



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Arto Laitinen

OHJELMOITAVA
PUOLIJOHDEKYTKIN

Tekniikka
2019

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Arto Laitinen
Opinnäytetyön nimi	Ohjelmitava puolijohdekytkin
Vuosi	2019
Kieli	suomi
Sivumäärä	47 + 3 liitettä
Ohjaaja	Jani Ahvonen

Elektroniikan suunnittelussa on usein tarve testata kuinka laite reagoi, kun laitteen sähkökatkeavat lyhyeksi ajaksi. Tämän kaltaisia testejä tehdään myös IEC61000-4-11 -standardin mukaisessa jännitekatkestestissä. Testeillä simuloidaan sähköverkossa tapahtuvia jännitteen putoamisia ja lyhyitä katkoksia. Markkinoilta löytyy tarkoitukseen soveltuvia standardin mukaisia testilaitteita, mutta ne ovat suurikokoisia ja painavia, joten pienikokoinen ja helposti siirrettävä laite katkosten tekemiseen päätettiin toteuttaa itse.

Opinnäytetyö käsitti tällaisen laitteen elektroniikan ja ohjelmiston suunnittelun. Työ tehtiin ABB Oy:n toimeksiannosta.

Laitteeseen toteutettiin näytöllä varustettu käyttöliittymä, jotta sitä voidaan käyttää ilman tietokonetta. Laitteeseen toteutettiin myös testattavan laitteen virran ja jännitteen mittaukset, joita voidaan valvoa laitteen näytöltä katkoksen aikana.

ABSTRACT

Author	Arto Laitinen
Title	User programmable solid-state switch
Year	2019
Language	Finnish
Pages	47 + 3 Appendices
Name of Supervisor	Jani Ahvonen

When designing electronics, it is often necessary to test how the designed device reacts to short interruptions in input voltage. These kinds of tests are often performed according to standard IEC/EN 61000-4-11. Testing is used to simulate voltage dips and short interruptions happening in public grid. Test generators for these tests are available on the market, but they are rather expensive and usually heavy. Smaller device than can do short interruptions was designed in this thesis.

Thesis included both hardware and software design for this kind of device. Designed device has user interface that includes display, so that it can be used without connection to PC. Additional features include measurements of voltage and current of the device under test. These measurements can be followed from the user interface during interruption.

Keywords: test equipment, electronics design, voltage interruptions

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

LIITELUETTELO

1	JOHDANTO	9
1.1	Työn taustaa	9
1.2	Työn tavoitteet	9
2	JÄNNITEKATKOKSET	10
2.1	Jännitekatkosten syyt	10
2.2	Jännitekatkosten vaikutukset	10
3	TEKNINEN MÄÄRITTELY	11
3.1	Yleiset ominaisuudet ja liitännät.....	11
3.2	Kytkenä/katkaisu	12
3.3	Kytkenäajan säätömahdollisuudet	12
3.4	Käyttöliittymä	12
3.5	CPU.....	12
3.6	Mittaukset	12
4	ELEKTRONIIKAN VALINTA	13
4.1	Kytkenä/katkaisu	13
4.2	CPU.....	14
4.3	Käyttöliittymäkomponentit	15
4.4	Mittaukset	15
4.5	Teholähdekomponentit	17
4.5.1	Verkkojännitesyöttö	17
4.5.2	Galvaanisesti erotetut osat.....	17
4.5.3	Laitteen sisäiset käyttöjännitteet	18
4.5.4	USB- käyttöjännite.....	18
4.6	Kotelointi	19
5	ELEKTRONIIKAN TOTEUTUS	20
5.1	Kytkenä ja katkaisu.....	20

5.2	Käyttöliittymä	23
5.3	Mittaukset	24
5.4	A/D-muunnin	26
5.5	Teholähdekomponentit	27
5.5.1	Verkkajännitesyöttö	27
5.5.2	Sisäiset käyttöjännitteet.....	28
5.5.3	Galvaanisesti erotetut käyttöjännitteet	29
5.6	Suojakomponentit	31
5.7	Liipaisusignaalit	32
5.7.1	Trigger in.....	32
5.7.2	Trigger out.....	33
5.8	Piirikaavion ja piirikortin piirtäminen	33
6	OHJELMISTON TOTEUTUS	34
6.1	Käytetty kehitysympäristö	34
6.2	Kytkeä/katkaisu	34
6.2.1	Low range.....	34
6.2.2	Mid range	35
6.2.3	High range.....	35
6.3	Ohjelmalogiikka.....	35
6.4	Käyttöliittymä	36
6.4.1	Valikko.....	36
6.4.2	Katkaisuajan asettaminen.....	37
6.4.3	Liipaisusignaalien asetukset.....	38
6.5	Mittaukset	38
6.6	USB.....	38
6.7	Liipaisusignaalit	38
7	ELEKTRONIIKAN TESTAUS	40
7.1	Käyttöjännitteet.....	40
7.2	Virrankulutus	40
7.3	Mikrokontrollerin ohjelmointi	40
7.4	Kytkeä/katkaisu	40
7.5	Mittaukset	43

7.6 Liipaisusignaalit.....	43
8 YHTEENVETO	45
LÄHTEET.....	46

LIITTEET

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Laitteen lohkokaavio.	11
Kuva 2. MOSFET -transistorien sarjakytkentä	13
Kuva 3. STW77N65M5 -MOSFET transistorin $R_{DS(on)}$ arvo eri virroilla.....	14
Kuva 4. LTS 6-NP -virtasensorin ulostulojännitteet. /2/	16
Kuva 5. AMC1200B-jännitevahvistimen vahvistus /5/.....	16
Kuva 6. Simulaatiokuva hilakapasitanssin latautumisesta.	22
Kuva 7. MOSFET-transistorien ohjauskytkentä	22
Kuva 8. Simulaatiokuva vaihtovirran katkaisusta.	22
Kuva 9. Näytön liittimen piirikaaviokuva.	23
Kuva 10. Jännitevahvistimen sisääntulon vastusjako /5/.	24
Kuva 11. Jännitevahvistinkytkennän simuloitujen jännitteet.....	25
Kuva 12. Jännitteen ja virran mittaukset	26
Kuva 13. A/D-muuntimen kytkentä.	27
Kuva 14. Verkojännitesyöttö ja jänniteregulaattorit.	28
Kuva 15. USB-väylän virranrajoituspiiri.	28
Kuva 16. TPS2051B-ohjaussignaali	29
Kuva 17. Galvaanisesti erotettu 5V teholähde.	30
Kuva 18. Galvaanisesti erotettu teholähde transistorien ohjaukselle.	30
Kuva 19. Mosfet-transistorien suojakomponentit.	31
Kuva 20. Verkojännitesyötön suojakomponentit.	32
Kuva 21. Liipaisusignaalien suojakomponentit.	32
Kuva 22. Liipaisusignaalien piirikaaviokuva.	33
Kuva 23. Ohjelman init-koodin toiminta.....	36
Kuva 24. Käyttöliittymän valikkorakenne.	37
Kuva 25. Oskilloskooppikuva lähdön ohjauksesta (High range).	41
Kuva 26. Oskilloskooppikuva lähdön ohjauksesta (Low range).....	41
Kuva 27. Oskilloskooppikuva lähdön ohjauksen nousuajasta.	42
Kuva 28. Oskilloskooppikuva lähdön ohjauksen laskuajasta.	42
Kuva 29. Oskilloskooppikuva liipaisusignaalin ulostulosta.....	44
Kuva 30. Oskilloskooppikuva sisääntulevasta liipaisusignaalista.	44
Taulukko 1. Käyttöjännitteiden mittaustulokset.....	40

LIITELUETTELO

LIITE 1. Kuva laitteen kehitysversiosta

LIITE 2. Kuva käyttöliittymästä

LIITE 3. Kuva valmiista piirikortista

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustaa

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa laite, jolla voidaan aiheuttaa testattavalle laitteelle eri pituisia sähkökatkoksia. Toimeksiantajalla oli jo käytössä vastaava itse suunniteltu testilaitte. Käytössä olevan testilaitteen ominaisuuksiin haluttiin kuitenkin parannuksia, joten päädyttiin toteuttamaan uusi laite monipuolisemmilla ominaisuuksilla ja selkeämmällä käyttöliittymällä.

Markkinoilla on saatavilla valmiita IEC61000-4-11 -standardin mukaisia testigeneraattoreita tämänkaltaisiin testeihin, mutta ne ovat usein isokokoisia ja painavia. Pieni ja helposti siirrettävä laite päätettiin siis toteuttaa itse. Standardin mukaiset testigeneraattorit pystyvät katkosten lisäksi pudottamaan testattavan laitteen syöttöjännitettä muillekin tasoille kuin 0%:iin syöttöjännitteestä. Tässä työssä laitteeseen ei kuitenkaan suunniteltu tällaista ominaisuutta, eikä suunniteltu laite täytä standardin vaatimuksia.

1.2 Työn tavoitteet

Työssä suunniteltu puolijohdekytkin liitetään testattavan laitteen ja sen jännitesyötön väliin. Laite suunniteltiin siten, että ominaisuuksia voidaan helposti lisätä tai parantaa ohjelmistoa muuttamalla. Työssä toteutettiin itse sekä ohjelmisto että elektroniikka. Laitteessa on selkeä näyttöillä varustettu käyttöliittymä, ja sen asetusten muuttaminen pyrittiin tekemään mahdollisimman selkeäksi. Uusina ominaisuuksina laitteeseen toteutettiin virran ja jännitteen mittaus, joita ei aikaisemmassa laitteessa ollut. Elektroniikka on suunniteltu siten, että laite on mahdollista konfiguroida myös USB-väylän kautta, mutta USB-kommunikaation ohjelmistototeutus jätettiin tämän työn ulkopuolelle.

2 JÄNNITEKATKOKSET

2.1 Jännitekatkosten syyt

Jännitekatkoksia voi aiheutua katkoksista sähköjakeluverkossa tai esimerkiksi jännitesyötön huonoista liitoksista. Yleinen syy lyhyille katkoksille laitteissa, joissa käytetään akkua, on sähkönsyötön vaihtuminen verkkojännitteestä akkukäytölle. Jos samalla tehölähteellä käytetään montaa laitetta, voi jonkin toisen laitteen viikaantuminen aiheuttaa katkoksen kaikille laitteille. /14/

2.2 Jännitekatkosten vaikutukset

Laitteet voivat reagoida monin tavoin syöttöjännitteen putoamisen tai katkeamisen seurauksena. Laitteen käyttäytyminen tällaisessa tilanteessa riippuu laitteen tyy-pistä ja suunnittelusta.

Digitaalinen laite voi katkoksen seurauksena käynnistyä uudelleen oletustilaan tai jatkaa toimintaa katkosta edeltäneestä tilanteesta. Mikäli uudelleenkäynnistyminen ei tapahdu hallitusti, voi muisti korruptoitua ja ohjelman suoritus jatkua tämän seurauksena satunnaisesta kohdasta. Muistin korruptoituminen tarkoittaa myös sitä, että laitteen lähdöt voivat olla missä tilassa vain. Tästä voi olla suurta haittaa, jos laitteella ohjataan jotakin toista laitetta tai esimerkiksi teollisuusprosessin osaa. Laitetta suunnitellessa tulisi varmistaa, että laite ei aiheuta vaarallisia tilanteita tai datan katoamista sähkönsyötön häiriintyessä. Tässä työssä suunniteltua laitetta voidaan hyödyntää tähän tarkoitukseen.

