLAMP2122 S.TCTCT-ND
3 8	ESP32- WROOM-32E	RX TXRX MOD WIFI TRACE ANT SMD	U2	1				
3 9	Fast Blow 500 mA	FUSE BRD MNT 500MA 350VAC 72VDC	F1	1	Bel	0679H0500 -05	Digi - Key	507-2043-1- ND
4 0	Flyback Controller	Flyback, 90 VAC to 305 VAC/DSO, O/P 1, Flyback	U1	1	Infineon	XDPL8219X UMA1	Farn ell	3605824
4 1	GSP1.9103.1	PWR ENT RCPT IEC320-C14 PANEL SLDR	J1	1	Schurter	GSP1.9103. 1	Digi - Key	486-1130-ND
4 2	Header 2.54mm		J2, J7, J8, J9, J10	5				
4 3	Micro USB Type B	CONN RCPT USB2.0 MICRO B SMD R/A	J3	1	CUI Devices	UJ2-MIBH- 4-SMT-TR	Digi - Key	102-4006-1- ND
4 4	N-Channel MOSFET	MOSFET N-CH 550V 7.6A TO252	Q2	1	Infineon	IPD50R500 CEAUMA1	Digi - Key	IPD50R500C EAUMA1CT- ND

4 5	NPN	SS8050-G NPN TRANSISTOR 1.5A 40V SOT-23 R	Q4, Q5	2	Comchip	SS8050-G	Digi - Key	641-1790-1- ND
4 6	P-Channel MOSFET	MOSFET P-CHANNEL 12V 25A 8SOIC	Q6, Q7	2	Vishay	SQ4153EY- T1_BE3	Digi - Key	742- SQ4153EY- T1_BE3CT- ND
4 7	Push Button		S1, S2, S3, S4	4	SparkFun	COM-00097	Mou ser	474-COM- 00097
4 8	PWR Switch	IC PWR SWITCH N-CHAN 1:1 16WQFN	U7, U11	2	Texas Instruments	TPS2541AR TET	Digi - Key	296-29855- 1-ND
4 9	TL431	IC VREF SHUNT ADJ 0.5% SOT23-3	D7, D13	2	Diodes	TL431BSA-7	Digi - Key	TL431BSA- 7DICT-ND
5 0	TLP383(D4BL LTL,E	OPTOISO 5KV TRANSISTOR SO6L	Q3	1	Toshiba	TLP383(D4B LLTL,E	Digi - Key	TLP383(D4BL LTLECT-ND
5 1	USB 2.0 Type-A	CONN RCPT USB2.0 TYPEA 4P SMD RA	J4, J5	2	Amphenol Communication s Solutions	87583- 2010BLF	Digi - Key	609-4413-ND
5 2	USB DCP CNTRLR	IC USB PWR SW/CTRLR CHRG SOT23-6	U9, U12	2	Texas Instruments	TPS2514AQ DBVTQ1	Digi - Key	296- TPS2514AQD BVTQ1CT-ND
5 3	Zener Diode	DIODE ZENER 4.94V 960MW DO219AC	D6	1	Vishay Semiconductors	PLZ5V1A- G3/H	Digi - Key	PLZ5V1A- G3/HGICT- ND
5 4	VS-4EGU06- M3/5BT	DIODE GEN PURP 600V 4A DO214AA	D3	1	Vishay Semiconductors	VS- 4EGU06- M3/5BT	Digi - Key	VS-4EGU06- M3/5BTGICT- ND