

Wilho-Pekka Ilvesmäki

VERKKOON KYTKEYTYMÄTTÖMÄN JÄRJESTELMÄN ENERGIASEURANTA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Erja Sipilä
Maaliskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Wilho-Pekka Ilvesmäki: Verkkoon kytkeytymättömän järjestelmän energiaseuranta
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikka
Maaliskuu 2023

Tässä työssä suunniteltiin ja toteutettiin tasavirtapiiriin sijoitettava tehonmittauslaitteisto. Käyttökohteena oli aurinkovoimalan lataussäätimen lataustehon mittaus, mutta laite suunniteltiin siten, että sitä voidaan käyttää myös muissa vastaavissa käyttökohteissa.

Teoriaosuudet käsittelevät työn kannalta merkittävimpien komponenttien, kuten virranmittaus-, jännitteenmittaus- ja regulointipiirien, toimintaperiaatteita. Tämän lisäksi käydään läpi yleisellä tasolla mikrokontrollerin rakenne sekä koteloinnissa työn kannalta huomionarvoiset asiat. Teoriaosuuteen lukeutuu myös piirilevyn rakennetta käsittelevä osuus, jossa käydään läpi piirilevyn materiaaleja, ominaisuuksia ja valmistusprosesseja.

Työssä oleellisena osana on piirilevyn suunnittelu ja valmistus prototyyppituotantona, jotta piiri saadaan toimintavarmaksi ennen teollista tuotantoa. Lisäksi keskiössä on myös komponenttien valinta ja hankinta sekä laitteen kokoonpano ja testaus.

Työn toteutuksen aikana kohdattiin muutamia ongelmia itse rakennetun piirilevyn kanssa sekä väärin kytkettyjen johdinvetojen kanssa. Piirilevyn toimivuusongelman syynä pidettiin oikosulkua komponenttien alla puuttuvan juotteenestopinnoitteen vuoksi. Piirilevyongelman ratkaisu löytyi teollisesti valmistetusta piirilevystä, jossa johdinviedot oli suojattu juotteenestopinnoitteella. Tämän lisäksi laitteen mittauspiirien oleelliset signaalipinnit oli kytketty mikrokontrollerin muistiväylän datajohtimiin aiheuttaen satunnaisia ohjelman kaatumisia. Tämänkin saatiin korjattua reitittämällä vedot uudelleen hyppylangoilla. Nämä ja muut rakentamisen, ohjelmoinnin ja testauksen aikana esiintyneet virheet opettivat, miten yksi virhe suunnittelun alkupäässä voi vaatia moninkertaisen määrän aikaa vianhaussa ja korjauksessa sen sijaan, että suunnitteluvaiheen alkupäässä oltaisiin huolellisempia.

Laitteen rakentamisen aikana kohdatuista virheistä huolimatta lopputuloksena saatiin toimiva mittauslaitteisto, jossa molempien testattavien piirien mittaustulokset olivat erittäin lähellä referenssimittauksia. Kokonaisuudessaan työn tavoitteissa onnistuttiin hyvin ja seuraavana tavoitteena on laitteessa esiintyneiden virheiden korjaaminen seuraavaan versioon, ohjelmiston parantaminen sekä laitteen pidempiaikainen koekäyttö oikeassa ympäristössä.

Avainsanat: energianmittaus, tehonmittaus, energiaseuranta, virranmittaus, piirilevy

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämän kandidaatintyön idean taustalla oli entinen työkaverini Panu Kuronen, jonka kesämökin aurinko- ja tuulivoimalaprojektit tarvitsivat keinon seurata tuotettua energiaa. Idea oli loistava, sillä sen avulla sain yhdistettyä elektroniikkaharrastuksista sekä opinnoista keräämäni kokemuksen ja luoda jotain konkreettista, josta jäisi jälkeen muutakin kuin asiakirja tietokannassa.

Tahdon kiittää kandidaatintyöni ohjaajaa Erja Sipilää tuesta ja kaikesta avusta työn loppuun saattamiseksi. Hän otti normaalista kirjallisuuskatsauksesta poikkeavan työni vastuulleen innostavalla ja epäröimättömällä asenteella.

Tahdon myös kiittää kihlattuani Sanni Anttilaa työn oikoluvusta ja henkisestä tuesta kuormittavimpina aikoina. Kiitos myös koiralleni Kyöstille, joka piti huolen siitä, että sain pidettyä tarpeeksi ajatustaukoja kirjoittamisen aikana.

Tampereella, 30. maaliskuuta 2023

Wilho-Pekka Ilvesmäki

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	Mittaustekniikat	3
2.1	Tehon mittaaminen	3
2.1.1	Jännitteenmittaustekniikat	4
2.1.2	Virranmittaustekniikat	6
3.	Komponentit	7
3.1	Sähköiset vaatimukset sekä lämpötila- ja ilmankosteusvaatimukset	7
3.2	Mikrokontrolleri	7
3.2.1	ESP12E	8
3.3	Regulointipiiri	9
3.4	Kotelointi	10
3.4.1	IP-luokitusjärjestelmä	10
3.4.2	EMI-suojaus	11
3.5	Valitut komponentit	12
4.	Laitteen rakennus	13
4.1	Piirilevy	13
4.1.1	Suunnittelu	14
4.1.2	Piirilevyn valmistus	15
4.2	Ohjelmointi	16
5.	Laitteen testaus	18
5.1	Vianetsintä	18
5.2	Mittaukset	19
6.	Yhteenveto	22
	Lähteet	24
	Liite A: Mittauspöytäkirja	26

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ADC	analogia-digitaalimuunnin (engl. Analog-to-digital converter)
CAN	automaatioväylä (engl. Controller Area Network)
CEN	eurooppalainen standardointijärjestö (engl. European Committee for Standardization)
DAC	digitaal-analogiamuunnin (engl. Digital-to-analog converter)
ECAD	elektroninen suunnitteluohjelmisto (engl. electronic computer-aided design)
EDA	elektroninen suunnitteluohjelmisto (engl. electronic design automation)
EMC	sähkömagneettinen yhteensopivuus (engl. electromagnetic compatibility)
EMI	sähkömagneettinen häiriö (engl. electromagnetic interference)
FCC	Yhdysvaltain telehallintovirasto (engl. Federal Communications Commission)
FR	tulenkestävä (engl. flame retardancy)
GPRS	pakettikytkentäinen tiedonsiirtopalvelu (engl. General Packet Radio Service)
HAL	laitteiston abstraktiokerros (engl. Hardware Abstraction Layer)
I ² C	kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylä
IEC	kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio (engl. International Electrotechnical Commission)
IO	siirrätä (engl. Input/Output)
ISO	kansainvälinen standardointiorganisaatio
PTH	pinnoitettu läpivienti (engl. plated through hole)
RAM	hajasaantimuisti (engl. Random Access Memory)
ROM	lukumuisti (engl. Read Only Memory)
SAR ADC	peräkkäislikiarvokisteri ADC (engl. successive-approximation-register)
SoC	järjestelmäpiiri (engl. System on a Chip)

SPI	synkroninen tiedonsiirtoväylä (engl. Serial Peripheral Interface)
UART	sarjaliikennepiiri (engl. Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)
USB	sarjaväyläarkkitehtuuri (engl. Universal Serial Bus)
WLAN	langaton lähiverkko (engl. wireless local area network)

1. JOHDANTO

Lähivuosina esillä ollut Euroopan energiakriisi sekä Euroopan komission vuonna 2019 esitetty ehdotus Euroopan vihreän kehityksen ohjelmasta ovat vauhdittaneet energia-alan siirtymistä uusiutuviin energiantuotantotapoihin [1][2]. Komission julkaiseman ohjelman tavoitteena on muun muassa täysi ilmastoneutraalius vuoteen 2050 mennessä sekä uusiutuvien energianlähteiden osuuden kasvattaminen energiantuotannossa 40 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä [3]. Tätä vihreäksi siirtymäksikin kutsuttua vaihetta on tarkoitus tukea EU:n puolesta säätämällä mm. verotusta tukemaan uusiutuviin energianmuotoihin siirtymistä sekä rajoittamalla fossiilisten polttoaineiden käyttöä säädöksiin ja verotusten avulla. Uusiutuviin energianlähteisiin lukeutuvat esimerkiksi vesi- ja tuulivoima sekä aurinko- ja bioenergia. Vuonna 2020 Euroopassa tuotetusta uusiutuvasta energiasta kaksi kolmasosaa tuotettiin vesi- ja tuulivoiman avulla [4].

Tukien ja säädösten vauhdittamana vaihtoehtoiset uusiutuvat energiaratkaisut yleistyvät vauhdilla myös pienrakennusten energiavaihtoehtoina. Suomessa pientuotannon yleisimmät energianlähteet ovat aurinkoenergia sekä tuulivoima [5]. Näiden tuotantotapojen energian tuottavuus on kuitenkin riippuvainen sääolosuhteista ja vuorokauden ajankohdasta, mikä aiheuttaa sen, että energian kulutus ja tuotto eivät täsmää. Tähän ratkaisuna on vaihtoehtoisesti joko ylimääräisen energian myynti tai sen säilöntä myöhempää käyttöä varten esimerkiksi akustoon. Kotiautomaation yleistyessä voisi myös kulutusta ohjata tuottavimpiin hetkiin, mikäli tuotettua tehoa voisi mitata reaaliaikaisesti. Tämä lisääntyvä sähkön pientuotanto ja alati kasvava tiedonjano aiheuttaa sen, että kaikkea mahdollista dataa halutaan seurata ja tallentaa. Kun hankintapäätös aurinko- tai tuulivoimalasta tehdään, tulee itse tuotetussa energiassa tehtyjen säästöjen olla suuremmat kuin ostetun energian kustannukset. Sijoituksen kannattavuuden varmistamiseksi tulee tuotettu energia mitata.

Akulliset voimalat pitävät aina sisällään lataussäätimen, jolla akustoa ladataan. Osa markkinoilla olevista säätimistä mittaa tuotettua tehoa ja tarjoaa mittaustuloksia käyttäjälle, mutta kaikissa säätimissä ei mittausta ole valmiina. Yksinkertaisimmillaan rajapinta mittaustuloksille voi olla lukema laitteen näytöllä ja osassa tietoon pääsee käsiksi vain valmistajan puhelinsovelluksen kautta. Parhaimmillaan valmistaja kuitenkin tarjoaa sarjaportin, jonka pystyy yhdistämään omaan kotiautomaatiojärjestelmään suhteellisen helposti. Tässä kuitenkin keskitytään vanhempiin järjestelmiin, jossa erillistä

avointa liityntää ei ole tai uudempiin laitteisiin, joiden rinnalle halutaan varmentava mittaus tai johdoton ratkaisu.

Tähän ongelmaan pureudutaan tässä työssä suunnittelemalla ja rakentamalla aurinkovoimalan lataussäätimen ja akuston välille sijoittuva tehonmittauspiiri, jolla tuotettua energiaa voidaan seurata luotettavasti. Luvussa 2 perehdytään tehon mittauksen teoriaan sekä mittaustekniikoihin mikrokontrolleripiireillä. Luvussa 3 tarkastellaan laitteen sähköisiä vaatimuksia perustuen kohteena olevaan laitteistoon sekä ympäristöstä johtuvia lämpötila- ja kosteusvaatimuksia. Lisäksi luvussa tutustutaan työssä tarvittaviin komponentteihin ja näiden teoreettiseen taustaan. Luku 4 koostuu sekä piirilevyn ja sen valmistuksen teoriasta että työssä tehdyn prototyypin valmistusprosessien kuvailusta. Luvussa 5 testataan valmistetun laitteen toimivuutta sekä tarkastellaan laitteessa ilmenneitä ongelmakohtia ja saatujen tuloksien tarkkuutta. Yhteenvetoluvussa 6 puolestaan kerrataan tiivistetysti työn tulokset.