3 TEKNINEN MÄÄRITTELY

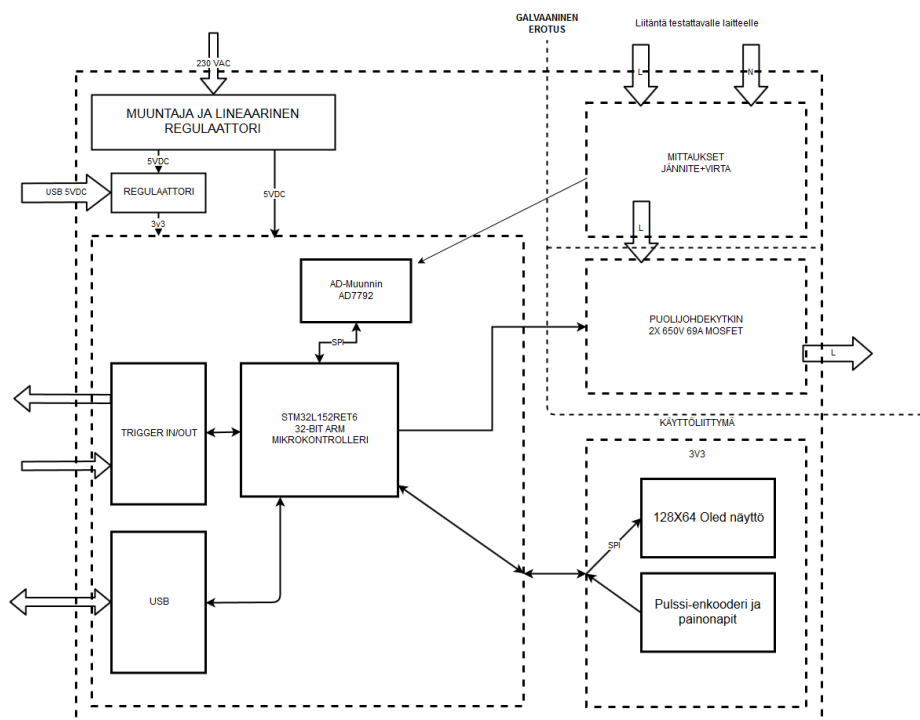
3.1 Yleiset ominaisuudet ja liitännät

Toteutettavan laitteen pitää pystyä katkaisemaan tai kytkemään testattavan laitteen käyttöjännite tai jokin signaali määritellyksi ajaksi. Laitteessa tulee olla myös katkaistavan jännitteen ja virran mittaus. Käyttöliittymässä on näyttö ja pulssi-enkooderi, joita voidaan käyttää asetusten vaihtamiseen ja laitteen ohjaamiseen.

Laitteessa tulee olla vähintään seuraavat liitännät:

- Liitäntä käyttöjännitteelle (230VAC tai USB 5VDC)
- Trigger In
- Trigger Out
- Liitäntä testattavalle laitteelle
- USB.

Laitteen lohkokkaavio on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Laitteen lohkokkaavio.

3.2 Kytkeä/katkaisu

Laitteella on mahdollista kytkeä ja katkaista sekä tasa- että vaihtovirtaa. Lisäksi voidaan valita, onko katkaistava piiri oletuksena suljettu (NC) vai avoin (NO). Laitteen tulee pystyä katkaisemaan 230 V -verkkojännitettä.

3.3 Kytkeäajan säätömahdollisuudet

Kytkeäaika on vapaasti säädettävissä välillä 1ms–2 vrk. Kytkeäajan tarkkuus riippuu kytkeäajan pituudesta. Pienimmällä kytkeäajan alueella tarkkuus on 1ms. Liipaisuhetki voidaan säätää käyttöliittymästä tai voidaan käyttää ulkoista signaalia.

3.4 Käyttöliittymä

Laitteen käyttöliittymä sisältää pulssi-enkooderi -tyyppisen potentiometrin painonapilla, yhden erillisen painonapin ja keinukytkimen toiminnan invertointia varten. Laitteessa on lisäksi näyttö parametrien asettelua varten. Käyttöliittymässä on valikko, josta voidaan vaihtaa asetuksia, näyttää mittausarvot tai käynnistää toiminta.

3.5 CPU

Laitteessa käytetään STM32L152RET6-mikrokontrolleria, joka sisältää 32-bittisen ARM Cortex M3-suorittimen. Kyseinen mikrokontrolleri on valittu alhaisen virrankulutuksen ja monipuolisten ominaisuuksien perusteella. Mikrokontrollerin maksimi kellotaajuus on 32MHz.

3.6 Mittaukset

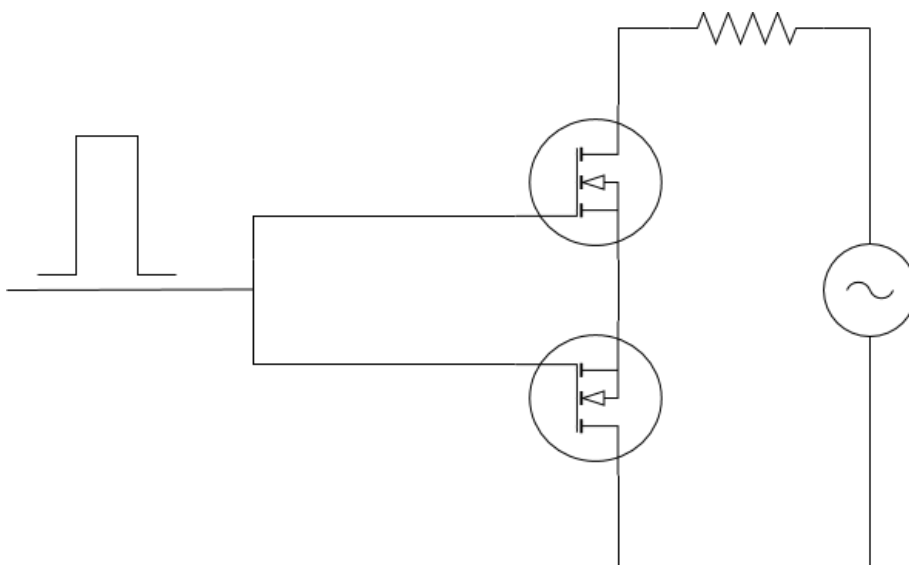
Laitteella voidaan mitata vähintään testattavan laitteen virtaa ja jännitettä. Mittausten tulee olla toteutettu siten, että ne ovat galvanisesti erotettuja.

4 ELEKTRONIIKAN VALINTA

4.1 KytKentä/katkaisu

Virran katkaisuun käytettävien komponenttien valintaa rajoitti vaatimus sekä tasavirtaa vaihtovirran katkaisusta. Komponenttivalinnassa päädyttiin käyttämään MOSFET-transistoreja. Mekaanisen releen käyttäminen laitteessa ei ole järkevää, kun katkosajat ovat lyhyitä ja katkos pitää saada ajoitettu tarkasti. Puolijohteita käyttämällä saadaan myös usein pidempi käyttöikä kuin mekaanisella releellä.

Ainoastaan vaihtovirralla toimiva kytkentä tehdään tyypillisesti käyttämällä tyristoryreja tai triakkeja. Tasavirtaa katkaistaessa voitaisiin käyttää yksittäistä MOSFET-transistoria, mutta vaihtovirralla tämän estää transistorin sisäinen diodi, joka johtaa aina toiseen suuntaan riippumatta ohjauksesta. Tämä ongelma voidaan ratkaista käyttämällä kahta vastakkaisiin suuntiin sarjaan kytkettyä transistoria. Tällainen kytkentä on esitetty kuvassa 2. /4/

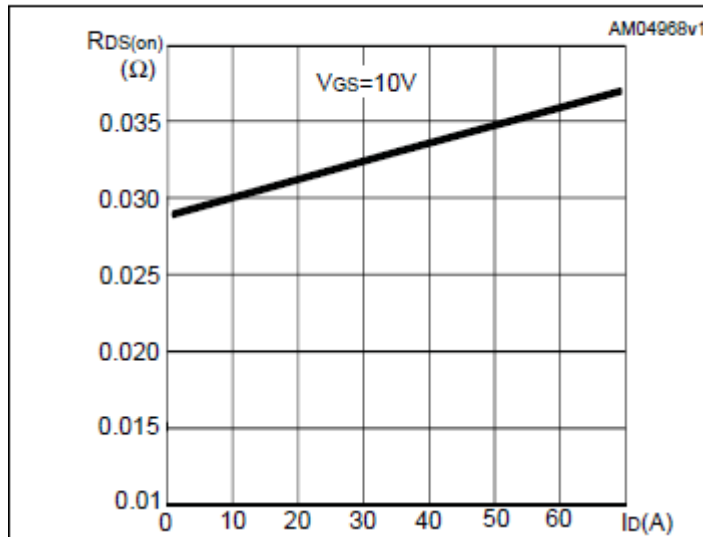


Kuva 2. MOSFET -transistorien sarjakytkentä

MOSFET-transistoreiksi valittiin komponentit, joilla on suuri virran ja jännitteen kesto. MOSFET-transistori ei ole täydellinen johde vaikka se ohjattaisiin täysin johtavaksi, tämän takia tärkeää on myös pieni $R_{DS(on)}$ -arvo jotta transistorit eivät kuumene liikaa. Käytettäväksi transistoriksi valikoitui näiden valintakriteerien

perusteella STMicroelectronicsin STW77N65M5, jonka nimelliset jännitteen ja virran arvot ovat 650V ja 69A. /6/

Figure 7. Static drain-source on resistance



Kuva 3. STW77N65M5 -MOSFET transistorin $R_{DS(on)}$ arvo eri virroilla.

4.2 CPU

Laitteeseen valikoitui STM32L152RET6-mikrokontrolleri, joka sisältää 32-bittisen ARM Cortex M3 -suorittimen. Kyseinen mikrokontrolleri on valittu alhaisen virrankulutuksen ja monipuolisten ominaisuuksien perusteella. Mikrokontrollerin maksimi kellotaajuus on 32MHz /1/.

Mikrokontrollerin muistin määrät ovat seuraavat:

- Flash: 512 kB
- RAM: 80 kB
- EEPROM: 16 kB.

Tärkeimmät ominaisuudet tämän työn kannalta ovat:

- 1 32-bittinen ajastin
- 8 16-bittistä ajastinta

- USB-tuki
- SPI-väylä
- RTC.

4.3 Käyttöliittymäkomponentit

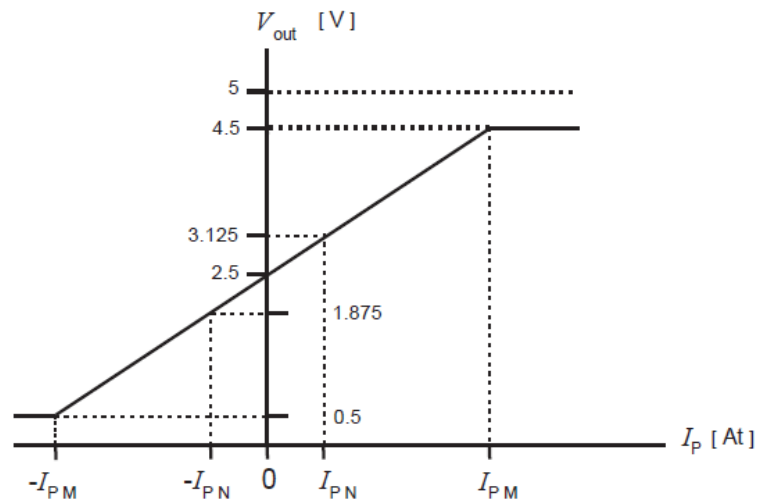
Näytöksi on valittu Vishayn 128x64 -pikselinen OLED-näyttömoduuli. OLED-tekniikalla saadaan näyttöön hyvä kirkkaus ja kontrasti verrattuna LCD-näyttöön. Valmis näyttömoduuli on valittu sen yksinkertaisuuden vuoksi. Moduulia käytettäessä sitä voidaan käyttää suoraan 3,3V käyttöjännitteellä eikä erillistä teholähdettä tarvita. Näytön ohjauspiiri tukee SPI-kommunikaatiota, joten johtimien määrä saadaan pieneksi.

Pulssi-enkooderina voidaan käyttää mitä vain yleisesti saatavilla olevaa komponenttia, kunhan sitä voidaan käyttää 3,3V jännitteellä. Enkooderiksi valittiin mekaanisesti toimiva vaihtoehto edullisen hinnan ja hyvän saatavuuden perusteella.

4.4 Mittaukset

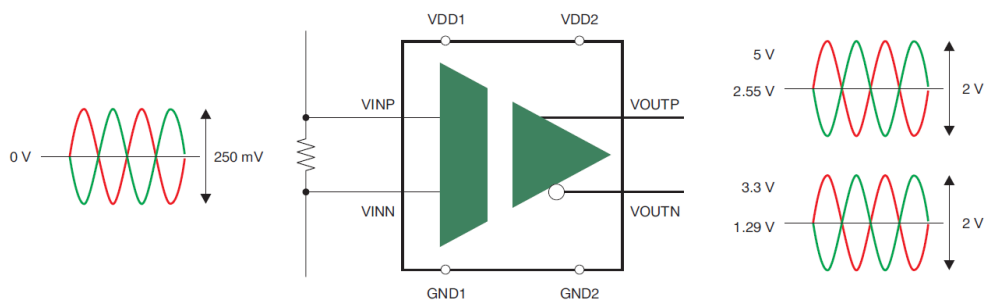
Virran mittaukseen valikoitui Hall-sensori, jolla saadaan helposti galvaaninen erotus ja vähäinen ulkoisten komponenttien määrä. Hall-sensorilla voidaan mitata helposti sekä tasavirtaa että vaihtovirtaa. Valittu sensorin on LEM:in Closed loop -tyyppinen LTS 6-NP -virtasensori. Sensorin nimellinen virta on 6A, mutta sillä voidaan mitata suurimmillaan jopa 19,2 A:n virtaa. Sensori on tarkoitettu käytettäväksi yksipuoleisella 5V käyttöjännitteellä.

Sensorin toisiossa on kolme pinniä, joista kaksi on tarkoitettu käyttöjännitteille ja yksi on jänniteulostulo. Ulostulon jännite on 2,5V kun sensorin läpi ei kulje virtaa. Ulostulon jännitteet läpi kulkevan virran funktiona on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. LTS 6-NP -virtasensorin ulostulojännitteet. /2/

Jännitteen mittaukseen valittiin galvaanisesti erotettu jännitevahvistin, Texas Instrumentsin AMC1200B. Tällainen erotettu vahvistin tarvitsee kuitenkin myös erillisen galvaanisesti erotetun jännitelähteen. AMC1200B:n kiinteä vahvistuskerroin on 8, ja maksimi sisääntulojännite 320mV. Vahvistimen sisääntulojännite saadaan jännitejaolla mitattavasta jännitteestä. Kuvassa 5 nähdään vahvistimen vahvistus, kun sisään tuleva jännite on 250mV.



Kuva 5. AMC1200B-jännitevahvistimen vahvistus /5/.

Hall-sensorin ja jännitevahvistimen ulostulot kytketään erilliselle SPI-väyläiselle AD-muuntimelle. Erillisissä AD-muuntimissa on yleensä myös suodatus- ja

vahvistusominaisuuksia, kun taas mikrokontrollereihin integroiduissa AD-muuntimissa näitä ominaisuuksia ei yleensä ole.

AD-muuntimeksi valittiin Analog Devicesin 16-bittinen AD7792. Kyseisessä AD-muuntimessa on 3 kanavaa, joista yhteen voidaan kytkeä ulkoinen referenssi. Valintaan vaikutti sopiva kanavien määrä, monipuoliset ominaisuudet, mahdollisuus käyttää ulkoista referenssijännitettä, sekä kehitysalustan helppo saatavuus /7/.

Referenssijännite tehdään 5V jännitteestä käyttämällä Texas Instrumentsin LM4040-2.5 SOT-23 koteloista jännitereferenssidiodia. Oheiskomponenteiksi tarvitaan vain yksi vastus rajoittamaan diodin läpi kulkevaa virtaa /8/.

4.5 Teholähdekomponentit

Erilaisia teholähdekomponentteja tarvittiin paljon, koska laitteessa on mahdollista käyttää kahta eri käyttöjännitettä. Galvaanisen erotuksen takia tarvittiin myös erilliset eristetyt teholähteet jännitteen mittaukselle sekä virran katkaisuun vaadittaville komponenteille.

4.5.1 Verkkojännitesyöttö

Verkkojännitesyötössä käytetään perinteistä isoa piirikorttimuuntajaa, jossa on kaksi 6V toisiokäämiä. Muuntajan jälkeisen vaihtojännitteen tasasuuntaukseen valittiin yleinen 1A tasasuuntaussilta DF08S, jota on saatavilla useilta eri valmistajilta.

4.5.2 Galvaanisesti erotetut osat

Galvaanisesti erotettujen komponenttien teholähteissä käytetään pulssimuuntajia, joita ohjataan erillisellä tarkoitukseen suunnitellulla integroidulla piirillä. Muuntajiksi valittiin HALO Electronicsin valmistamat TGMR-340 -muuntajat. Muuntajien ensiö- ja toisiokäämien kierrosmäärien suhde on 3:4. Muuntajien eristysjännite on $3000V_{\text{rms}}/3/$.

Muuntajien ohjauspiireinä käytetään Maximin MAX253 -piirejä, joiden käyttäminen on mahdollista sekä 3,3V että 5V jännitteellä. Piirissä on erillinen pinni, jolla se voidaan tarvittaessa sammuttaa mikrokontrollerin lähtöä käyttämällä /9/.

Jännitteen mittaukseen tarvitaan vielä erillinen 5V regulaattori. Tähän tarkoitukseen regulaattoriksi valikoitui Texas Instrumentsin SOT-23-5 -koteloinen LDO-regulaattori LP2985A-5.0. Regulaattorin maksimivirta on 150mA, joka riittää tähän tarkoitukseen hyvin, koska jännitevahvistimen virrankulutus on datalehden mukaan vain noin 8mA. /10/

4.5.3 Laitteen sisäiset käyttöjännitteet

Laite käyttää sisäisesti 5V ja 3,3V käyttöjännitteitä. 5V käyttöjännite tehdään lineaarisella jänniteregulaattorilla tasasuuntauksen jälkeen verkkojännitteestä, mikäli sitä ei voida ottaa suoraan USB-väylästä. 3,3V käyttöjännite saadaan 5V käyttöjännitteestä toisella lineaarisella regulaattorilla.

5V jännitteen regulointiin valittiin Texas Instrumentsin LM3856-5.0 kiinteäjännitteinen Ultra low dropout -regulaattori. Regulaattorin maksimivirta on 3A /11/.

3,3V jännitteen regulaattoriksi valittiin yleisesti käytössä oleva SOT-223 koteloinen Texas Instrumentsin LM1117-3.3.

4.5.4 USB- käyttöjännite

USB-käyttöjännitettä käytetään suoraan laitteen sisäisenä 5V käyttöjännitteenä. Vikatilanteiden varalta laitteeseen lisättiin kuitenkin erillinen virranrajoituspiiri, Texas Instrumentsin TPS2051B. Piiri rajoittaa USB-väylästä otetun virran 500mA: n.

TPS2051B sisältää erillisen tulon, jolla virta voidaan katkaista myös mikrokontrollerin lähtöä käyttämällä. Piirin OC-pinnistä saadaan myös tieto mahdollisesta vikatilanteesta. OC-pinni menee alatilaa, jos USB-virta katkaistaan liian suuren virran tai lämpötilan vuoksi /12/.

4.6 Kotelointi

Laitteen koteloksi valittiin Hammond Manufacturingin valmistama alumiinista valettu kotelo /13/. Kotelo on saman kokoinen ja samaa materiaalia kuin vanha laite. Metallinen kotelo tekee laitteesta kestävämmän ja parantaa sen kykyä sietää ulkoisia häiriöitä.

5 ELEKTRONIIKAN TOTEUTUS

5.1 Kytkentä ja katkaisu

Kytken ja katkaisun ohjaukseen on käytössä kaksipuoleiset $\pm 12V$ käyttöjännitteet. MOSFET-transistorien V2 ja V3 ohjaukseen on toteutettu kytkentä, jolla saadaan kytkettyä MOSFET-transistorien hilat joko positiiviseen tai negatiiviseen käyttöjännitteeseen (**Kuva 7.**). Positiiviseen käyttöjännitteeseen kytkeminen tapahtuu aktiivisesti optoerottimella V7, kun taas negatiiviseen käyttöjännitteeseen kytkeminen tapahtuu alavetovastuksella R6. Vastuksella R5 rajoitetaan optoerottimen virta alle 5 mA:iin. Tämä saadaan datalehdessä mainitun ylimenojännitteen (V_F) perusteella seuraavasti /18/.

$$R = \frac{3,3 V - V_F}{5 mA} = \frac{3,3 V - 1,1 V}{5 mA} = 440\Omega \quad (1)$$

Valitaan siis tästä seuraava suurempi vastusarvo E24-sarjasta. Virraksi saadaan 475 Ω :n vastuksella noin 4,6mA.

Vastuksen R6 arvoa suurentamalla voidaan hidastaa kytkeytymistä negatiiviseen jännitteeseen ja vastuksen R7 suurentaminen vastaavasti hidastaa kytkeytymistä positiiviseen jännitteeseen. Liian nopeat kytkentäajat aiheuttavat herkästi häiriöjännitteitä läheisille komponenteille /16/.

Transistorit V5 ja V4 toimivat tässä kytkennässä jänniteseuraajina, kytkentää kutsutaan yhteiskollektorikytkennäksi. Kytkennän jännitevahvistus on siis:

$$A_v = \frac{U_{out}}{U_{in}} \approx 1 \quad (2)$$

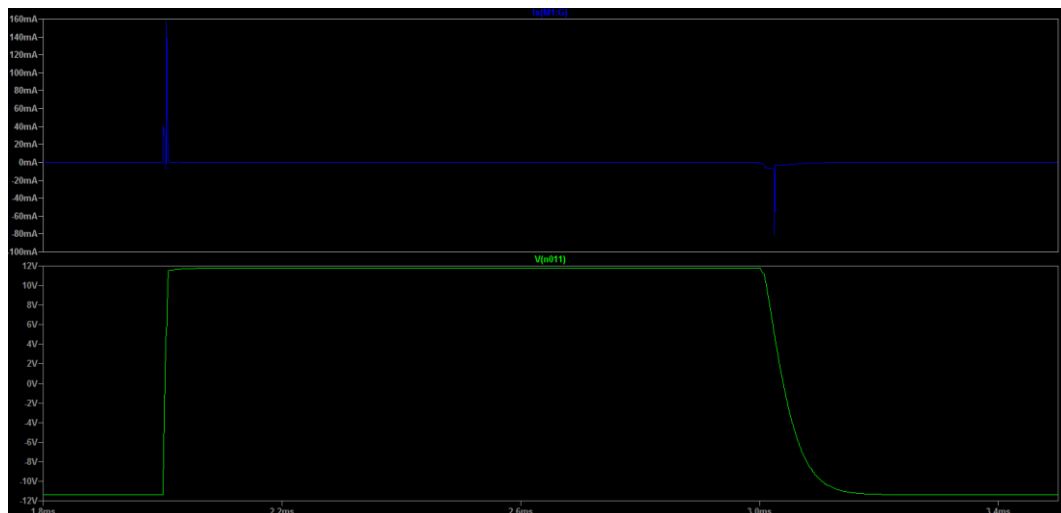
MOSFET-transistori on teoriassa jänniteohjattu, mutta se sisältää aina sisäisiä kapasitansseja, jotka pitää ladata, jotta kanava saadaan johtavaksi. Vastaavasti varaus pitää myös purkaa, kun kanava halutaan sulkea. Tästä johtuen suuria MOSFET-transistoreja ei voida ohjata suoraan mikrokontrollerilla tai optoerottimella, mikäli kytkentä halutaan nopeaksi. Hilakapasitanssin latautuminen näkyy valituilla

komponenttiarvolla ajetusta simulaatiosta (**Kuva 6.**). Kytkeä simuloitiin ennen prototyypin rakentamista LTSpice XVII -ohjelmalla. Virtaa kulkee hilalle vain silloin kun ohjaussignaali vaihtaa tilaansa, joten transistorien tehonkeston ei tarvitse olla suuri. Vastuksella R8 puretaan varausta hilalta tilanteessa, jossa virran kulku halutaan katkaista käyttämällä OUTPUT_ENABLE signaalia.

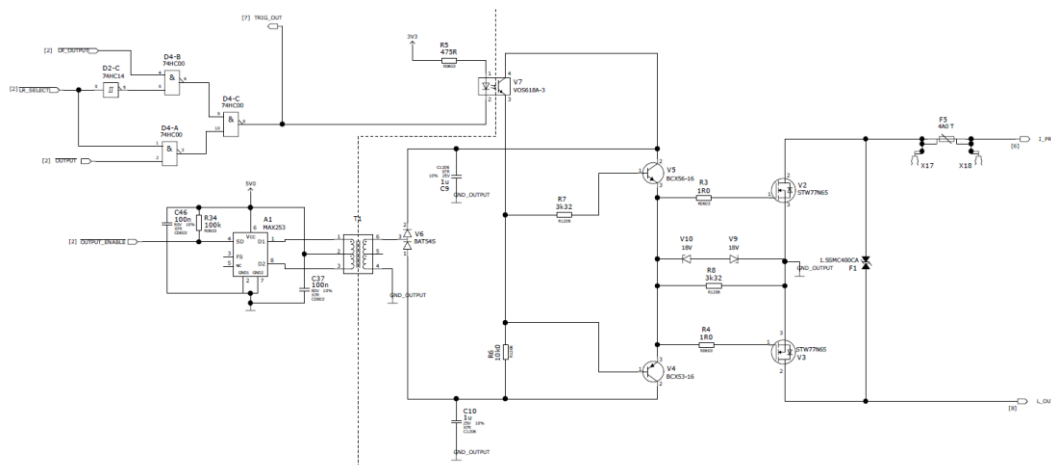
MOSFET-transistorin datalehdessä ilmoitetaan hilakapasitanssi arvona C_{iss} . Tämä kapasitanssi pitää ladata, jotta hilan jännite saadaan haluttuun arvoon. STW77N65M5 datalehdessä ilmoitetaan arvoksi 9800pF. Kytkennässä hilalle tuleva jännite n.11,8 V. Tästä voidaan laskea tarvittava virran maksimiarvo, kun kytkentäajaksi halutaan $1\mu s /17/$.