2. MITTAUSTEKNIIKAT

Yhtenä keskeisimpänä tekijänä laitteen toiminnan kannalta on fysikaalisten suureiden, virran ja jännitteen, mittaus ja muuntaminen digitaaliseen muotoon laskentaa varten. Tässä luvussa käsitellään tehon määrittelyä sekä jännitteen- ja virranmittaustekniikoita.

2.1 Tehon mittaaminen

Tutkittavan laitteiston tuottama tai kuluttama hetkellinen sähköteho määritellään kaavalla

$$p(t) = v(t)i(t), \quad (2.1)$$

missä p on teho, v on laitteen yli oleva jännite ja i on laitteen virta ajanhetkellä t . Tehon etumerkki määrittelee sen tuottaako laite tehoa vai kuluttaako se sitä. Mikäli laitteena on vastus, voidaan teho määrittellä kaavalla

$$p(t) = v(t)i(t) = i^2(t)R = \frac{v^2(t)}{R}, \quad (2.2)$$

missä teho määritellään resistanssin R avulla. Tarkasteltaessa tuotettua tai kulutettua tehoa tietyn ajanjakson välillä kuvastaa tätä paremmin suure energia, joka määritellään tehon integraalina

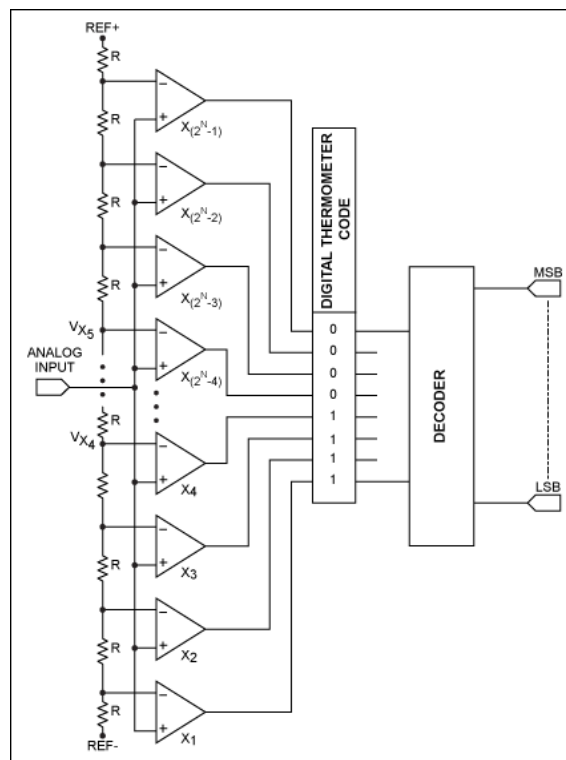
$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt. \quad (2.3)$$

Energian yksikkönä on joule, mutta mitatessa sähköenergiaa käytetään joulen sijasta kilowattituntia, wattituntia tai wattisekuntia riippuen tuotetun energian suuruusluokasta. [6][7]

Mitatessa tuotettua energiaa mikrokontrollerilla on näytteiden välillä ajanjakso T , joka riippuu muun muassa prosessorin kellotaajuudesta sekä näytteistykseen tarvittavasta ajasta. Näytteenottotaajuus $f_s = \frac{1}{T}$ puolestaan kertoo näytteiden lukumäärän sekunnissa. Näytteenottotaajuus on merkittävä suure digitalisoinnissa, sillä Nyquistin teoreeman mukaan tutkittavan analogisen signaalin taajuus voi olla maksimissaan puolet näytteenottotaajuudesta, jotta signaali voidaan uudelleenmäärittää digitaalisesti. Tässä työssä tutkittavat signaalit ovat hitaasti muuttuvia signaaleja, joten näytteenottotaajuudella ei ole tässä yhteydessä suurta merkitystä. [8]

2.1.1 Jännitteenmittaustekniikat

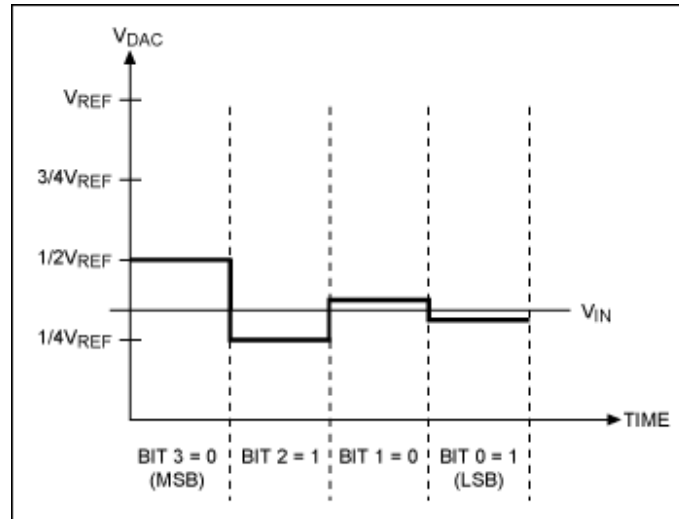
Jännitteen mittaamiseen käytetään yleensä A/D-muunninta (engl. Analog-to-digital converter, ADC), jolla analoginen jännite muunnetaan digitaaliseksi. ADC:ita löytyy lukuisilla eri arkkitehtuureilla ja yksi näistä on suoramuunnos-ADC (engl. Flash ADC). Tässä tallennettu analogiasignaali, eli jännite, muunnetaan digitaaliseksi komparaattorien avulla. Komparaattorit vertailevat kahta sisääntulojännitettä toisiinsa ja mikäli tarkasteltava jännite on vertailukohteen suuruinen tai sitä suurempi, kytkeytyy ulostulo päälle. Komparaattorien vertailusignaalit voidaan luoda esimerkiksi vastusjakajan avulla kuvan 2.1 mukaisesti. Kun muunnos on tehty, ulostulo asetetaan oikeanlaiseksi dekooderin avulla. Flash ADC -menetelmä on nopea, sillä ulostulon muuttumista rajoittaa ainoastaan komparaattorien sekä dekooderin muutosnopeus. Muihin menetelmiin verrattuna Flash ADC vaatii runsaasti tilaa komparaattoreiden takia, mikä kasvattaa laitteen kustannuksia etenkin suurilla tarkkuuksilla. Menetelmää käytetäänkin suurilla tarkkuuksilla vain suurilla muunnosnopeuksilla vaativissa sovellutuksissa, kuten oskilloskoopeissa, tutkateknologiassa ja satelliittikommunikaatiossa. [9]



Kuva 2.1. Flash ADC:n rakennekuva [9]

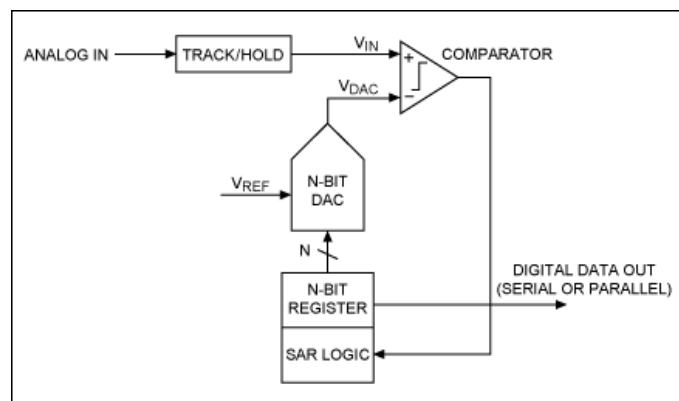
Peräkkäislikiarvovrekisteri ADC, eli SAR ADC (engl. successive-approximation-register) on toinen yleisesti käytössä oleva ADC arkkitehtuuri. Siinä muunnos tapahtuu puolitushaun (engl. binary search) avulla kuvan 2.2 mukaisesti. Tutkittava jännite tallennetaan pitopiiriin, josta sitä verrataan digitaal-analogiamuuntimella (engl. digital-to-analog converter, DAC) luotuihin jännitteisiin. DAC:illa luotu jännite asetetaan ensiksi puoleen

väliin tutkittavaa jännitealuetta ja aluetta puolitetaan jokaisella syklillä yhä lähemmäksi tutkittavaa arvoa. SAR ADC:n etu Flash ADC:hen verrattuna on komponenttien vähyyys, pienempi pinta-ala sirulla ja matalampi tehonkulutus. Muunnin koostuu yksinkertaistetusti kuvan 2.3 mukaisesti pitopiiristä, komparaattorista, DAC:ista sekä ulostulorekisteristä ja SAR:in logiikasta. Koska muunnos tapahtuu vaiheittain, pidentää se muunnokseen kuluva aika sekä madaltaa näytteenottotaajuutta. [10]



Kuva 2.2. SAR ADC:n puolitushaku [10]

ADC:t ovat kuitenkin herkkiä ja niiden hyväksymä jännitealue on matala, yleensä maksimissaan 3,6 tai 5,5 VDC [11]. Mitattaessa muuntimen maksimijännitettä suurempaa jännitettä tulee se laskea sopivaksi esimerkiksi lineaarisen vastusjakajan avulla.



Kuva 2.3. SAR ADC:n rakennekuva [10]

Useat mikrokontrollerit sisältävät vähintään yhden ADC-muuntimen, mutta näillä on tyypillisesti matala resoluutio, jolloin suurta tarkkuutta vaativissa kohteissa on vaihtoehtona käyttää ulkoista piiriä. Ulkoisia piirejä on saatavilla useilla eri mittausresoluutioilla, sisääntulojen lukumäärillä ja kommunikointiväylillä [11].

2.1.2 Virranmittaustekniikat

Virtaa voidaan mitata tasavirtapiiristä lähtökohtaisesti kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa perustuu tunnetun resistanssin mittaamiseen Ohmin lain ($U = RI$) avulla ja toinen virtajohtimen ympärille luodun magneettikentän voimakkuuden mittaamiseen. [12]

Virranmittaus tunnetun resistanssin avulla tapahtuu joko erillisellä sunttivastuksella tai hyödyntämällä tutkittavan piirin kuparivedosta. Kuparivedosta hyödyntämällä vältetään erillisen sunttivastuksen aiheuttamat tehohäviöt, mutta tämä on herkempi lämpötilan muutoksille. Lämpötilan aiheuttamaa virhettä voidaan kompensoida mittaamalla kuparivedoksen lämpötilaa. Toinen ja yleisempi tapa on mitata piirille sarjaan lisätyn tunnetun sunttivastuksen yli oleva jännite. Tällöin käyttämällä myös Ohmin lakia, saamme laskettua piirissä kulkevan virran. Tämän menetelmän heikkoutena on se, että vastuksessa tapahtuvat tehohäviöt ovat verrannollisia virran neliöön ($P = RI^2$). Häviöiden minimoimiseksi sunttien resistanssiarvot ovat tyypillisesti hyvin pieniä ja näin myös mitattava jännitehäviö on todella pieni. Mitattu jännitehäviö voidaan vahvistaa operaatiovahvistimella tai siihen tarkoitettulla virranmittauspiirillä. [12]

Vaihtoehtoinen tapa mitata virtaa on Hall-anturilla. Sähkövirta luo johtimen läpi kulkiessaan magneettikentän, jonka magneettivuon tiheyttä mitataan Hall-anturilla. Vuon suuruus riippuu mm. johtimen etäisyydestä mittauspisteestä, väliaineesta ja virran suuruudesta. Hall-mittaustyyli tarjoaa suntista poiketen galvaanisen erotuksen mitattavasta piiristä. [12]

3. KOMPONENTIT

Tavoitteena on rakentaa monikäyttöinen tehonmittauspiiri, jota pystytään hyödyntämään monissa eri käyttökohteissa. Käyttökohteisiin lukeutuvat mökkien ja muiden pienrakennusten akulliset aurinko- ja tuulivoimalat. Määritellään laite toimivaksi yleisimmillä akkukäyttöjännitteillä. Laitteen tulee lisäksi pystyä lähettämään mitattu tehotieto langattomasti joko Bluetooth-, WIFI- tai GPRS-yhteydellä. Laite tulee myös koteloida siten, että se voidaan asentaa kevyeen säärasisäilytykseen rakennuksen ulkoseinälle. Laitteen tulee myös kestää Suomessa esiintyviä vaihtuvia sääolosuhteita.