$$I_g = \frac{dq}{dt} = \frac{11.8V \times (2 \times 9800pF)}{1\mu s} = 0,23A \quad (3)$$

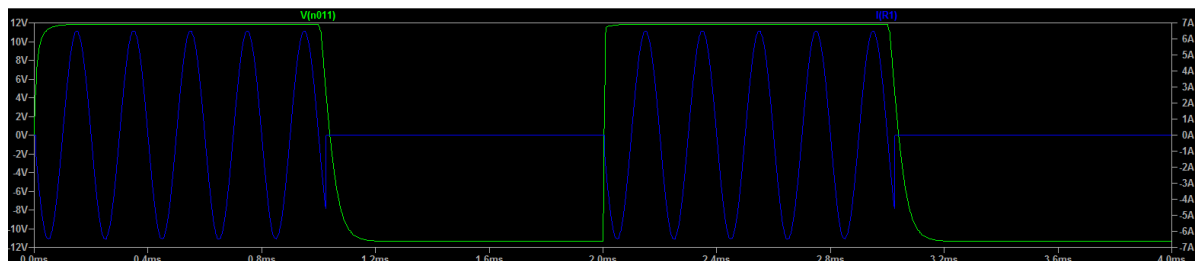
Suunnitellulla kytkennällä tämä virran arvo ylittyy simuloitien perusteella helposti. Kytkennän vastusarvoja voidaan kuitenkin vielä tarvittaessa muuttaa mittaus- ja testien perusteella, mikäli nousu ja laskuaikoihin halutaan muutoksia. Kuvassa 8 on simuloitu vaihtovirran katkeamisnopeutta valituilla komponenttiarvoilla. Virran kulku katkeaa jo ennen kuin hilalla oleva jännite saavuttaa 0 V. Virran katkeamiseen kuluva aika on siis alle puolet ohjaussignaalin laskuajasta.



Kuva 6. Simulaatiokuva hilakapasitanssin latautumisesta.



Kuva 7. MOSFET-transistorien ohjauskytkentä



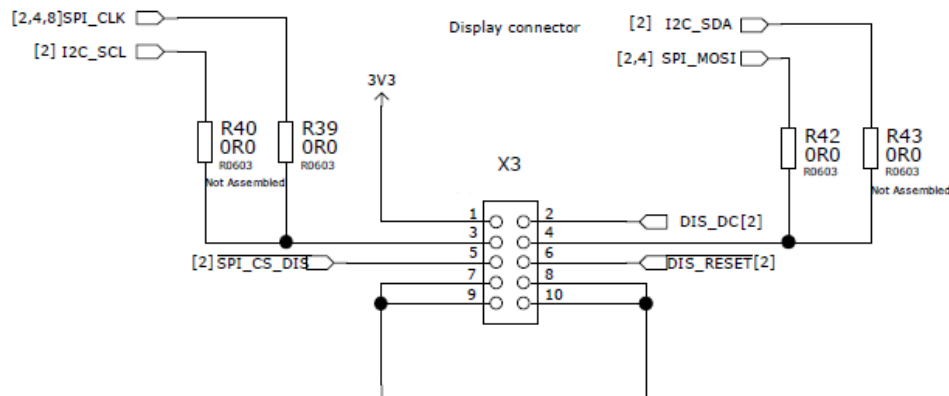
Kuva 8. Simulaatiokuva vaihtovirran katkaisusta.

MOSFET-transistorien hiloille on lisätty sarjavastukset R3 ja R4, joiden arvoa vaihtamalla voidaan tarvittaessa hidastaa kytkentää.

Optoerottimelle tuleva signaali voi tulla joko mikrokontrollerin ajastimen lähdöstä tai erillisestä I/O-pinnistä. Tämä voidaan valita käyttämällä kuvassa 7 näkyvää LR_SELECT-signaalia. Kun signaali on alatilassa, käytetään ajastimen lähtöä. Ajastimen lähtö on valittu käytettäväksi koska sillä saadaan tarkempi ohjaus kuin I/O-pinnin ohjaamisella ohjelmallisesti.

5.2 Käyttöliittymä

Laitteen käyttöliittymä sisältää näytön ja kaksi painonappia. Näyttö on kytketty samaan SPI-väylään kuin A/D-muunnin. SPI-signaalien lisäksi näytölle tarvitaan kaksi erillistä signaalia, joista toisella näytön ohjainpiiri voidaan resetoida ja toisella näyttö saadaan vastaanottamaan saapuva data komentona. Elektroniikka on myös toteutettu siten, että näyttöä voidaan tarvittaessa käyttää myös I2C-väylän kautta (**Kuva 9**). Näytön signaalit liitetään kortilla olevaan erilliseen liittimeen.



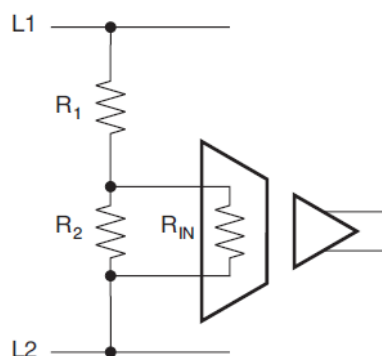
Kuva 9. Näytön liittimen piirikaaviokuva.

Painonapit liitetään piirikortille joko juottamalla johtimet suoraan kortille tai liittämällä ne kortille juotettavaan piikkirimaan. Kortilla painonappien signaalit on kytketty suoraan mikrokontrollerille. Signaaleilla on 10kΩ:n ylösvetovastukset ja 100nF:n suodatuskondensaattorit.

Pulssi-enkooderi ja siinä oleva painonappi liitetään kortille samaan tapaan johtimilla kuin muutkin painonapit. Pulssi-enkooderin pinnit on liitetty mikrokontrollerin ajastimen kanaviin 1 ja 2. Signaaleissa on kortilla $5,62k\Omega$:n ylösvetovastukset. Lisäksi painonapille on suodatuskondensaattori.

5.3 Mittaukset

Jännitteen mittauskytkentä on toteutettu siten että sillä voidaan mitata myös vaihtojännitettä. Tulojännite pudotetaan ensin jännitevahvistimelle sopivaksi vastusjakoilla (**Kuva 10.**). Suurimmaksi mitattavaksi jännitteeksi on valittu $350V$, ja jännitevahvistimen maksimi tulojännite on $320mV$.



Kuva 10. Jännitevahvistimen sisääntulon vastusjako /5/.

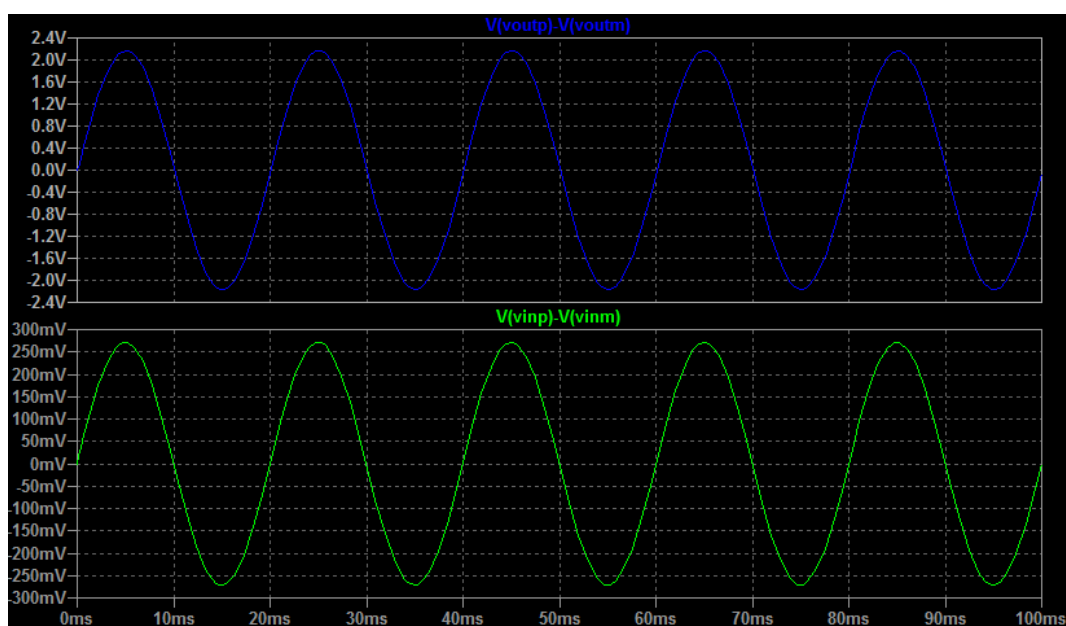
$$U_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_{in} = \frac{1,5k\Omega}{(1,64M\Omega + 1,5k\Omega)} \times 350V = 0,320V \quad (4)$$

Kaavassa oleva R_1 arvo on kytkennässä toteutettu kytkemällä kaksi $820k\Omega$ vastusta sarjaan.

AMC1200B tulossa käytetään sisäisesti A/D-muunninta, joten sisään tulevaa taajuutta on tarve rajoittaa signaalin laskostumisilmiön estämiseksi. Kuvassa 12 olevat kondensaattorit C38 ja C39 muodostavat alipäästösuotimen yhteismuotoisten häiriöiden suodattamiseksi. Suodattimen rajataajuudeksi on laskettu $9,7kHz$.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times (1,64M\Omega \times 10pF)} = 9,70kHz \quad (5)$$

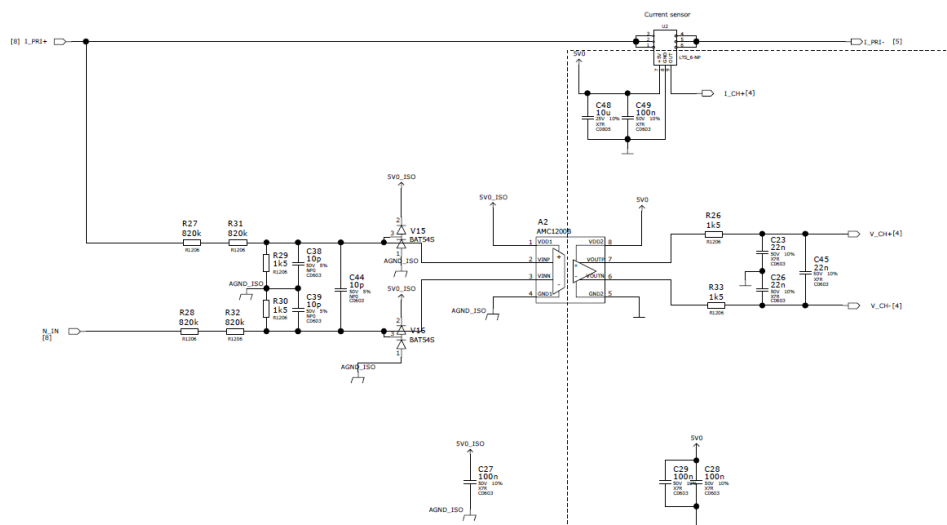
Tällä lasketulla taajuudella signaali vaimenee -3dB. Kondensaattori C44 on lisätty eromuotoisten häiriöiden suodattamiseksi. Vahvistimen lähtöön on vielä lisätty toinen alipäästösuodatin ennen varsinaista A/D-muunninta, tämän suodattimen raja-taajuus on 4,8kHz. Mittauskytkentää vielä simuloitiin LTSpice XVII -ohjelmalla ennen prototyypin rakentamista. Simulaatio vahvistimen sisään- ja ulostulojännit-teistä 300V:n syöttöjännitteellä on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Jännitevahvistinkytkennän simuloitut jännitteet.

Diodit V15 ja V16 suojaavat jännitevahvistimen tuloja, mikäli jännite nousee liian suureksi.

Virtasensorista saadaan suoraan sen läpi kulkevaan virtaan verrannollinen jännite, joten se voidaan kytkeä suoraan A/D-muuntimelle. Tämäkin signaali kuitenkin vielä suodatetaan ennen mittausta. Suodatuskomponentit näkyvät kuvassa 13.

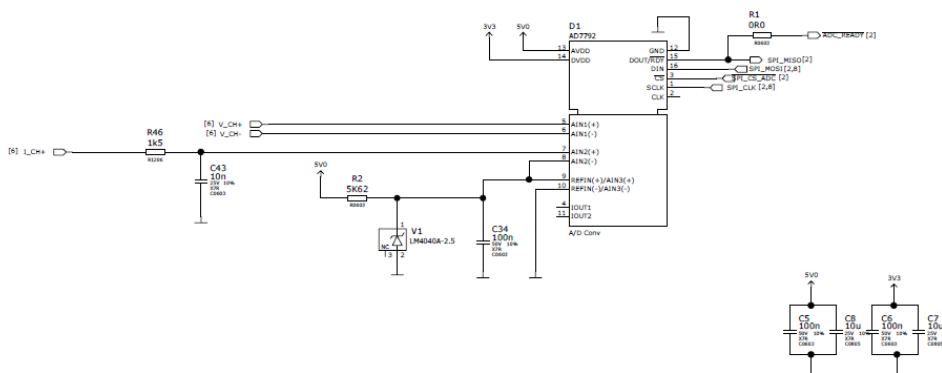


Kuva 12. Jännitteen ja virran mittaukset

5.4 A/D-muunnin

A/D-muunnin on kytketty SPI-väylän kautta suoraan mikrokontrollerille. Väylän kautta voidaan lukea mittaustulokset sekä vaihtaa A/D-muuntimen asetuksia. AD7792 asettaa ADC_READY-signaalin alatilaa, kun uusi mittaustulos on luetavissa rekisteristä.

A/D-muuntimen DVDD-käyttäjännitteeksi on valittu 3,3V, koska tämä on mikrokontrollerin käyttäjännite ja A/D-muuntimen pitää pystyä kommunikoimaan sen kanssa. Kuvan 13 oikeassa alareunassa olevat kondensaattorit ovat datalehdessä suositeltuja ohituskondensaattoreita A/D-muuntimen käyttäjännitteille.



Kuva 13. A/D-muuntimen kytkentä.

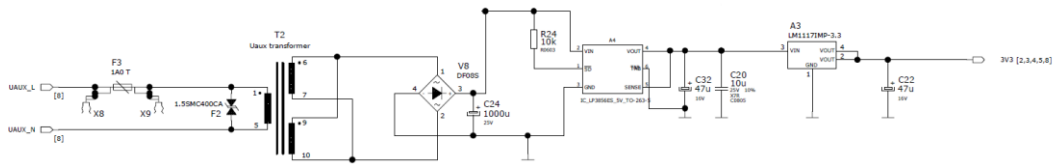
A/D-muuntimen referenssjännitteenä käytetään ulkoista 2,5 V:n referenssiä, joka saadaan 5V käyttöjännitteestä V1:n avulla. R2 rajoittaa referenssidiodin läpi kulkevan virran noin 0,5 mA:n

Ennen A/D-muuntimen tuloa, virtasensorilta tuleva signaali vielä alipäästösuodataan vastuksen R46 ja kondensaattorin C43 muodostamalla RC-alipäästösuodattimella. Suodattimen laskennallinen rajataajuus on 10,6 kHz

5.5 Teholähdekomponentit

5.5.1 Verkkojännitesyöttö

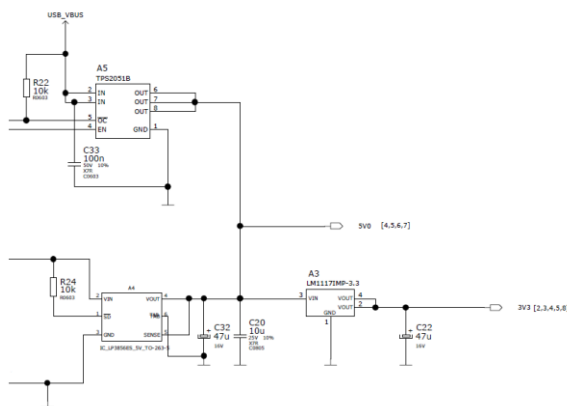
Kuvassa 14 on esitetty laitteen verkkojännitesyöttö. Muuntajan toisiokäämit on kytketty rinnan suuremman virran saamiseksi. Muuntajan toisiossa oleva jännite tasasuunnataan tasasuuntausillalla V8.



Kuva 14. Verkkojännitesyöttö ja jänniteregulaattorit.

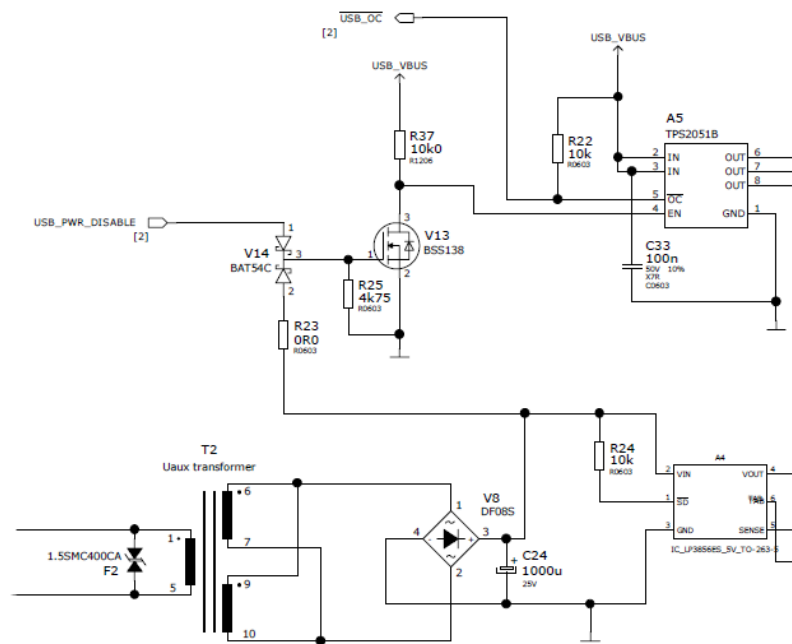
5.5.2 Sisäiset käyttöjännitteet

Muuntajanjälkeisestä tasasuunnatusta jännitteestä reguloidaan laitteen sisäinen 5V käyttöjännite jänniteregulaattorilla A4. Tähän 5V käyttöjännitteeseen on kytketty myös USB-liittimen kautta saatava jännite (**Kuva 15.**). 3.3V käyttöjännite saadaan reguloimalla se 5V käyttöjännitteestä jänniteregulaattorilla A3. Kondensaattoreilla C32, C20 ja C22 tasataan regulaattorien ulostulojännitettä.



Kuva 15. USB-väylän virranrajoituspiiri.

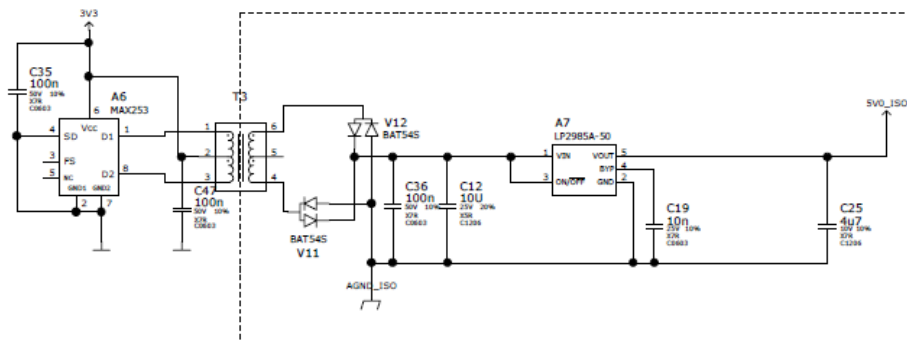
Laite on toteutettu lisäksi siten, että virtaa ei oteta USB-väylästä, mikäli verkkojännitesyöttö on saatavilla, kytkentä on esitetty kuvassa 16. A5:n EN-pinni menee alatilaaan, kun kondensaattorin C24 jännite alkaa nousemaan. Tila vaihtuu jännitteen noustessa n. 3 V:iin. EN-pinni saadaan alatilaaan myös mikrokontrollerin lähtöä käyttämällä.



Kuva 16. TPS2051B-ohjaussignaalit

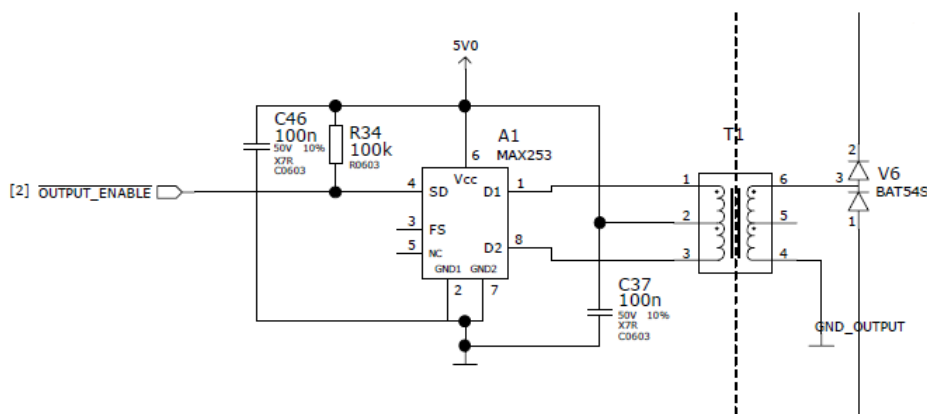
5.5.3 Galvaanisesti erotetut käyttäjännitteet

Galvaanisesti erotettu 5,0V jännite saadaan 3,3V jännitteestä käyttämällä pulssi-muuntajaa ja MAX253-ohjainpiiriä ensin jännitteen nostamiseen. Muuntajan toisiossa tämä jännite kokoaaltotasasuunnataan ja reguloidaan LP2985A-5.0-jänniteregulaattorilla. Regulaattorin sisääntulojännite on tässä kytkennässä n. 8V (**Kuva 17**). Kondensaattoreilla C12 ja C36 tasataan regulaattorin sisääntulojännite tasasuuntauksen jälkeen. C19 ja C25 ovat regulaattorin datalehdessä suositeltuja ohitus ja ulostulokondensaattoreita /10/.



Kuva 17. Galvaanisesti erotettu 5V tehollähde.

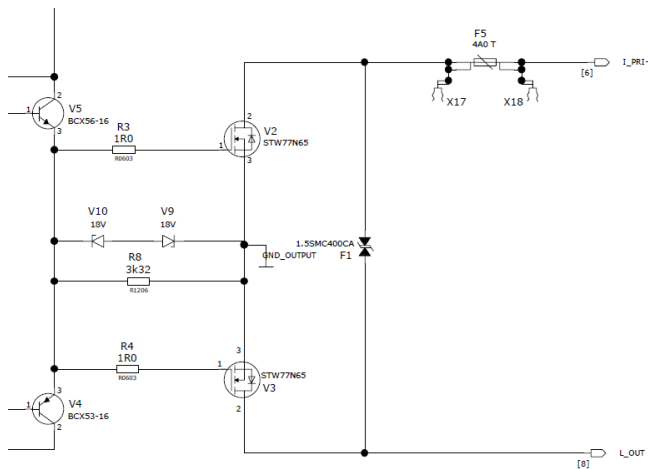
Kytken ja katkaisun ohjauselektronikalle on samaan tapaan toteutettu kaksi-puoliset, mutta reguloimattomat käyttöjännitteet pulssimuuntajalla ja MAX253 ohjauspiirillä. Ensimmäisen puolen jännite on tässä kytkennässä edellisestä poiketen 5V, eikä 3,3V. Muuntajan toisiossa jännitteet puoliaaltotasasuunnataan diodilla V6. Muuntaja on vastaava komponentti kuin aiemmassa kytkennässä, mutta tasasuuntauksen jälkeiset jännitteet ovat erilaisen kytkennän ja puoliaaltotasasuuntauksen takia n. $\pm 12,5 \text{ V}$ /9/. Pulssimuuntajan ohjauspiiri voidaan kytkeä pois päältä OUTPUT_ENABLE -signaalilla, joka on kytketty mikrokontrollerin lähtöön. R34 on tämän signaalin ylösvetovastus. C46 ja C37 ovat ohituskondenssattoreita ohjainpiirille ja pulssimuuntajalle.



Kuva 18. Galvaanisesti erotettu tehollähde transistorien ohjaukselle.

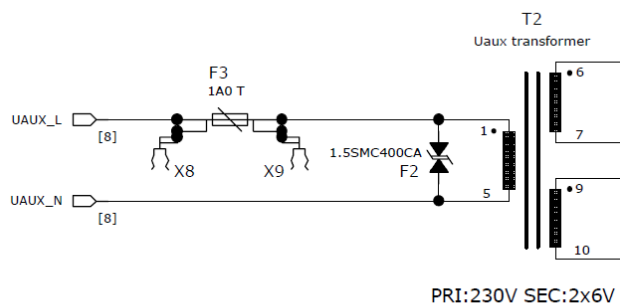
5.6 Suojakomponentit

MOSFET-transistorien hilat on suojattu liian suurelta positiiviselta tai negatiiviselta jännitteeltä kytkemällä sarjaan zeneriodit V9 ja V10 (**Kuva 19**). Transienttisuo-
jadiodi F1 suojaa MOSFET-transistoreja jännitepiikeiltä. Testattavan laitteen liian
suuren virran taas estää sulake F5. Lisäksi laitteen käyttöliittymässä ilmoitetaan
käyttäjälle, mikäli virta ylittää 2A. Tieto virran suuruudesta saadaan lukemalla vir-
tasensorin ulostulojännitteen arvoja A/D-muuntimen rekisteristä.