3.1 Sähköiset vaatimukset sekä lämpötila- ja ilmankosteusvaatimukset

Laitteen sähköiset vaatimukset määräytyvät ensisijaisesti kohteena olevasta laitteistosta, joka sisältää Victron Energy:n valmistaman SmartSolar MPPT 100/50 -lataussäätimen sekä nimellisjännitteeltään 24 V:n lyijyakuston. Lataussäätimen datalehdeltä saamme latauksen maksimivirraksi 50 A [13]. Piiri saa käyttöjännitteensä ulkoisesti ja sen suuruus on joko 12 tai 24 V. Mitattavan piirin käyttöjännite riippuu ladattavan akuston nimellisjännitteestä ja varauksen tilasta. Mitoitetaan järjestelmä 12 V:n sekä 24 V:n lyijyakuston nimellisjännitteelle, jolloin latauksen aikainen käyttöjännite voi vaihdella välillä 10,8 — 14,4 V tai 21,6 — 28,8 V [14].

Laite sijoittuu lataussäätimen ja akuston välille, joka voi olla sisä- tai ulkotiloissa. Mikäli sijoituspaikka on ulkona, laite on alttiina suurille lämpötilavaihteluille, jotka esimerkiksi Suomessa voivat olla -51,5 — 37,2 °C [15]. Mikäli laite asennetaan ulkotiloihin kosteutta läpäisevään koteloon, voi ilman suhteellinen kosteus nousta jopa 90 %:iin.

3.2 Mikrokontrolleri

Mikrokontrolleri on yhden piirin pienoistietokone, joka pitää sisällään prosessorin yhdellä tai useammalla ytimellä. Tämän lisäksi mikrokontrollerissa on yleensä ohjelmamuistia (ROM) sekä hajamuistia (RAM) ja digitaalisia siirräntöjä eli I/O:ita (engl. Input/Output). Näiden lisäksi kontrollerissa voi olla myös oheislaitelohkoja kuten ajastimia, vahtikoira-piiri, reaaliaikakello, sarjaliikennepiiri (engl. Universal Asynchronous Receiver-

Transmitter, UART), kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylä (I^2C), synkroninen sarjaväylä (engl. Serial Peripheral Interface, SPI), universaali sarjaväylä (engl. Universal Serial Bus, USB), automaatiiväylä (engl. Controller Area Network, CAN), ADC-, DAC- ja internet-lohkoja. [16]

Työhön valittavan mikrokontrollerin pitää tukea langattomuutta, jotta laitteen voi asentaa vapaasti ilman ylimääräisiä johdotuksia. Langattoman tiedonsiirron protokollaa valittaessa tulee huomioida jo käytettävissä olevat resurssit. Tämän työn kohteena olevassa rakennuksessa oli käytettävissä langaton lähiverkko (WLAN), minkä takia WLAN:ia tukeva mikrokontrolleri oli potentiaalisin vaihtoehto. Myös kotiautomaatiojärjestelmissä yleisesti käytettyjä tiedonsiirtoprotokollia, kuten Zigbee, Z-wave, Bluetooth ja Matter, tulee pohtia mahdollisen jatkokehityksen kannalta.

3.2.1 ESP12E

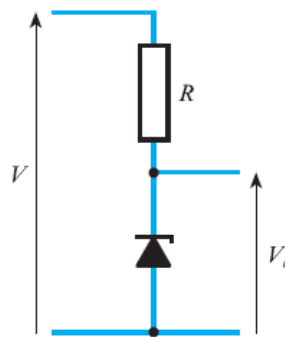
Työssä käytettäväksi kontrolleriksi valikoitui Espressif'in ESP8266EX järjestelmäpiiri (engl. System-on-Chip, SoC), mikä pitää sisällään 32-bittisen Tensilica L106 -mikrokontrollerin. ESP8266EX ei pidä sisällään ROM-muistia, vaan se tulee tarjota ulkoisesti [17]. Useat moduulit pitävät kuitenkin sisällään ohjelmamuistin, ESP8266EX:n, antennin, kideoskillaattorin sekä näiden tarvitsemat oheispassiivikomponentit. Yksi näistä moduuleista on Ai-thinkerin valmistama ESP-12E-moduuli, jota myös käytetään tässä työssä.

Moduuli pitää sisällään 4 megatavua ROM:ia, johon käyttäjän ohjelma tallennetaan. Moduulissa on myös 10-bittinen ADC-muunnin, mutta tehon laskemiseen tarvitaan vähintään kaksi sisääntulokanavaa, joten erillinen muunnin on järkevämpi vaihtoehto. Moduulista löytyvät myös tarvittavat tiedonsiirtolohkot kuten UART, I^2C sekä SPI. USART:in avulla kontrolleriin ladataan ohjelmakoodi. USART:ia voidaan myös hyödyntää vianetsinnässä lähettämällä sen kautta tilaviestejä tietokoneelle. I^2C :tä käytetään kommunikointiväylänä oheispiireille, kuten ADC-muuntimille. Prosessori käyttää ohjelman lukemiseen ROM-muistilta SPI väylää ja samaa väylää voidaan hyödyntää muille ulkoisille laitteille, kuten näytölle. Ulkoisten liityntöjen lisäksi moduuli tarvitsee toimiakseen syöttöjännitteen, joka on tyypillisesti 3,3 V. Moduulin virrankulutuksen keskiarvo on 80 mA, mutta lähettäessä se voi nousta 170 mA:in. [17][18]

Moduuli valikoitui käytettäväksi tähän työhön, sillä sen käytöstä löytyi aikaisempaa kokemusta ja työhön käytettävissä oleva rajallinen aika ei mahdollistanut uuden kontrollerin opettelua. Lisäksi maailmalla vallitseva komponenttipula aiheuttaa puolijohdekomponentteihin saatavuusongelmia ja kyseisiä moduuleita oli valmiiksi hankittuna varastoon, mikä helpotti valintaa.

3.3 Regulointipiiri

Käyttöjännitteen madaltaminen ohjainpiirille tapahtuu usein lineaariregulaattorilla tai jännitettä madaltavalla hakkuriregulaattorilla, eli Buck-piirillä. Zener-diodia käytetään myös regulointiin matalavirtaisissa sovelluksissa kuten esimerkiksi tarjoamaan referenssijännitteitä. Zenerin toimintaperiaate perustuu siihen, kun sen yli oleva jännite ylittää estosuuntaisen läpilyöntijännitteen alkaa se johtamaan virtaa lähes rajattomasti tarjoten vakaan ulostulojännitteen. Liian suuri virta kuitenkin tuhoaa zenerin, joten sitä täytyy rajoittaa vastuksella kuvan 3.1 mukaisesti. Zenerin käyttöä rajoittaa kuitenkin sen tehonkesto ja se, että tarkkuutta vaativissa sovelluksissa sen läpi kulkevan virran tulisi olla vakio. Lisäksi zenerin läpilyöntijännitteen suuruus vaihtelee lämpötilan muuttuessa. [19]



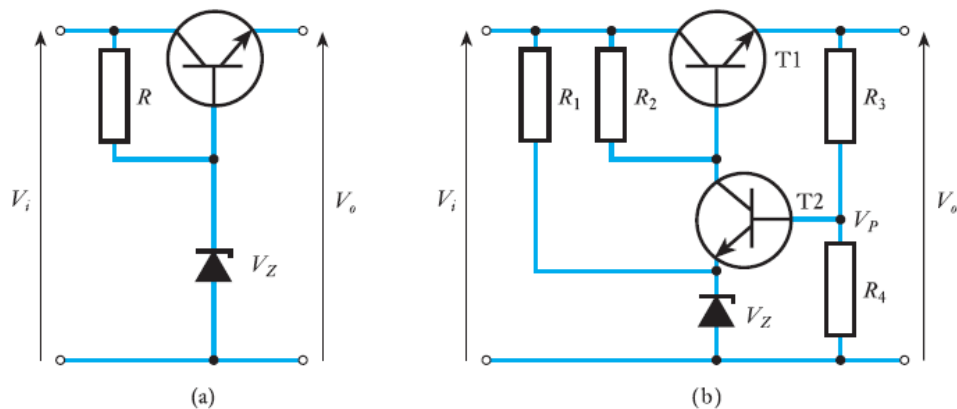
Kuva 3.1. Jännitteen regulointi zenerin ja etuvastuksen avulla [19]

Lineaariregulaattorin toiminta perustuu tunnettuun referenssijännitteeseen, johon verrataan ulostulojännitettä vastuksien takaisinkytkennän avulla. Referenssijännite voidaan luoda esimerkiksi zener-diodin avulla. Kuvassa 3.2 on esiteltyä kaksi yksinkertaistettua mallia lineaariregulaattorista. Kuvan molemmissa piireissä on zener-diodin avulla luotu referenssijännite V_Z , joka ohjautuu a-kuvan tapauksessa suoraan transistorin kannalle. Transistori on kytketty toimimaan emitteriseuraimena, missä ulostulojännite seuraa kannan jännitettä, eli V_Z :aa. Kuvan piiriille b on lisätty mukaan takaisinkytkentä ja tällöin ulostulojännitteen suuruus määräytyy vastuksien R_3 ja R_4 arvojen sekä jännitteen V_P :n perusteella.