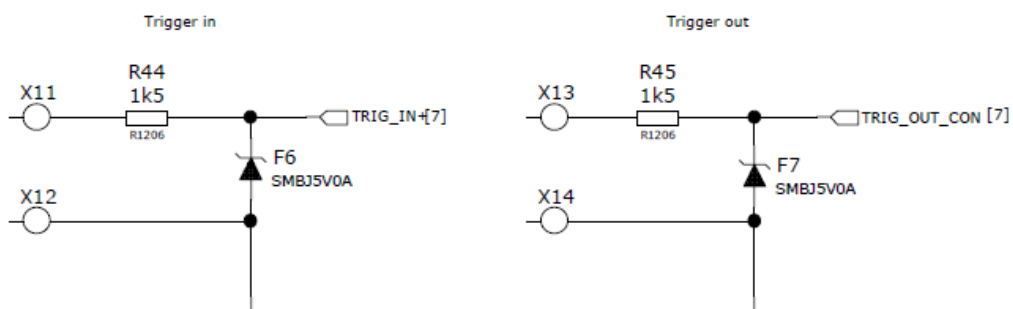
Kuva 19. Mosfet-transistorien suojakomponentit.

Laitteen verkkojännitesyötössä on ennen muuntajaa sulake F3, sekä transienttisuo-
jadiodi F2, joka suojaa laitetta hetkellisiltä ylijännitteiltä. F2 toimii myös siten, että
se suojaa muuntajaa jatkuvalta liian suurelta jännitteeltä, ja alkaa johtaa, jos jännite
ylittää 400V. F2 johtaessa sulake palaa nopeasti ja katkaisee virrankulun.



Kuva 20. Verkkojännitesyötön suojakomponentit.

Molemmat laitteen liipaisusignaalit on suojattu transienttisuojadiodeilla. F6 ja F7 alkavat johtaa, kun jännite ylittää 6,8V. Virtaa rajoittavat vastukset R44 ja R45. Myös USB-liitännässä on vastaavat transienttisuojadiodit.



Kuva 21. Liipaisusignaalien suojakomponentit.

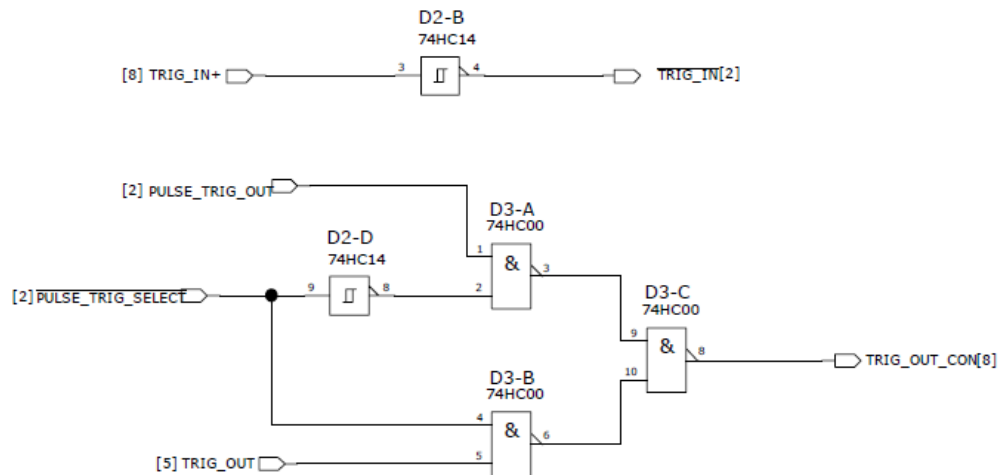
5.7 Liipaisusignaalit

5.7.1 Trigger in

Liipaisusignaalin sisääntulo on suunniteltu käytettäväksi 5V jännitteellä. Liittimenä käytetään koteloon kiinnitettävää BNC-liitintä, josta juotetaan johtimet piirikortille. Signaali on puskuroitu ja invertoitu ennen mikrokontrollerin tuloa Schmitt-liipaisin-toiminnolla varustetulla invertterillä D2 (**Kuva 22.**).

5.7.2 Trigger out

Liipaisusignaalin ulostuloksi voidaan valita joko mikrokontrollerilta tuleva lyhyt pulssi tai MOSFET-transistorien ohjaukseen käytetty signaali. Pulssisignaali valitaan asettamalla valintasiignaali PULSE_TRIG_SELECT alatilaa.



Kuva 22. Liipaisusignaalien piirikaaviokuva.

5.8 Piirikaavion ja piirikortin piirtäminen

Piirikaavion ja piirikortin piirtäminen tehtiin käyttäen PADS VX.2.3 -ohjelmistoa. Piirikaavio on jaettu usealle sivulle toiminnallisuuden mukaan, tällä tavoin piirikaaviosta saatiin helpommin luettava. Piirikortista suunniteltiin 4-kerroksinen, jolloin käyttöjännite ja maatasot saatiin omille kerroksilleen. Signaalivedot pyrittiin saamaan kokonaan kortin pintakerroksille, jotta sisäkerrokset saatiin dedikoitua käyttöjännitteille ja maatasolle. Tässä onnistuttiinkin melko hyvin ja sisäkerroksille jäi vain muutama lyhyt signaaliveto. Suuremman virran mahdollistamiseksi, testattavan laitteen virta kulkee kuitenkin kortin jokaisella kerroksella.

6 OHJELMISTON TOTEUTUS

6.1 Käytetty kehitysympäristö

Laitteen koko ohjelmisto on toteutettu C-kielellä käyttäen STMicroelectronicsin Atollic TrueSTUDIO -kehitysympäristöä ja CubeMX-konfiguraattoria. Ohjelmisto koostuu useista lähdekooditiedostoista. Kehitysalustana käytettiin STMicroelectronicsin NUCLEO-L152RE -kehitysalustaa, joka sisältää myös ST-Link -ohjelmointilaitteen mikrokontrollerille. /15/

6.2 Kytkeä/katkaisu

Kytkeä- ja katkaisuaian toteutus on tehty käyttäen kolmea eri aika-alueita. Jokaisella aika-alueella on oma säätöalue ja resoluutio. Alueet menevät osittain päällekkäin. Alueet on jaettu alla kuvatulla tavalla.

- High range
 - Säätöalue 1 ms – 2000 ms
 - Resoluutio 1 ms
- Mid range
 - Säätöalue 100 ms – 60 s
 - Resoluutio 100 ms
- Low range
 - Säätöalue 1 s – 48 h
 - Resoluutio 1s

6.2.1 Low range

Tarkin alue on toteutettu käyttämällä mikrokontrollerin ajastimen Output Compare-toimintoa. Signaalin tila invertoidaan, kun ajastimen laskuri saavuttaa määritellyn rekisterin arvon. Tämä rekisterin arvo lasketaan käyttäjän asettamasta katkos- tai kytkeäajasta. Tilan invertoinnin yhteydessä laskuri nollataan ja rekisteriin kirjoitetaan seuraava arvo.

6.2.2 Mid range

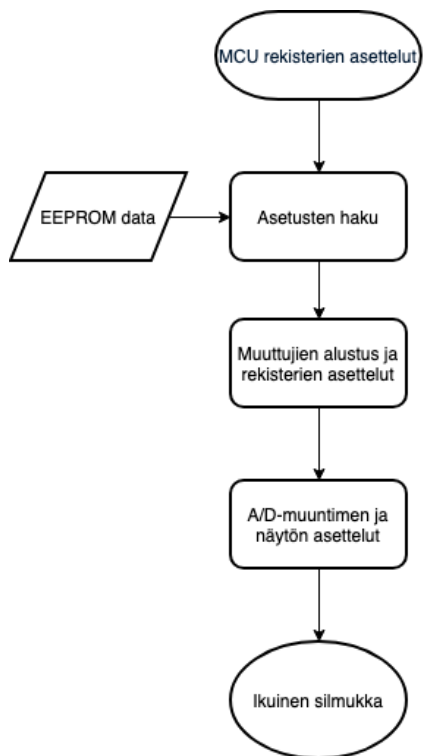
Keskimmäisen alueen toteutuksessa käytetään sisäistä ajastinta. Ajastimen laskuri nollataan, kun toiminta käynnistetään. Laskuri aiheuttaa keskeytyksen kun laskuri saavuttaa määritellyn rekisteriarvon. Signaalin tila invertoidaan aina kun tullaan keskeytysaliohjelmaan. Keskeytysaliohjelmassa asetetaan uusi rekisterin arvo käyttäjän asettaman katkosajan perusteella ja nollataan laskuri.

6.2.3 High range

Epätarkimman alueen toteutus on tehty käyttäen reaaliaikakelloa siten, että toiminnan käynnistyessä kellonaika nollataan. Haluttu katkosaika saadaan asettamalla reaaliaikakellon alarm-rekisterit käyttäjän asettamien asetusten mukaisiksi. Reaaliaikakellon kellonajan saavuttaessa alarm-rekisterin arvon, suoritetaan keskeytysaliohjelma, jossa signaalin tila invertoidaan.

6.3 Ohjelmalogiikka

Ohjelmassa tehdään ensimmäisenä mikrokontrollerin vaatimat rekisterien asettelut, jonka jälkeen luetaan asetukset EEPROM-muistista. Kun asetukset ovat muistissa, siirrytään tekemään kytkentää ja katkaisua varten tarvittavia rekisterien asetteluja ja muuttujien alustuksia. Viimeisenä suoritetaan AD-muuntimen ja näytön alkuasettelut. Kytkeentään ja katkaisuun liittyvät asettelut tehdään uudelleen, mikäli käyttäjä vaihtaa asetuksia valikosta tai toiminnan invertointiin tarkoitettua kei-nukytöntä.



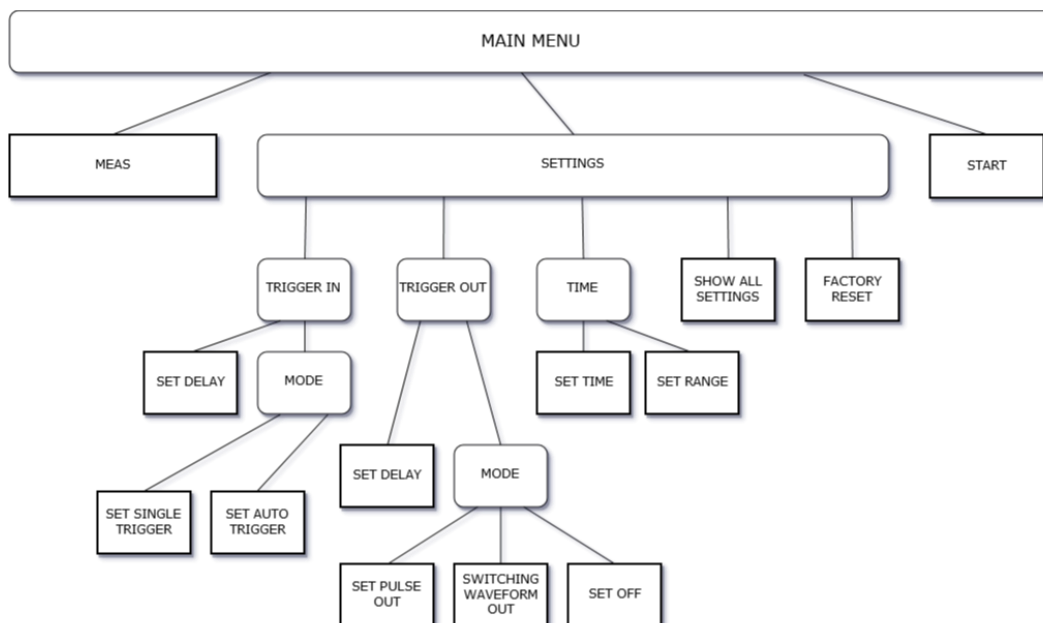
Kuva 23. Ohjelman init-koodin toiminta

Ohjelman ikuinen silmukka koostuu seitsemästä eri tilasta, joista yksi on valikkotila ja loput liittyvät virran kytkentään tai katkaisuun. Tiloja vaihdetaan keskeytysaliohjelmista, tai silloin kun käyttäjä valitsee valikkotilassa START-toiminnon.

6.4 Käyttöliittymä

6.4.1 Valikko

Ohjelmakoodin käyttöliittymäosio sisältää kaiken valikon navigointiin ja asetusten vaihtamiseen tarvittavan ohjelmakoodin. Valikko on järjestetty puumaisesti kuvan 24 mukaisesti.



Kuva 24. Käyttöliittymän valikkorakenne.

Kuvassa 24 tummennetuilla reunoilla varustettujen laatikoiden kohdalla suoritetaan funktio, kun käyttäjä painaa pulssi-enkooderin painiketta. Mikäli funktiota ei ole, siirrytään valikossa alaspäin. Laitteessa on myös erillinen ESC/BACK -painonappi, jolla voidaan siirtyä valikossa taaksepäin. Tätä painonappia painamalla voidaan myös peruuttaa käynnissä oleva katkos ja palata takaisin päävalikkoon.

Jos käytössä olevat asetukset ovat muuttuneet käynnistyksen jälkeen, ne kirjoitetaan mikrokontrollerin sisäiseen EEPROM-muistiin aina kun käyttäjä painaa START.

6.4.2 Katkaisuajan asettaminen

Laitteen katkaisu- tai kytkentäaika asetetaan laitteen TIME-valikosta. SET TIME-funktion näkymä riippuu valitusta alueesta. Aika asetetaan numero kerrallaan pulssi-enkooderia pyörittämällä. Seuraavaan numeroon siirrytään painamalla pulssi-enkooderin painiketta. Funktion suoritus lopetetaan jos käyttäjä painaa ESC/BACK -painonappia. Tällöin palataan takaisin TIME-valikkoon.

6.4.3 Liipaisusignaalien asetukset

Liipaisusignaalien viiveiden asetusfunktiot toimivat samankaltaisesti kuin kytkentä- ja katkaisuaajan asetusfunktiot. Myös näistä funktioista voi palata takaisin painamalla ESC/BACK-painonappia. Liipaisusignaalien MODE-asetusfunktiot yksinkertaisesti vaihtavat muistissa olevaa asetusta ja tulostavat näytölle tekstin, jossa kerrotaan asetuksen muuttuneen onnistuneesti.

6.5 Mittaukset

Mittauksiin liittyvä ohjelmakoodi koostuu A/D-muuntimen alustuskoodista, joka sisältää halutut alkuarvot A/D-muuntimen rekistereille. Suurinta osaa rekisterien arvoista ei ole tarvetta muuttaa ohjelman suorituksen aikana, joten ne voidaan määrittellä kiinteästi koodiin. Erilliset funktiot on toteutettu A/D-muuntimen kanavan vaihtamiselle ja mittausarvojen lukemiselle.

Ohjelmakoodissa on myös erikseen toteutetut apufunktiot jännitteen ja virran lukemiselle. Nämä funktiot palauttavat suoraan A/D-muuntimelta luetun virran tai jännitteen millivolteina ja milliampeereina. Mittaustulos kirjoitetaan merkkijonona parametrina saatuun muistiosoitteeseen.

Mittaustulokset näkyvät näytöllä aina kun laite ei ole valikkotilassa. Mittauksia voidaan myös seurata valikosta valitsemalla MEAS-toiminto. Mittaustulosten esittäminen näytöllä tapahtuu heti kun arvo on saatu luettua A/D- muuntimelta.

6.6 USB

USB-liittimeltä on piirikortilla kytketty datasiinaalit mikrokontrollerille, mutta ohjelmistoon ei ole toteutettu USB-kommunikaatiota. Mikrokontrolleri voidaan kuitenkin ohjelmoida USB-väylän kautta mikrokontrollerin sisältämän käynnistyslaatajan ansiosta.

6.7 Liipaisusignaalit

Laitteen asetuksista voidaan valita, tekeekö laite yksittäisen katkoksen vai peräkkäisiä katkoksia kunnes käyttäjä lopettaa toiminnan painamalla ESC/BACK-

painonappia. Ulkoinen liipaisutulo on ohjelmassa toteutettu siten, että signaalin nouseva reuna aiheuttaa keskeytyksen. Keskeytysaliohjelmassa käynnistetään kytkentä tai katkaisu asetetun viiveen jälkeen, mikäli laite on valikkotilassa ja päävalikossa. Ulkoista liipaisusignaalia ei voida käyttää peräkkäisten katkosten käynnistämiseen.

Liipaisusignaalin lähdölle voidaan valita asetuksista kaksi eri tilaa tai se voidaan kytkeä kokonaan pois käytöstä. Mikrokontrollerin liipaisulähdön tilaa vaihdetaan 1 ms ajaksi aina kytkennän tai katkoksen kohdalla, jos valittuna on PULSE-asetus. FOLLOW-tila on toteutettu suoraan piirikortille, joten se voidaan ohjelmallisesti kytkeä vain käyttöön tai pois käytöstä.

7 ELEKTRONIIKAN TESTAUS

7.1 Käyttöjännitteet

Laitteen sisäiset käyttöjännitteet testattiin kokoonpanon jälkeen ensin käyttämällä USB-jännitesyöttöä, ja tämän jälkeen myös verkkojännitesyötöllä. Mittaukset tehtiin valmiilta kortilta käyttäen yleismittaria. Mittaustulokset USB-syötöllä on esitettyinä taulukossa 1.

Taulukko 1. Käyttöjännitteiden mittaustulokset.

Käyttöjännite	5V	3V3	5V_ISO	OUT+	OUT-
Mittaustulos (V)	5,007	3,316	4,992	12,43	-12,54

7.2 Virrankulutus

Laitteen virrankulutus mitattiin USB-syötöllä ja tulokseksi saatiin käynnistyksen aikana suurimmillaan 135 mA. Suurin osa tästä virrasta menee laitteen näytölle, jonka virrankulutus, varsinkin käynnistymisen aikana, on melko suuri. Ennen näytön käynnistymistä virrankulutus on vain noin 80 mA.

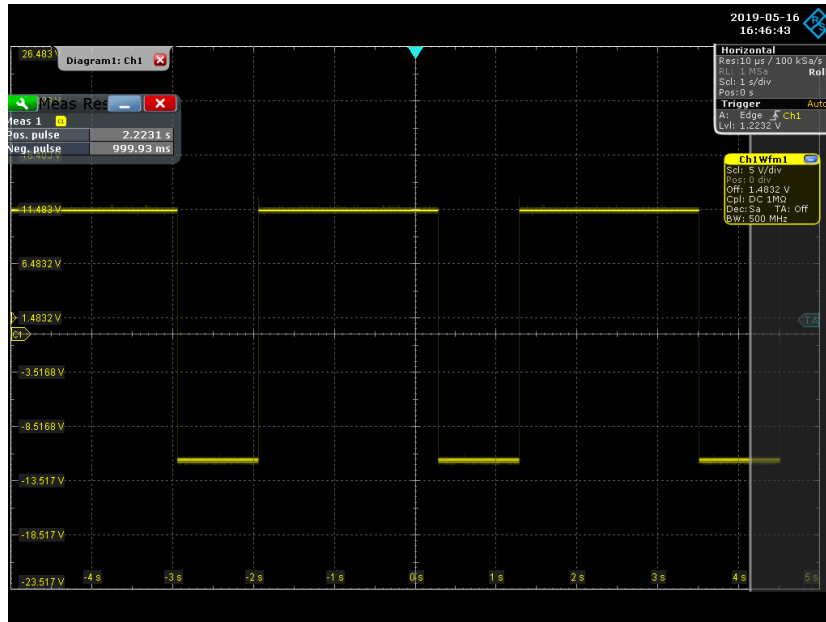
7.3 Mikrokontrollerin ohjelmointi

Mikrokontrollerin ohjelmointi onnistui suunnitellusti erillisellä ST-LINK/V2 -ohjelmointilaitteella. Ohjelmakoodista tuli kuitenkin muuttaa mikrokontrolleri käyttämään ulkoista 16MHz kellokidettä. Kehitysalustassa kellokidettä ei ollut, vaan kello oli generoitu erillisellä mikrokontrollerilla.

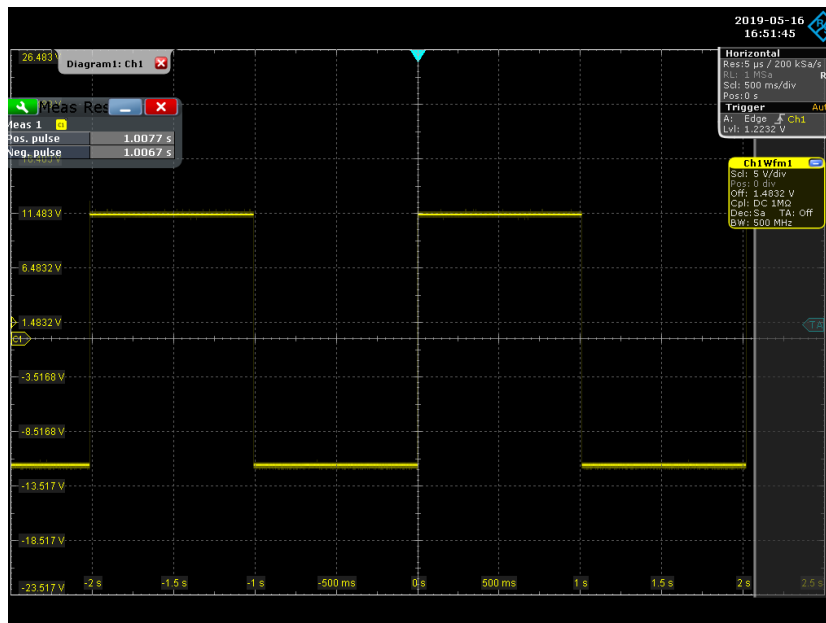
7.4 Kytkeä/katkaisu

Kytkeä ja katkaisun tarkkuutta testattiin mittaamalla MOSFET-transistorien ohjausta. Signaalit mitattiin kaikilla aika-alueilla MOSFET-transistorien hilalta oskilloskoopilla.

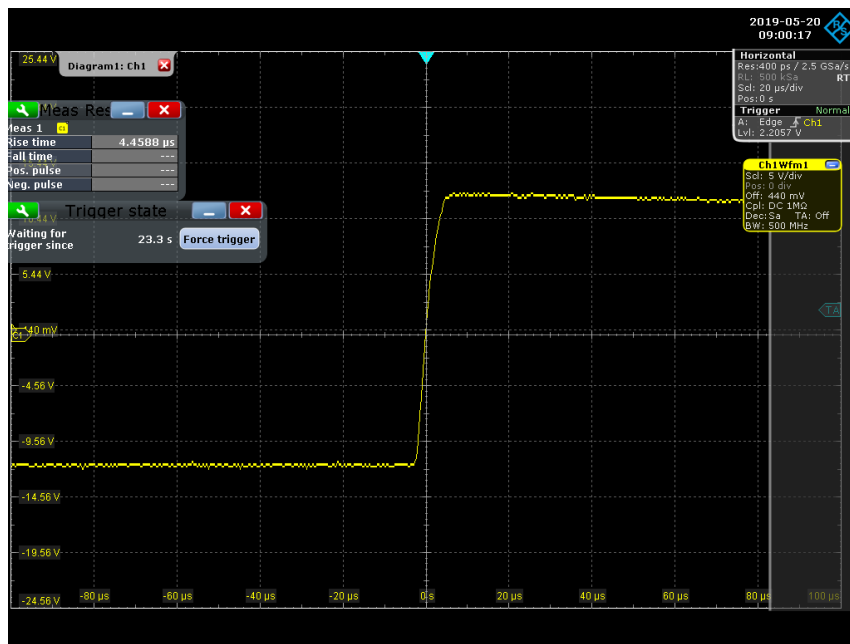
Kuvassa 25 on esitetty katkosajan tarkkuus epätarkimmalla alueella, kun asetus on 2s/1s. Kuvassa 26 on esitetty tarkkuus tarkimmalla alueella, kun asetus on 1s/1s. Myös ohjauksen nousu- ja laskuajat mitattiin samalla kertaa. Nousuaika on esitetty kuvassa 27 ja laskuaika kuvassa 28.