Lineaariregulaattorin edut ovat yksinkertainen rakenne, vakaa ulostulojännite, vähäiset oheiskomponentit ja hinta. Piirin heikkoutena on puolestaan huono hyötysuhde ja suuret tehohäviöt etenkin suurilla virroilla. [19]

Buck-piirissä regulointi tapahtuu katkaisemalla sisääntulojännitettä suurella taajuudella, joka on tyypillisesti kilohertsien luokkaa. Tällöin ulostulojännitteen suuruus on katkotun jännitteen keskiarvo ja sitä voidaan säätää muuttamalla pulssisuhdetta. Yksinkertaisimmillaan piiri koostuu kytkimestä, diodista, kelasta, kondensaattorista sekä ohjauslogiikasta. Kytkimen ollessa kiinni kulkee virta sen ja kelan lävitse kohti

kuormaa ja kondensaattoria. Kytkimen avautuessa diodi siirtyy johtavaan tilaan ja tarjoaa virralle paluureitin maahan. Kytkennän saavuttaessa tasapainotilan, pysyy ulostulojännite tasaisena. Buck-piirillä saavutetaan huomattavasti parempi hyötysuhde verrattuna lineaariregulaattoriin ja lisäksi piirin tehohäviöt ovat pienet. Buck-piirin heikkouksina ovat kuitenkin kytkennästä aiheutuvat häiriöt sekä piirin monimutkaisuus. Buck-piirille on saatavissa ohjauslogiikkapiirejä, jotka sisältävät logiikan lisäksi myös kytkimen. Ne vaativat tyypillisesti ympärilleen lisäksi diodin, kelan sekä kondensaattorin. Piirejä on saatavilla myös valmiina moduuleina, joiden pinnien sijainnit ja lukumäärä ovat yhteensopivia yleisimpien lineaariregulaattoreiden kanssa. [19]



Kuva 3.2. Yksinkertaistetut lineaariregulaattorin mallit [19]

3.4 Kotelointi

Kotelointia suunniteltaessa tulee huomioida vallitsevat ympäristöolosuhteet. Pöly, lika, kosteus ja lämpö ovat merkittävimmät riskitekijät piirin toimintavarmuudelle. Lisäksi laitteen toimintavarmuuteen liittyy olennaisesti suojaus sähkömagneettisten häiriöiden (engl. electromagnetic interference, EMI) varalta, kun laite sijoitetaan paikkaan, jossa häiriöt voivat olla merkittäviä.

Näistä riskitekijöistä pölyyn, likaan ja kosteuteen voidaan vaikuttaa kotelon IP-luokituksella sekä laitteen sijoittelulla. Lämpöön vaikuttaa merkittävästi laitteen sijainti, kotelon materiaali ja piirin lämmönsiirtotiet kotelon ulkopuolelle. Erityisen suuria lämpötiloja voidaan välttää sijoittamalla laite varjoisaan paikkaan, jolloin suora auringon lämpösäteily ei lämmitä koteloa ja yhä edelleen piirilevyä.

3.4.1 IP-luokitusjärjestelmä

IP-luokitusjärjestelmän on kehittänyt kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio (engl. International Electrotechnical Commission, IEC) yhtenäistääkseen eri suojausvaatimukset ja standardit kotelointiin liittyen [20]. ISO-standardin [21] mukaan kotelon

IP-luokitus kertoo:

- Sen suojauskyvystä ulkoisia objekteja, mukaanlukien pöly, vastaan.
- Sen kyvystä suojata käyttäjiä koskemasta sisällä oleviin vaarallisiin osiin.
- Sen kyvystä suojata sisällä olevaa laitetta vedeltä ja kosteudelta.

Luokitus koostuu tyypillisimmin kahdesta numerosta ja mahdollisesta lisäkirjaimesta. Ensimmäinen luku kertoo kotelon kyvystä estää vieraita esineitä ja pölyä. Toinen luku kertoo kotelon suojauksen vettä ja kosteutta vastaan. Luvun perään tulevaa lisäkirjainta voidaan käyttää antamaan lisätietoja suoritetuista testeistä tai henkilösuojauksesta vaarallisia osia vastaan. [21] Lukujen merkitykset on koottu taulukkoon 3.1.

Taulukko 3.1. IP-luokituksen merkintöjen selitykset [21]

1. luku	2. luku	selite
0	X	Ei suojausta kosketukselta
1	X	Suojaus yli 50 mm kappaleilta
2	X	Suojaus yli 12,5 mm kappaleilta
3	X	Suojaus yli 2,5 mm kappaleilta
4	X	Suojaus yli 1 mm kappaleilta
5	X	Osittainen pölysuojaus
6	X	Pölytiivis
X	0	Ei suojausta vedeltä
X	1	Suojaus yläpuolelta tippuvalta vedeltä
X	2	Suojaus enintään 15 asteen kulmassa tippuvalta vedeltä
X	3	Suojaus suihkuavalta vedeltä enintään 60 asteen kulmassa
X	4	Suojaus vesiroiskeita vastaan
X	5	Suojaus joka suunnalta suihkuavaa vettä vastaan
X	6	Suojaus joka suunnalta voimakkaasti suihkuavaa vettä vastaan
X	7	Suojaus hetkellistä upotusta vastaan
X	8	Suojaus jatkuvaa upotusta vastaan

Työssä käytetty laitteisto voidaan sijoittaa ulkotiloihin, useimmiten sähkökeskuksen läheisyyteen. Tällöin asennussijainti on seinällä, ja kotelon tulee kestää vesi-, lumi- ja räntäsadetta. Kotelon luokaksi valittiin edellä olevin perustein IP64.

3.4.2 EMI-suojaus

Sähkömagneettinen yhteensopivuus (engl. electromagnetic compatibility, EMC) asettaa elektronisille laitteille vaatimuksia sähkömagneettisten häiriöiden varalle. Useat kansainväliset sekä paikalliset organisaatiot, kuten kansainvälinen sähköalan standardointior-

ganisaatio (IEC), kansainvälinen standardointiorganisaatio (ISO), Eurooppalainen standardointijärjestö (CEN) ja Yhdysvaltain telehallintovirasto (FCC), kehittävät ja julkaisevat EMC-standardveja. Euroopan unionin laki määrittelee myös, että sen alueella myytävien tai sinne tuotujen laitteiden tulee toimia luotettavasti ulkoisista häiriöistä huolimatta ja laitteiden ei tule itse toimia häiriönlähteenä. [22]

Tämän työn puitteissa EMI-suojaukseen ei perehdytty kuin pintapuolisesti, sillä aihe on laaja käsiteltäväksi sellaisenaan tämän työn puitteissa. Aihe on kuitenkin tärkeä osa kaupallisia tuotteita ja laitteen toiminnan kannalta tärkeä asia tiedostaa. Työn aikana pohdittiin laitteeseen liittyviä sähkömagneettisia häiriöitä ja merkittävimmät näistä olivat mahdolliset ulkoiset häiriöt, sillä laite sijoitetaan todennäköisesti suurivirtaisten kaapeleiden ja laitteiden läheisyyteen. Laitteen häiriöherkimmät alueet ovat jännitteen- ja virranmittauspiirit ja niiden suojaukseen tulee kiinnittää huomiota laitteen jatkokehityksessä.

3.5 Valitut komponentit

Laitteen komponentteja valittaessa merkittävimmät valintakriteerit olivat hinta, saatavuus sekä pakkaustyyppi, sillä ladonta ja juottaminen tehdään käsin. Laitteen ladontapiirustuksia piirtäessä tutkittiin myös samalla saatavilla olevia kaupallisia koteloita, jotka täyttivät koteloinnissa ilmenneet vaatimukset ja joihin kaikki tarvittavat komponentit mahtuivat. Koteloksi valittiin muovinen Hammondin valmistama RZ0311C-kotelo. Kotelon materiaaliksi valittiin muoviseos, sillä kommunikointipiirissä ei ole liitääntää ulkoiselle antennille ja metallinen kotelo estäisi tiedonsiirtoon tarvittavien sähkömagneettisten signaalien kulun.

Virran mittaukseen valittiin kaksi erillistä piiriä, joiden mittaustuloksia vertailemalla voidaan valita parempi vaihtoehto tuotteen seuraaviin versioihin. Yksi mittauspiireistä koostuu INA240A2-vahvistimesta ja ADS1015-muuntimesta, mitkä valittiin, koska niitä oli jo valmiiksi hankittuna muihin projekteihin. Toinen mittauspiiri koostuu INA237-tehonmittaus-piiristä ja se valittiin, sillä se sisältää vahvistimen, AD-muuntimen sekä tehon laskentaan tarvittavat elementit samassa paketissa [23]. Lisäksi piiriä oli hyvin saatavilla tarkasteluhetkellä.

Käyttöjännitteen regulointiin valittiin Tracon valmistama TSR 1-2433 -hakkuriregulaattori, joka sallii laajan käyttöjännitealueen ja omaa huomattavasti paremman hyötysuhteen, kuin esimerkiksi yleisimmät lineaariregulaattorit [24]. Tracon rinnalle päätettiin toteuttaa kokeilumielessä erillinen hakkuripiiri käyttäen kytkentäpiirinä MC33063A:ta.

4. LAITTEEN RAKENNUKSEN

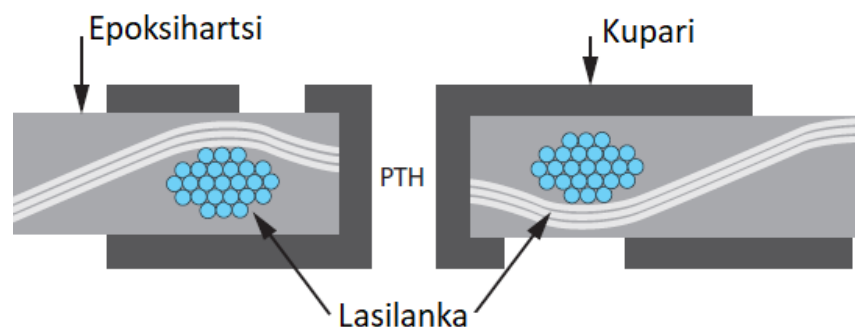
Laitteen saattaminen toimintakuntoon koostuu pääpiirteittäin viidestä osa-alueesta: piirikaavion suunnittelu, piirilevyn suunnittelu, piirilevyn valmistus, komponenttien tilaus ja juottaminen sekä ohjelmointi. Näiden lisäksi prosessiin kuuluu olennaisesti testaus, jota käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

4.1 Piirilevy

Piirilevyt koostuvat yhdestä tai useammasta metallikalvosta sekä näitä eristävästä ja tukevasta väliainekerroksesta. Piirilevyn tarkoituksena on tarjota komponenteille mekaaninen kiinnitysalusta ja johdinreitit niiden välille. [25]

Välikerrosten materiaalit voidaan pääsääntöisesti jakaa kahteen ryhmään: orgaaniset ja epäorgaaniset väliaineet. Orgaanisiin lukeutuvat muun muassa paperi, lasikudos, epoksi, polyesteri ja joustavat väliaineet. Epäorgaanisiin puolestaan metallit, keramiikka, lasit, pii ja timantti. Väliaineen valinnalla voidaan vaikuttaa piirilevyn sähköisiin, mekaanisiin ja termisiin ominaisuuksiin. [25]

Yleisin piirilevyissä käytetty väliaine on FR4-lasikuituepoksi, sillä se tarjoaa hyvän tarttuvuuden metallikerrokselle, lämmönkestävyyden, kosteudensietokyvyn ja se ei laajene merkittävästi lämpötilan muuttuessa. Nimessä esiintyvä FR tarkoittaa tulenkestävyyttä (engl. flame retardancy) ja se saavutetaan seostamalla käytettyyn epoksiahartsiin bromia. Kuvassa 4.1 on esiteltynä piirilevyn läpileikkaus, josta nähdään, kuinka lasilangat sijoittuvat hartsiin limittäin lujittaen sen rakennetta. Kuvan keskellä on myös merkintä PTH, joka tarkoittaa pinnoitettua läpivientä (engl. plated through hole). [25]



Kuva 4.1. FR4-levyn läpileikkaus (muokattu lähteestä [25])

Väliainekerroksien lisäksi piirilevyssä on yksi tai useampi kuvioitu metallikerros, joka on tyypillisesti kuparia. Teollisessa tuotannossa kuparikerroksen luomiseen käytetään lähtökohtaisesti kahta eri prosessia. Toinen prosesseista on lisäysprosessi, jossa tarvittavat kuviot lisätään väliainekerroksen päälle. Toinen on poistoprosessi, jossa koko levy pinnoitetaan ensiksi kuparilla ja tämän jälkeen ylimääräiset kuparoinnit poistetaan. Lisäysprosessissa alueet, joita ei haluta kuparoida pinnoitetaan fotoresistillä, joka estää kuparin tarttumisen pinnalle. Kuparointi tapahtuu tyypillisesti elektrolyysillä, jonka jälkeen fotoresisti poistetaan. Poistoprosessissa työvaiheet ovat käänteiset. Siinä kuparilla pinnoitetun levyn päälle levitetään fotoresisti haluttujen kuvioiden kohdalle. Paljas kupari poistetaan syövyttämällä ja jäljelle jääneiltä kuparialueilta poistetaan fotoresisti. [25]

4.1.1 Suunnittelu

Piirilevyn valmistusprosessi aloitetaan aina piirikaavion suunnittelulla. Piirikaaviossa määritellään piirilevylle tulevat komponentit sekä niiden väliset yhteydet. Piirustusohjelmalle valitaan tarvittavat komponentit, määritellään niiden mahdolliset arvot sekä kytketään ne toisiinsa tai käyttöjännitteisiin. Kun tarvittavat komponentit on lisätty piirikaavioon ja niiden välille on luotu yhteys johtimilla, tulee luoda listaus, josta selviää kunkin komponentin tyyppi ja jalkojen kohdesolmupiste. Solmupiste kertoo, mitkä juotosalustat ovat yhteydessä toisiinsa. Tämän jälkeen listaus välitetään piirilevyn piirto-ohjelmaan, jossa yhteydet piirretään johdinvetoina kuparille.

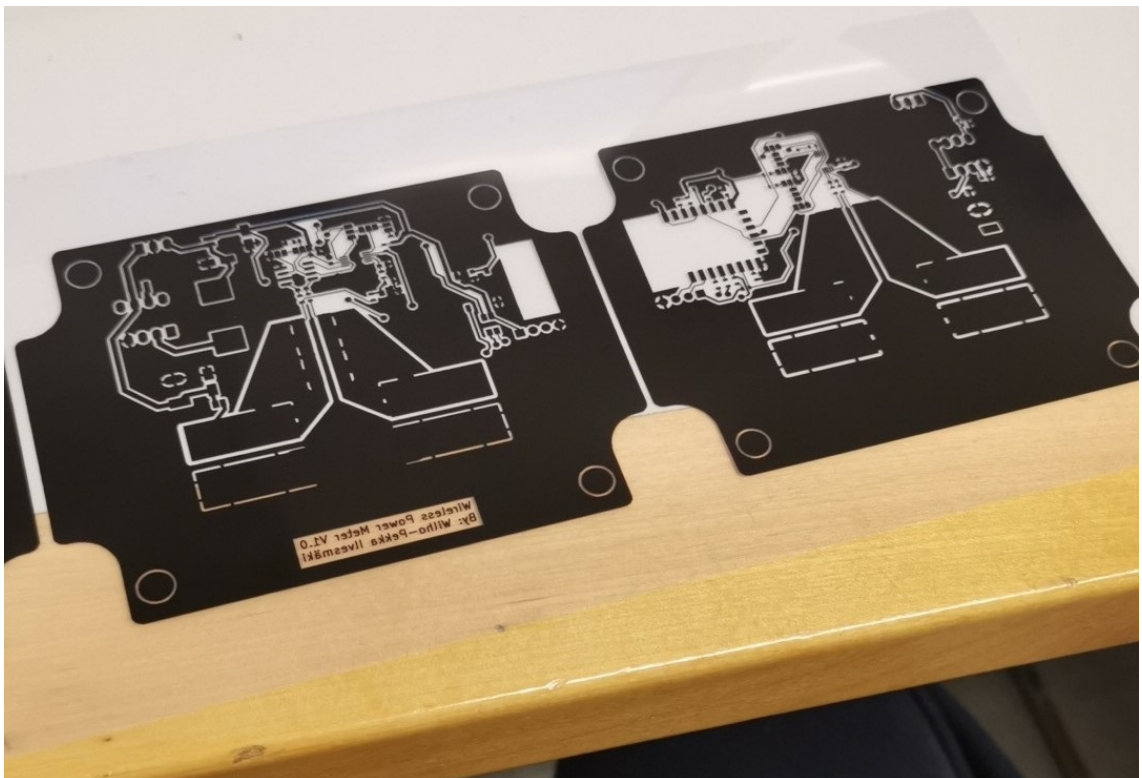
Piirilevyn suunnittelu tapahtuu tyypillisesti elektronisilla suunnitteluohjelmistoilla (engl. electronic design automation, EDA tai electronic computer-aided design, ECAD). Ohjelmistojen kirjastot sisältävät runsaasti eri komponenttityyppien footprinttejä, jotka määrittelevät silkkikerrokseen tulevat komponenttien ääriviivat ja merkinnät sekä jalkojen alle tulevat kuparialueet ja mahdolliset läpiviennit jaloille. Komponentteja kuvaavat footprintit yhdistetään toisiinsa johdinvetoilla, joiden leveydet ovat määriteltävissä. Mikäli piirilevyssä on useampi kuparitaso, voi johdinveto sijoittua useammalle kerrokselle ja tällöin kerrosten vaihdos tapahtuu läpivientien eli viojen avulla.

Tässä työssä käytettiin suunnittelussa Kicad:ia, joka on avoimen lähdekoodin ohjelmisto. Valittujen komponenttien saatavuudet tarkistettiin jälleenmyyjiltä ja niiden kotelotyyppi varmistettiin vastaamaan suunnitelman footprinttiä. Kicad sisälsi kaikkien komponenttien footprintit riviliitintä lukuunottamatta. Riviliittimen footprint luotiin itse käyttäen apuna ohjelman footprint-editoria sekä valmistajan datalehteä.

Piirikaavion ääriviivat piirretään samalla ohjelmalla ja niitä määrittelee usein kotelon mitat. Kotelon mittapirokset saatiin ladattua kotelovalmistajan sivuilta dxf-vektorigrafiikkana. Mittapiirroksista valittiin kotelon sisäpuoliset ääriviivat ja ne skaalattiin 1 mm pienemmiksi, jotta piirilevy mahtuu varmasti sisälle.

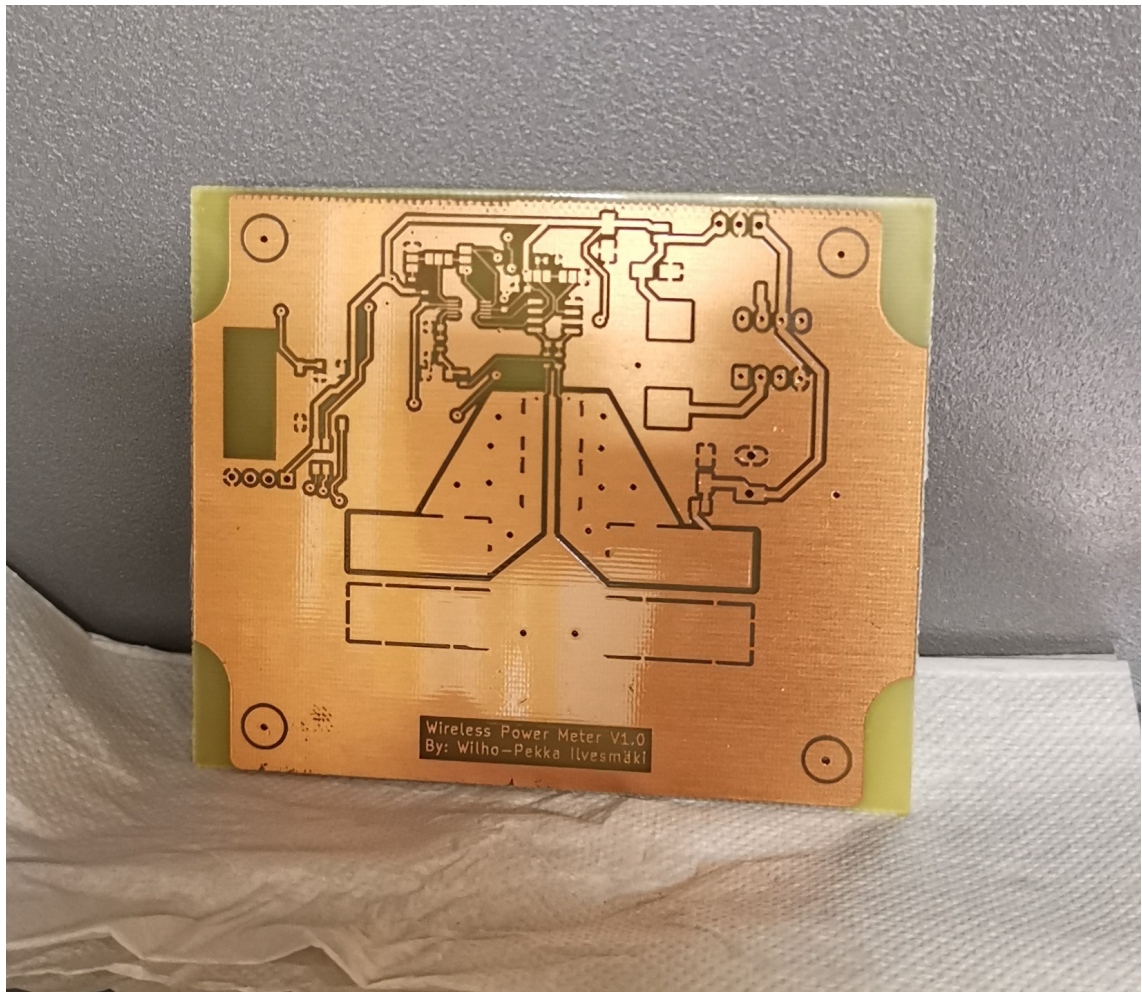
4.1.2 Piirilevyn valmistus

Piirilevyn valmistus aloitetaan johdinkuvioiden tulostamisella kalvolle mustesuihku- tai lasersuostimella. Tähän työhön tulostetut kalvot löytyvät kuvasta 4.2. Kaksikerrospiirilevystä ylä- ja alakerroksen kalvot kohdistetaan ja kiinnitetään toisiinsa esimerkiksi teipillä. Näin varmistetaan, että läpiviennit ja ääriviivat osuvat kohdikkain valmiissa levyssä. Seuraavaksi kaksipuoleisen levyn kuparipinnat puhdistetaan ja pinnoille suihkutetaan valoherkkä lakka. Mikäli lakka on asetettu tehtaalla valmiiksi, poistetaan tällöin lakkaa suojaava kalvo piirilevyltä. Tämän jälkeen mittaan leikattu piirilevy asetetaan kalvojen väliin ja sitä valotetaan ultraviolettivalossa lakan aktivoimiseksi.



Kuva 4.2. Työssä käytetyt valotuskalvot

Kehitysvaiheessa valottunut lakka poistetaan kehiteliuoksessa. Kehiteliuoksena käytetään tyypillisesti natriumhydroksidi- eli lipeäliuosta. Kehiteliuos irroittaa valottuneen lakan ja tämän jälkeen voidaan toteuttaa kuviointi etsaamalla. Etsauksessa paljastuneet kuparipinnat syövytetään happoliuoksella, jolloin halutut kuvioinnit jäävät piirilevyn pinnalle. Happoliuoksena voidaan käyttää esimerkiksi ferrikloridiliuosta tai suolahappo-, vesi- ja vetyperoksidiseosta. Syövytyksen jälkeen loput lakat poistetaan asetonilla ja piirilevyn kuparikuviointeille suihkutetaan juoteaktiivista suojalakkaa suojaamaan kuparia hapettumiselta. Tässä vaiheessa piirilevyltä puuttuvat ainoastaan läpivientien poraukset, kuten kuvasta 4.3 huomataan. Suojalakan kuivuttua piirilevyn porataan tarvittavat läpiviennit porauskartan mukaisesti ja tämän jälkeen voidaan aloittaa komponenttien juottaminen.