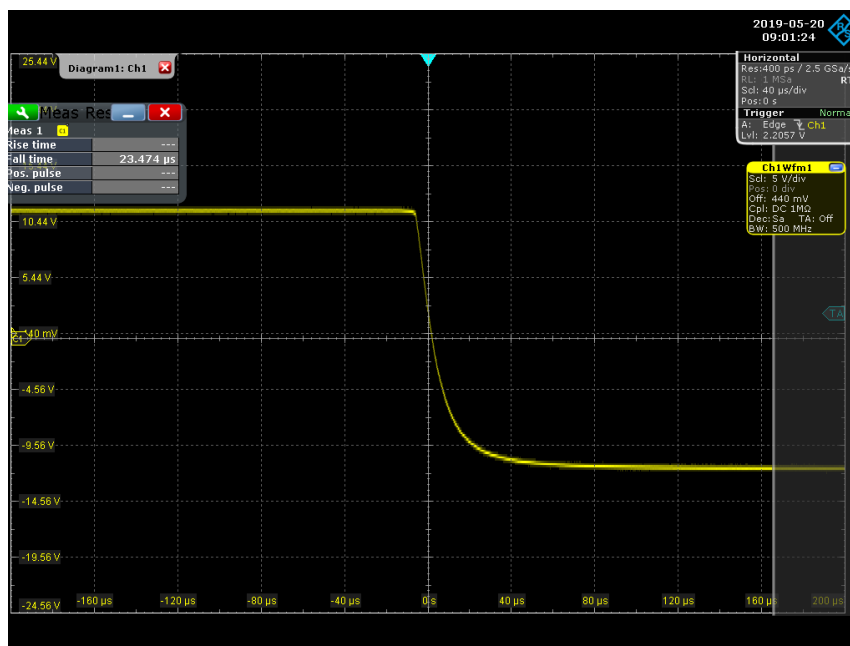
Kuva 25. Oskilloskooppikuva lähdön ohjauksesta (High range).



Kuva 26. Oskilloskooppikuva lähdön ohjauksesta (Low range).



Kuva 27. Oskilloskooppikuva lähdön ohjauksen nousuajasta.



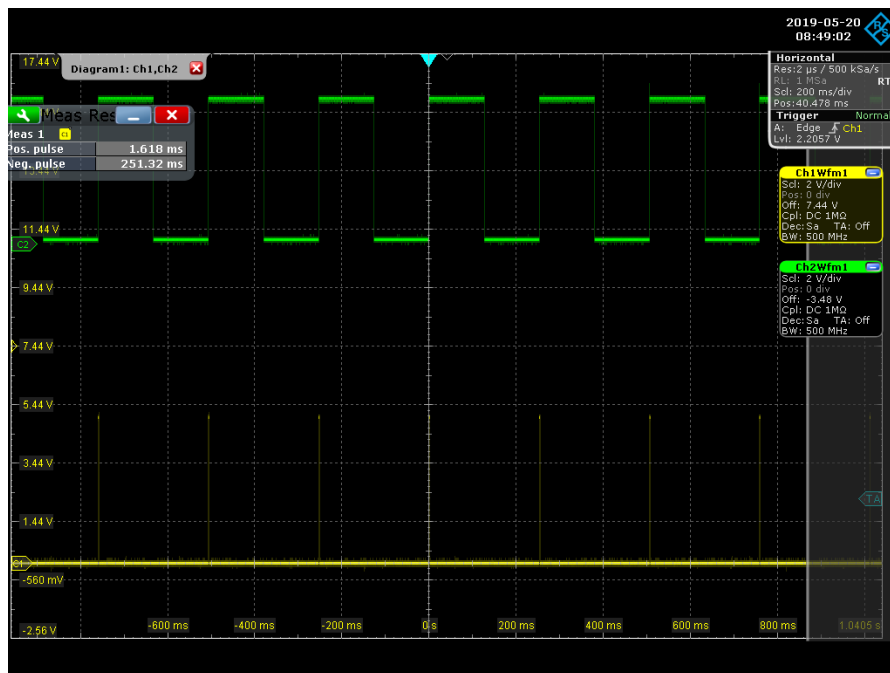
Kuva 28. Oskilloskooppikuva lähdön ohjauksen laskuajasta.

7.5 Mittaukset

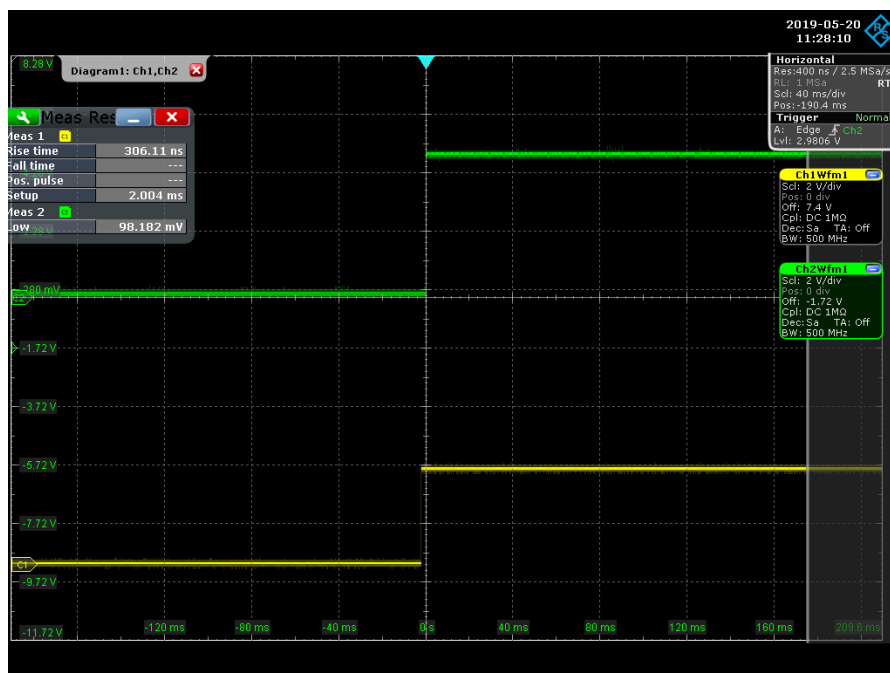
Mittausten testaus toteutettiin seuraamalla mittausarvoja näytöltä, kun laitteelle syötettiin tunnettua jännitettä ja virtaa. Mittausarvojen tarkkuutta pitää testien perusteella vielä parantaa. Ohjelmassa on vähän resursseja vaativat laskukaavat mitaustuloksille. Monimutkaisemmilla laskukaavoilla saataisiin kuitenkin tarkemmat tulokset.

7.6 Liipaisusignaalit

Liipaisusignaalin ulostulo testattiin kokeilemalla kaikkia eri asetuksia jokaisella aika-alueella. PULSE-tilassa pulssin pituus oli n. 1,3 ms. Ulostuleva signaali näkyy kuvassa 29 keltaisella. FOLLOW-tilassa signaali oli muuten odotettu, mutta signaalin tila oli invertoitu. Tämä johtui siitä, että signaalin invertoitumista ei oltu huomattu piirikaavion suunnitteluvaiheessa. Liipaisusignaalin sisääntulo toimi odotetusti ja käynnisti toiminnan kuten oli suunniteltu (**Kuva 30.**). Liipaisusignaalin ja toiminnan käynnistymisen välinen aika kuitenkin vaihteli paljon ja oli pienimmillään 1 ms ja suurimmillaan 35 ms. Ohjelmistoa pitääkin tämän osalta optimoida paremmaksi.



Kuva 29. Oskilloskooppikuva liipaisusignaalin ulostulosta.



Kuva 30. Oskilloskooppikuva sisääntulevasta liipaisusignaalista.

8 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin ohjelmitava puolijohdekytkin, jota voidaan käyttää lyhyiden ja pitkien sähkökatkosten simulointiin. Työ oli laaja ja sisälsi sekä elektroniikan että ohjelmiston suunnittelun ja toteutuksen. Huomattavan suuri osa työhön käytetystä ajasta meni ohjelmiston toteuttamiseen. Tuloksena oli toimiva laite, joka kuitenkin vaatii lisää testausta.

Ohjelmistoon ei aikataulun puitteissa saatu toteutettua kaikkia alun perin suunniteltuja ominaisuuksia, mutta suurin osa näistä ominaisuuksista on elektroniikan suunnittelun puolesta mahdollista toteuttaa myös jälkikäteen. Liipaisusignaaleille oli alun perin suunniteltu tehtäväksi enemmän asetuksia ja USB-kommunikaatiokin oli tarkoitus toteuttaa. Projektin edetessä havaittiin kuitenkin että aika ei riitä näiden ominaisuuksien toteuttamiseen. Myös laitteen kotelointi jäi aikataulussa pysymisen vuoksi vielä toteuttamatta.

Ohjelmistoa voidaan myöhemmin laajentaa lisäämällä USB-kommunikaatio ja esimerkiksi mittaustulosten tallentaminen ja siirtäminen tietokoneelle. Myös liipaisusignaaleihin on jälkikäteen helppo lisätä uusia ominaisuuksia ohjelmistoa laajentamalla. Ohjelmiston toteutuksessa laitteeseen jäi joitakin asetuksia, joille on asetukset ohjelmakoodissa mutta niitä ei voi vaihtaa laitteen käyttöliittymästä. Tällainen on esimerkiksi liipaisutulon aktiivisen reunan muuttaminen, joka tulisikin toteuttaa käyttöliittymään, jos ohjelmistoa laajennetaan.

LÄHTEET

/1/ STMicroelectronics. 2017 STM32L151xE STM32L152xE datasheet. Viitattu 16.5.2019.

<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l152re.pdf>

/2/ LEM. 2017 Current Transducer LTS 6-NP. Viitattu 16.5.2019

https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lts_6-np.pdf

/3/ HALO Electronics. 2015. 3kVrms DC/DC Converter. Viitattu 16.5.2019

<https://www.haloelectronics.com/pdf/discrete-dc2dc-6pin3kv.pdf>

/4/ Solid State Optronics. 2014. Application Note, Solid State Relays vs. Electro-mechanical Relays. Viitattu 19.5.2019

<http://www.ssousa.com/application-notes/>

[AppNote040_Solid-State-Relays-vs-Electromechanical-Relays.pdf](http://www.ssousa.com/application-notes/AppNote040_Solid-State-Relays-vs-Electromechanical-Relays.pdf)

/5/ Texas Instruments. 2015. AMC1200/B Fully-Differential Isolation Amplifier. Viitattu 19.5.2019.

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1200.pdf>

/6/ STMicroelectronics. 2011. STW77N65M5 datasheet. Viitattu 19.5.2019

<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stw77n65m5.pdf>

/7/ Analog Devices. 2007. AD7792/AD7793 datasheet. Viitattu 19.5.2019.

[https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7792_7793.pdf)

[data-sheets/AD7792_7793.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7792_7793.pdf)

/8/ Texas Instruments. 2016. LM4040-N/-Q1 Precision Micropower Shunt Voltage Reference. Viitattu 19.5.2019.

[http://www.ti.com/lit/ds/symlink/](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4040-n.pdf)

[lm4040-n.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4040-n.pdf)

/9/ Maxim Integrated. 2015. MAX253 Transformer Driver for Isolated RS-485 In-

terface. Viitattu 19.5.2019. [https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/](https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX253.pdf)

[MAX253.pdf](https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX253.pdf)

/10/ Texas Instruments. 2016. LP2985-N Micropower 150-mA Low-Noise Ultra-

Low-Dropout Regulator. Viitattu 19.5.2019. [http://www.ti.com/lit/ds/](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp2985-n.pdf)

[symlink/lp2985-n.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp2985-n.pdf)

/11/ Texas Instruments. 2013. LP3853/LP3856 3A Fast Response Ultra Low

Dropout Linear Regulators. Viitattu 19.5.2019. [http://www.ti.com/lit/ds/](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp3856.pdf)

[symlink/lp3856.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp3856.pdf)

/12/ Texas Instruments. 2016. TPS20xxB Current-Limited Power-Distribution

Switches. Viitattu 19.5.2019. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps2041b.pdf>

/13/ Hammond Manufacturing. 2019. Diecast Aluminum Enclosures 1590 Series.

Viitattu 19.5.2019. [https://www.hamfmg.com/electronics/small-case/](https://www.hamfmg.com/electronics/small-case/diecast/1590.pdf)

[diecast/1590.pdf](https://www.hamfmg.com/electronics/small-case/diecast/1590.pdf)

/14/ Armstrong, K. REO Guide to DC Supply Voltage Dips, Short Interruptions and Variations EN61000-4-29. Viitattu 19.5.2019. http://www.reo.co.uk/files/reo_guide_to_dc_supply_voltage_dips_short_interruptions_and_variations_en61000-4-29.pdf

/15/ STMicroelectronics. 2019. STM32 Nucleo-64 boards Data brief. Viitattu 19.5.2019. https://www.st.com/resource/en/data_brief/nucleo-1152re.pdf

/16/ Phillips Semiconductors. 1991. Power semiconductor applications.

/17/ Pressman, A, I. 1998. Switching power supply design - 2nd ed. McGraw-Hill.

/18/ Vishay Semiconductors. 2015. VOS618A datasheet. Viitattu 22.5.2019. <https://www.vishay.com/docs/83465/vos618a.pdf>