Kuva 4.3. Valmis, poraamaton piirilevy

Prototyypilevyä käsin juottaessa, kannattaa aloittaa juottaminen pienistä pintaliitoskomponenteista ja lopuksi juottaa isot sekä läpiladottavat komponentit. Tällöin levy voidaan pitää tasaisesti pöydällä, eivätkä isot pintaliitoskomponentit ole tiellä. Juottamisen apuna on hyvä käyttää flukseja, eli juoksuotteita, joiden avulla lämpö saadaan siirtymään tehokkaammin, estetään hapettuminen ja alennetaan juotteen pintajännitystä. Juottamisen jälkeen tulee levy puhdistaa juoksuotteesta ja muista epäpuhtauksista isopropyylialkoholilla.

4.2 Ohjelmointi

Mikrokontrolleri vaatii sisälleen ohjelmakoodin toimiakseen ja kommunikoidakseen muiden oheispiirien kanssa. Ohjelmakoodi päätettiin kirjoittaa käyttämällä Visual Studio Coden tuotantoympäristöä ja Platformio-lisäosaa hyödyntäen. Laitteen ohjelmointi jakaantui kahteen osaan: mikrokontrollerin ohjelmointiin sekä serverin ohjelmointiin.

Mikrokontrollerin ohjelmoinnissa käytettiin apuna valmiita ohjelmakirjastoja. Tehonmittauspiireistä ADS1015:stä löytyi valmis avoimen lähdekoodin kirjasto, mutta INA237:lle täytyi kirjoittaa uusi ohjelmakirjasto, koska sille ei löytynyt valmista avointa kirjastoa. Kir-

jastot sisältävät vaadittavat funktiot piirien alustukseen ja datarekistereiden lukemiseen. Molemmat tehonmittauspiirit sisälsivät myös hälytyspinnan, joka asetettiin kytkeytymään aktiiviseksi, kun tarvittavat analogiamuunnokset olivat valmiita. Näin toimiessa mikrokontrollerilla jää aikaa muuhun laskentaan ja datarekisterit voidaan lukea vasta silloin, kun mittaustulokset ovat valmiina ja mikrokontrollerilla ei ole muuta toimintoa suoritettavana. Mikrokontrollerin valmistaja tarjoaa kattavan HAL-rajapinnan (engl. Hardware Abstraction Layer), jonka avulla kommunikointi langattoman lähiverkon yli onnistuu helposti pienellä koodimäärällä.

Ohjelmakoodin toiminnallisuus toteutettiin siten, että mitatut jännite-, virta- ja tehoarvot haetaan silloin, kun niistä vastaavat piirit ovat suorittaneet muutokset ja hälyttäneet mikrokontrolleria keskeytyksellä. Mitattujen arvojen päivitystaajuus riippuu muuntimiin asetetuista muunnosajoista ja esimerkiksi mitatessa pelkästään virtaa ja jännitettä INA237:llä pienimmillä muunnosajoilla, voidaan teoreettisesti saavuttaa 10 kHz päivitystaajuus [23]. Mitatut arvot lasketaan yhteen ja lasketaan sen keskiarvo sekunnin välein, jolloin yksiköksi saadaan wattisekunti. Mitatut ja keskiarvoistetut arvot lähetetään edelleen serverille, sillä mikrokontrollerin muisti on erittäin rajallinen.

Suuren datamäärän takia datan lopullinen tallennus päätettiin toteuttaa erilliselle paikalliselle serverille, joka on kytkettynä samaan lähiverkkoon mikrokontrollerin kanssa. Serveriohjelmiston monimutkaisuus päätettiin pitää mahdollisimman pienenä, jotta kandidaatintyön laajuus pysyisi kohtuullisena. Tämän johdosta serverin ohjelmisto kirjoitettiin Pythonilla käyttäen SQLiteä tiedon tallentamiseen. Kirjoitettu ohjelmakoodi tarkastelee määriteltyä TCP-porttia ja tallentaa saapuvan datan SQLitellä luotuun tietokantaan. Laitteen testaamista varten kytkettiin Raspberry Pi -pienoistietokone serveriohjelmistolla varustettuna samaan lähiverkkoon mikrokontrollerin kanssa ja tutkittiin tietokannan sisältöä laitetta testatessa.

5. LAITTEEN TESTAUS

Sulautetun järjestelmän käyttöönotto ja testaus on hyvin usein iteratiivinen prosessi. Ohjelmistokehitys ja sen testaus kulkevat rinnakkain läpi tuotekehityksen. Sovellukseen ja piirikaaviosuunnitelmiin eksyneet virheet aiheuttavat testaukseen virheenjäljityksiä eli debuggauksia. Debuggausten avulla virheet löydetään ja korjataan ja ne tehdään ensiksi laitteistoon väliaikaisin ratkaisuin ja myöhemmin uudemmista tuotantoversioissa virheet on korjattu itse piirilevylle. Tämäkin työ noudatti tätä hyvin tyyppillistä toimintamallia tuotetta testatessa.

5.1 Vianetsintä

Tämän työn ensimmäistä piirilevyä testatessa ilmeni ohjelmoinnin ja jännitteen reguloinnin kanssa ongelmia. MC33063A:na käytetty kytkentäpiiri antoi kuormitettuna ulostulojännitteeksi hieman alle 2 voltia, mikä on liian vähän mikrokontrollerille sekä oheispiireille. Myös ilman kuormitusta ulostulon jännite oli $3,3 \pm 1$ V, mikä olisi ollut liian epävakaata etenkin mittaussiireille. Vikojen selvittämiseksi kaikki juotokset käytiin läpi tarkkaan ja kuparialueiden sekä johdinreittien välykset tarkistettiin mikroskoopilla sekä johtavuustesterillä. Kun edellä suoritettut toimenpiteet eivät korjanneet käyttöjännitteen ongelmia, päätettiin hakkuripiiri ohittaa ja syöttää 3,3 voltin käyttöjännite ulkoisesti. Tämän jälkeen yritettiin uudelleen mikrokontrollerin ohjelmointia, mutta kontrolleri ei tunnistamattomasta syystä vastannut tietokoneen ohjelmointiyhteyksiin. Vikojen epäiltiin johtuvan oikosuluista, jotka syntyivät juotteenestopinnoitteen puutteen vuoksi, jolloin päätettiin tilata uudet teollisesti valmistetut piirilevyt virhelähteiden minimoimiseksi.

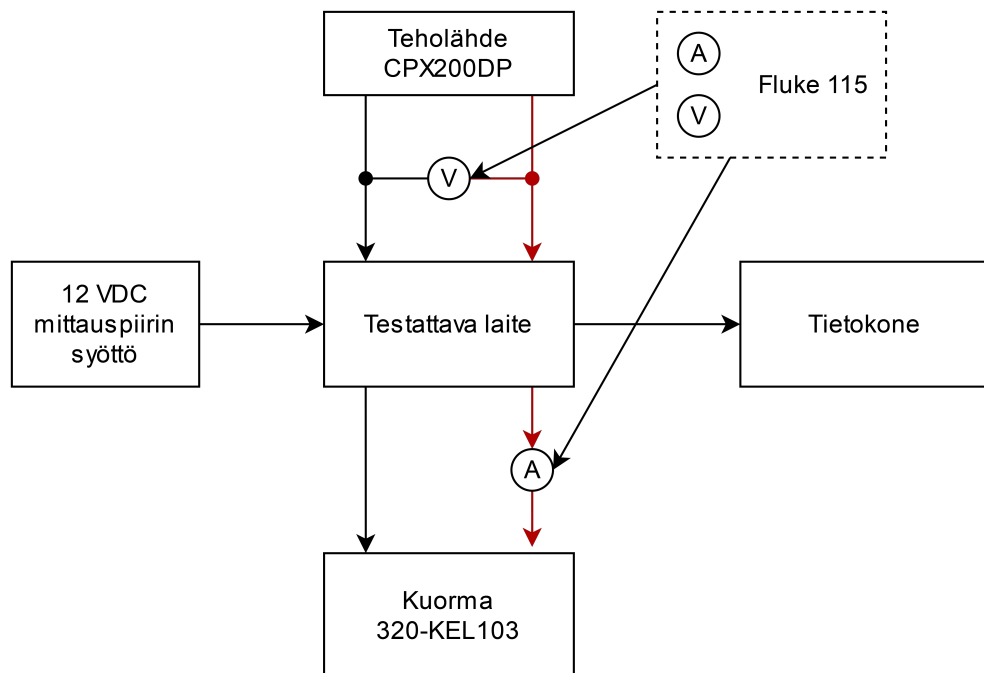
Uusien piirilevyjen saapuessa juotettiin yhteen testilevyyn kaikki komponentit uudelleen. MC33063A-hakkuripiiriä testattiin ilman muita oheiskomponentteja ja vastaavantyyppiset ongelmat olivat vieläkin läsnä, joten piirin tilalle päätettiin vaihtaa korvaava TSR 1-2433 -hakkuriregulaattori, joka toimi ongelmitta. Loputkin komponentit juotettiin paikalleen ja laitteeseen ladattiin testikoodi, joka myös toimi ongelmitta.

Laitteen sovellusta kehittäessä törmättiin vielä muutamaan suurempaan ongelmakohtaan. Molempien mittauspiirien hälytyspinnit aiheuttivat ohjelman kaatumisia, mikä ilmeni kontrollerin uudelleenkäynnistymisenä. Mikrokontrollerin datalehteä syvemmin tutkivalta selvisi, että kyseisiä pinnejä käytetään myös ohjelmamuistin dataväylässä. Ongelma

saatiin poistettua reitittämällä hälytyspinneille uudet vedot vapaisiin pinneihin käyttämällä hyppylankoja ja mekaanisesti katkaisemalla vanhat johdinvedot veitsen avulla.

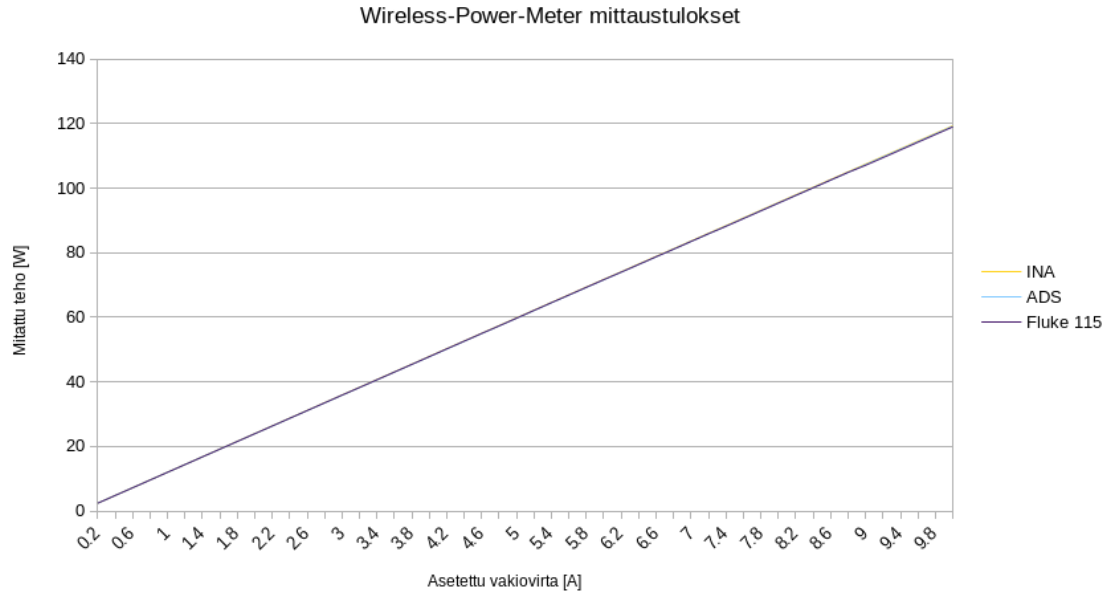
5.2 Mittaukset

Mittaukset suoritettiin käyttäen teholähteenä Tampereen yliopiston juotoslaboratoriossa ollutta Aim-TTi:n CPX200DP -teholähdettä sekä kuormana RND:n 320-KEL103 säädettävää elektronista tasavirtakuormaa. Vertailumittaukset mitattiin sekä jännitteen että virran osalta Fluke 115-yleismittarilla. Pelkistetty mittausjärjestely on esitetty kuvassa 5.1. Mikrokontrollerilla mitatut jännite ja virta-arvot lähetettiin tietokoneelle pystytetylle serverille, josta tulokset luettiin kymmenen mittauksen keskiarvona häiriöiden minimoimiseksi. Tulokset taulukoitiin ja kontrollerilla mitattuja arvoja vertailtiin yleismittareilla mitattuihin arvoihin. Mittaustuloksista laskettiin virheprosenttien maksimi-, minimi- ja keskiarvot.



Kuva 5.1. Yksinkertaistettu kaaviokuva mittausjärjestelystä

Mittaukset toteutettiin 12 voltin syöttöjännitteellä sekä mittauksen virta-alue pidettiin 0–10 A välillä, koska tehonlähteen maksimi lähtövirta oli 10 A. Säädettävä kuorma asetettiin vakiovirtakuormitukselle ja mittaukset aloitettiin asettamalla virraksi 0.2 A ja jatkettiin 0.2 A pykälissä 10 A saakka. Näillä mittausparametreilla saatiin mitattua teho 0–120 W välillä. Mittaustulokset löytyvät liitteestä A ja näiden tuloksien pohjalta luotiin viivadiagrammi, jonka avulla pyrittiin havainnollistamaan piirien eroavaisuuksia. Fluke 115 -mittareilla mitatut jännite- ja virta-arvot kerrottiin keskenään kuvaajassa esiintyvän tehon määrittämiseksi.



Kuva 5.2. Mitatut tehot vakiovirran suhteen

Kuvaa 5.2 tarkasteltaessa huomataan, että mittausten erot ovat liian pieniä huomataksaan eroa graafisesti. Tulosten vertailun helpottamiseksi laskettiin lisäksi jokaiselle mittauspisteelle virheprosentti kaavalla

$$e\% = \frac{R - M}{R} * 100\%, \quad (5.1)$$

missä R on referenssimittaus ja M on tarkasteltava mittaus. Näistä virheprosentista laskettiin keskiarvo, minimi ja maksimi molemmille mittauspiireille ja tulokset taulukoitiin. Taulukon 5.1 tuloksista voidaan päätellä, että virheprosentit ovat molemmissa mittauspiireissä hyvinkin pieniä ja ADS1015-piirissä virheen keskiarvo on yli puolet pienempi.

	INA	ADS
keskiarvo	0.172 %	0.065 %
minimi	0.060 %	0.001 %
maksimi	0.560 %	0.360 %

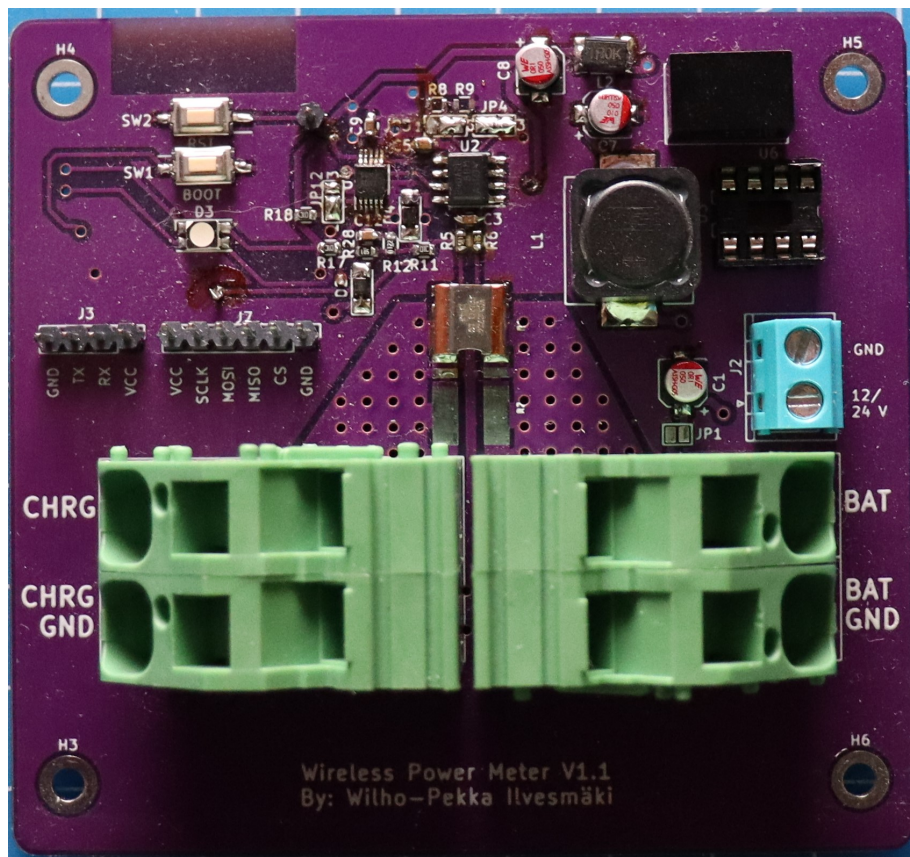
Taulukko 5.1. Mittausvirheprosentit

Mittausten aikana huomattiin, että INA-piirin mittausdata loppui päivittymästä satunnaisesti kesken mittausten. Laitteen uudelleenkäynnistäminen palautti piirin takaisin toimintaan. Piirin datalehteä tutkimalla huomattiin, että hälytyspinnä käytetään myös laitteen diagnostiikkaan. Piiri voi kytkeä hälytyspinnin aktiiviseksi esimerkiksi tehorekisterin ylivuodosta tai mikäli asetettu teho-, virta-, jännite- tai lämpötilaraja ylittyy tai alittuu. Nämä vikatilat pitävät pinnin aktiivisena, kunnes vika poistuu. Näiden diagnostiikkailmoitusten

käsittelyjä ei oltu toteutettu ohjelmakoodiin tämän työn puitteissa, mutta ovat välttämättömiä laitteen jatkokehityksessä vakaan toiminnan takaamiseksi.

6. YHTEENVETO

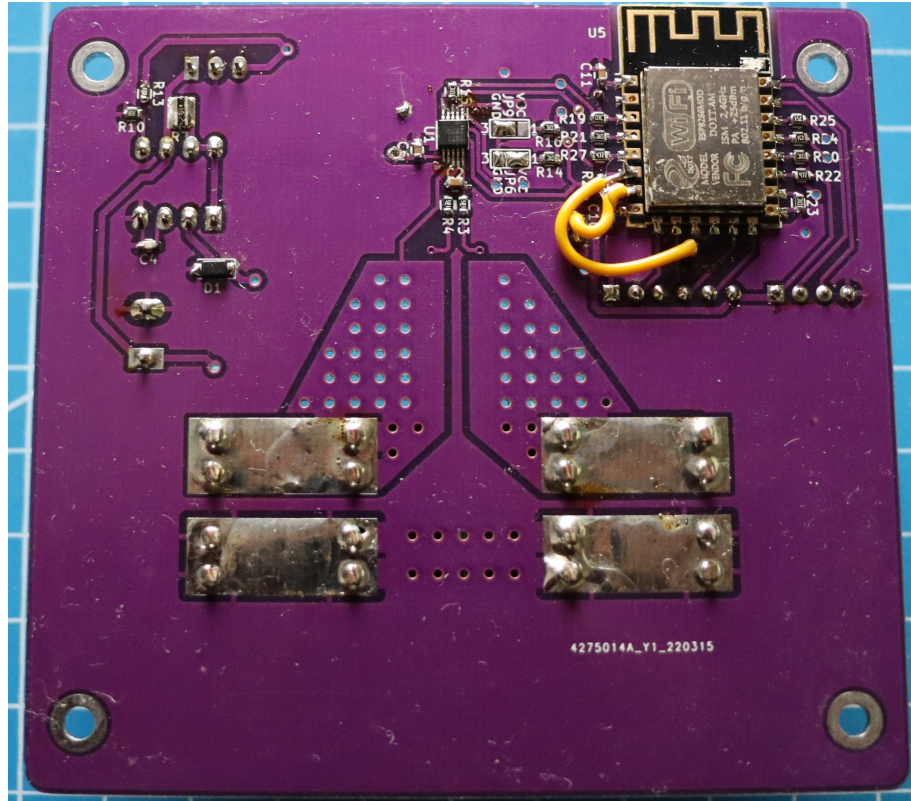
Kandidaatintyön pääasiallisena tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa aurinkovoimalan lataustehon mittauspiiri. Työssä perehdyttiin jännitteen- ja virranmittaustekniikoihin, piirilevyn valmistukseen sekä mikrokontrollerijärjestelmän ohjelmointiin. Työn aikana koettiin muutamia vastoinkäymisiä, joista merkittävimmät olivat koepiirilevyllä ilmenneet ongelmat ja mittauspiirien hälytyspinnien reititysongelmat. Ongelmat saatiin kuitenkin ratkaistua ja lopputuloksena on toimiva mittauspiiri sekä laitteiston toimintaan liittyvät ohjelmakoodit. Laitteen kaikkia luvussa 3 esitettyjä vaatimuksia ei voitu mittauksin todentaa tämän kandidaatintyön puitteissa aikataulukiiireiden ja puuttuneiden mittalaitteiden takia.



Kuva 6.1. Valmiin piirilevyn yläpuoli

Mittaustuloksia tutkimalla huomattiin, että mittalaitteet antavat luotettavan ja tarkan tuloksen mitatusta tehosta ja näin työtä voidaan pitää onnistuneena. Laitteen lopulliseen

versioon on päätetty laittaa INA237-tehonmittauspiiri, sillä se tarjoaa laajan mitattavan jännitealueen ja tarvittavien oheiskomponenttien määrä on merkittävästi paljon pienempi kuin ADS1015:n kanssa. Kuten kuvasta 6.2 huomataan on INA237:n tarvitsema pinta-ala murto-osa verrattuna ADS1015:n ja sen oheiskomponenttien vaatimaan pinta-alaan, mikä on nähtävissä kuvassa 6.1. Lisäksi myös piirin hinta oheiskomponentteineen on huomattavasti pienempi ADS1015:n verrattuna.



Kuva 6.2. Valmiin piirilevyn alapuoli

Seuraavaksi laite on tarkoitus testata lopullisessa ympäristössään. Tämän pidempiaikaisemman testausjakson aikana mahdollisesti ilmenneet ongelmat on tarkoitus ottaa huomioon laitteen päivitettyä versiota suunniteltaessa ja rakentaessa. Myös laitteessa ilmenneet reititysongelmat, joiden hyppylangoon korjatut vedot ovat nähtävissä kuvassa 6.2, voidaan poistaa seuraavassa versiossa.

LÄHTEET

- [1] Popkostova, Y. *Europe's energy crisis conundrum*. EUISS. 28. tammikuuta 2022. URL: <https://www.iss.europa.eu/content/europes-energy-crisis-conundrum> (viitattu 15.02.2023).
- [2] *Communication from the Commission*. The European Green Deal. European Commission. 11. joulukuuta 2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2019:640:FIN> (viitattu 30.03.2023).
- [3] *'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*. European Commission. 14. heinäkuuta 2021. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550> (viitattu 15.02.2023).
- [4] *Renewable energy on the rise: 37% of EU's electricity*. Eurostat. Tammikuu 2022. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220126-1> (viitattu 15.02.2023).
- [5] *Opas sähkön pientuottajalle*. Motiva Oy. 2012. URL: https://www.motiva.fi/files/5724/Opas_sahkon_pientuottajalle_2012.pdf (viitattu 15.02.2023).
- [6] Beaty, H. W. ja Fink, D. G. *Standard handbook for electrical engineers*. 16. painos. McGraw-Hill's AccessEngineering. New York: McGraw-Hill, 2013. ISBN: 0071762329.
- [7] Hart, D. W. *Power electronics*. New York: McGraw-Hill, 2011. 477 s. ISBN: 978-007-128930-6.
- [8] Diniz, P. S. R. *Digital signal processing : system analysis and design*. 2. painos. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 889 s. ISBN: 9780521887755.
- [9] *Understanding Flash ADCs*. Maxim Integrated. 2014. URL: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/8/810.html> (viitattu 30.03.2023).
- [10] *Tutorial on Successive Approximation Registers (SAR) and Flash ADCs*. Maxim Integrated. 2. lokakuuta 2001. URL: <https://www.stg-maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/1/1080.html> (viitattu 30.11.2021).
- [11] *Analog to Digital Converters - ADC*. Mouser Electronics. URL: <https://eu.mouser.com/c/semiconductors/integrated-circuits-ics/data-converter-ics/analog-to-digital-converters-adc/> (viitattu 25.11.2021).
- [12] Ziegler, S., Woodward, R., Lu, H.-C. ja Borle, L. Current Sensing Techniques: A Review. *IEEE sensors journal* 9.4 (2009), s. 354–376. ISSN: 1530-437X.

- [13] *SmartSolar Charge Controllers MPPT 100/30 & 100/50*. Victron energy. URL: <https://www.victronenergy.fi/upload/documents/Datasheet-SmartSolar-charge-controller-MPPT-100-30-&-100-50-EN.pdf> (viitattu 26.11.2021).
- [14] Crompton, T. R. ja Crompton, T. P. J. *Battery Reference Book*. 3. painos. Jordan Hill: Elsevier, 2000. ISBN: 9780750646253.
- [15] *Sääennätyksiä*. Ilmatieteen laitos. URL: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/saaennatyksia> (viitattu 28.10.2021).
- [16] Davies, J. H. *MSP430 microcontroller basics*. Oxford: Newnes, 2008. ISBN: 1-281-79599-2.
- [17] *ESP8266EX Datasheet*. Versio 6.6. Espressif. Lokakuu 2020. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf (viitattu 28.10.2021).
- [18] *ESP-12E WiFi Module*. Versio 1.0. AI-Thinker. 2015. URL: https://docs.ai-thinker.com/_media/esp8266/docs/esp12e_datasheet.pdf (viitattu 27.11.2021).
- [19] Storey, N. *Electronics: A Systems Approach*. Harlow: Pearson Education, Limited, 2017. ISBN: 1292114061.
- [20] *IP ratings*. IEC. URL: <https://www.iec.ch/ip-ratings> (viitattu 01.02.2023).
- [21] *Road vehicles — Degrees of protection (IP code) — Protection of electrical equipment against foreign objects, water and access*. Standard. Geneva, CH: International Organization for Standardization, helmikuu 2013.
- [22] Ott, H. W. *Electromagnetic compatibility engineering*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2009. ISBN: 1-118-21065-4.
- [23] *INA237 85-V, 16-Bit, Precision Power Monitor With I2C Interface (Rev. A)*. Texas Instruments. 2022. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina237.pdf> (viitattu 31.05.2022).
- [24] *Non-Isolated DC/DC Converter (POL)*. Traco Power. 30. marraskuuta 2022. URL: https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/tsr1_datasheet.pdf (viitattu 30.03.2023).
- [25] Jin, Y. *Introduction to microsystem packaging technology*. 1. painos. Boca Raton: Taylor & Francis, 2011. ISBN: 1-138-37425-3.

LIITE A: MITTAUSPÖYTÄKIRJA

Mittauspäivämäärä: 17/03/2023

Vakiovirta [A]	INA			ADS			Fluke 115	
	Jännite [V]	Virta [A]	Teho [W]	Jännite [V]	Virta [A]	Teho [W]	Jännite [V]	Virta [A]
0.2	12.005146788	0.2029051454	2.4355449676	12.013175964	0.2023367286	2.4307068826	11.99	0.202
0.4	12.004011344	0.4029405236	4.8365851404	12.01202221	0.401719904	4.8254685402	11.99	0.402
0.6	12.003313256	0.601994109	7.2251445772	12.011683084	0.6003556132	7.2112815856	11.99	0.601
0.8	12.00232849	0.8019090772	9.6244314192	12.01077671	0.799985552	9.6084482192	11.99	0.801
1.0	12.001425744	1.0016818524	12.020415498	12.009729384	0.9991916658	12.000021936	11.99	1.001
1.2	12.00056324	1.2006787776	14.407162284	12.009182928	1.197982621	14.386792754	11.99	1.200
1.4	11.999477004	1.400642419	16.805909346	12.008284378	1.397409439	16.78048973	11.99	1.400
1.6	11.999036216	1.6003434894	19.202638628	12.007738684	1.5964515446	19.169772718	11.98	1.600
1.8	11.998115158	1.7998958828	21.594748688	12.006859972	1.795797229	21.561885832	11.98	1.800
2.0	11.997057916	1.9995621444	23.988628386	12.005974006	1.9946902274	23.948199082	11.98	2.000
2.2	11.996248816	2.1989483354	26.37860756	12.00516319	2.1936985492	26.335710526	11.98	2.199
2.4	11.995190812	2.3980126856	28.764312744	12.004014588	2.392394972	28.718344496	11.98	2.399
2.6	11.994605256	2.5975001336	31.154604722	12.003701592	2.5911396028	31.103266528	11.98	2.598
2.8	11.993545722	2.7969456196	33.544109344	12.00255661	2.7901962758	33.489488982	11.98	2.798
3.0	11.992685316	2.9967203618	35.937693786	12.001901244	2.9894994734	35.879677582	11.98	2.998
3.2	11.99208355	3.196321106	38.330406186	12.001487922	3.1885706424	38.267591858	11.97	3.198
3.4	11.991529846	3.396126461	40.724295044	12.000919722	3.387757969	40.656211088	11.97	3.398
3.6	11.990278436	3.5955915928	43.110578156	11.999942016	3.58674922	43.040782168	11.97	3.597
3.8	11.989681244	3.7951358316	45.502001952	11.999343298	3.7860090734	45.429623414	11.97	3.797
4.0	11.988834762	3.9948884488	47.894086456	11.99866352	3.9849364282	47.813911438	11.97	3.997
4.2	11.988292312	4.194343662	50.283080292	11.99804859	4.1842238424	50.202521516	11.97	4.197
4.4	11.987092592	4.3937669756	52.667749024	11.997020722	4.383129692	52.584496308	11.97	4.397
4.6	11.98644371	4.593691063	55.060892486	11.996644976	4.5822919846	54.972132112	11.97	4.597
4.8	11.985300636	4.7932245256	57.448310088	11.995521926	4.7814443588	57.355920408	11.96	4.797
5.0	11.984360888	4.9926613808	59.832918546	11.994566154	4.9804575922	59.73842697	11.96	4.996
5.2	11.983881378	5.1929935454	62.231394958	11.994337272	5.1802762986	62.133982088	11.96	5.197
5.4	11.98315525	5.3926949502	64.619766234	11.993439484	5.3796085358	64.52000885	11.96	5.397
5.6	11.982065774	5.592377281	67.007028196	11.992585564	5.5787522316	66.903662112	11.96	5.597
5.8	11.981286812	5.792175293	69.396185306	11.992017936	5.777903366	69.288719176	11.96	5.797
6.0	11.980267524	5.9909146308	71.770837404	11.99099674	5.9764591218	71.66369934	11.96	5.996
6.2	11.979312896	6.189589119	74.146650694	11.99021702	6.1745869636	74.034637452	11.95	6.195
6.4	11.97848606	6.3888516426	76.528086852	11.98952999	6.3730701446	76.410116578	11.95	6.394
6.6	11.977625466	6.587991047	78.907522584	11.988697242	6.571763897	78.786888122	11.95	6.594
6.8	11.97700653	6.7871595382	81.287994384	11.988341142	6.7704504964	81.16646881	11.95	6.79
7.0	11.97616081	6.9870556832	83.67679901	11.987487794	6.969748497	83.549771116	11.95	6.99
7.2	11.97483902	7.1867845538	86.060438538	11.986289978	7.1689047814	85.928572082	11.95	7.19
7.4	11.973900794	7.3860774994	88.43860321	11.98521118	7.3674533844	88.30048828	11.94	7.39
7.6	11.973085022	7.5860669136	90.827426146	11.984889794	7.567039871	90.69013977	11.94	7.59
7.8	11.972101404	7.7857583998	93.211106872	11.98395195	7.7662558554	93.070437622	11.94	7.79
8.0	11.971305466	7.985775566	95.598242188	11.982948872	7.9655231476	95.450463866	11.94	7.99
8.2	11.970248604	8.1849433898	97.97378235	11.981879044	8.1643913268	97.82474823	11.94	8.19
8.4	11.969568826	8.3845518114	100.35775604	11.981583786	8.3635774612	100.20890656	11.94	8.39
8.6	11.968658828	8.5835096358	102.73105316	11.980688668	8.5617855074	102.576091	11.94	8.59
8.8	11.967511558	8.7828624726	105.10685728	11.979505346	8.7609369278	104.95169066	11.94	8.79
9.0	11.966422272	8.9824348448	107.48704682	11.978770066	8.9598920824	107.32848664	11.93	8.98
9.2	11.965384482	9.1823980332	109.86790926	11.977871894	9.1591297148	109.70688018	11.93	9.18
9.4	11.964449502	9.3819112778	112.24709168	11.976935006	9.358273506	112.083432	11.93	9.38
9.6	11.963611984	9.5816307068	114.63002166	11.97607975	9.557475853	114.46109162	11.93	9.58
9.8	11.962578964	9.7816761016	117.01352994	11.975630762	9.7569530488	116.8456711	11.93	9.78
10	11.961747934	9.981040573	119.39019472	11.974746896	9.9558061598	119.21826174	11.93	9.98