

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikka

Elektroniikkasuunnittelu

2014

Anssi Sundberg

# AURINKOSÄHKÖ PIENELEKTRONIIKKASSA

– laitesuunnittelu ja aurinkopaneelin mitoittaminen



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikka | Elektroniikkasuunnittelu

Kevät 2014 | 40

Ohjaaja: TkT Timo Tolmunen

Anssi Sundberg

## AURINKOSÄHKÖ PIENELEKTRONIIKASSA

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin ja kehitettiin aurinkosähköllä toimivia elektroniikkalaitteita. Työssä käsiteltiin aurinkopaneelin mitoittamiseen vaikuttavia tekijöitä, aurinkosähkön regulointia ja rakennettiin prototyyppisiä aurinkopaneelia teholähteenä käyttäviä laitteita. Opinnäytetyön tarkoitus oli määrittää raja-arvot aurinkopaneelin mitoittamiseen ja rakentaa toimivat prototyypit aurinkovoimaa käyttäviä pienelektroniikkalaitteita.

Sääolojen vaihtelut vaativat aurinkopaneelin tehon ylimitoitusta, jotta se voi tuottaa tarpeeksi tehoa optimiolosuhteiden ulkopuolella. Pilvet ja auringon säteilykulman pienentyminen vaimentavat auringosta saatavaa säteilytehoa. Säteilyn vaimentumisen määrittämiseen käytettiin pilville tehtyjä meteorologisia tutkimustuloksia uv-säteilystä.

Työssä suunniteltuihin elektroniikkalaitteisiin kuuluivat hakkuritekniikalla toteutettu 12 V:n jänniteregulaattori, matkapuhelimen latauslaite, AA-akkujen latauslaite, ladattava akuilla toimiva matkapuhelimen latauslaite ja kaksi erilaista aktiivikauitinta. Jänniteregulaattorille ja ladattavalle matkapuhelinlaturille suunniteltiin piirilevyt, ja muut laitteet rakennettiin reikälevylle.

Kaikki työn prototyypit saatiin toimimaan. Aurinkopaneelin jänniteregulaattorilla saavutettiin 90 %:n hyötysuhde. Matkapuhelinlaturi toimi usean valmistajan älypuhelimien yhtäaikaisessa latauksessa. Aurinkopaneelin maksimimitoitustarpeen todettiin olevan noin nelinkertainen kuormalaitteen tarvitsemaan tehoon verrattuna. Vaadittu toiminta-alue, paneelin hinta ja koko ratkaisevat lopullisen ylimitoituksen. Aurinkopaneelin mitoittamiseen ei saatu tarkkoja raja-arvoja käytettyjen tutkimustulosten luonteen takia, joten tutkimusta sääolojen vaikutuksesta piipohjaisten aurinkokennojen tehontuottoon voisi vielä jatkaa.

Opinnäytetyön tulokset osoittavat että oikein mitoitetut aurinkopaneelit soveltuvat yksinään pienelektroniikan teholähteiksi, ja että korkeiden hyötysuhteiden saavuttaminen on mahdollista.

ASIASANAT:

fotojännite, aurinkopaneeli, hakkuri, laturi

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Electronics Design

Spring 2014 | 40

Instructor: Timo Tolmunen, D.Sc. (Tech)

**Anssi Sundberg**

## SOLAR POWER IN ELECTRONICS

The purpose of this bachelor's thesis was to study and develop electronic devices powered by photovoltaic systems. The work consisted of determining the factors for measuring a solar panel for a known load, regulation of solar panel, and designing and building electronic devices which can be solely powered by a solar panel.

The changes in weather conditions require over-measuring the power of a solar panel, for it to be able to produce enough electricity outside of optimal conditions. Clouds, and the decreasing angle between the sun and the horizon, both attenuate the solar radiation which reaches the ground. Meteorological studies of clouds and UV radiation were used to determine the factors for the total attenuation.

The electronic devices designed in this thesis consisted of a 12 V switching regulator, mobile phone charger, AA battery charger, chargeable mobile phone charger, and two different active speakers. Printed circuit boards were designed for the voltage regulator and chargeable phone charger, and the rest of the devices were built on a breadboard.

All the prototype devices worked as planned. An efficiency of 90 % was achieved with the voltage regulator. The mobile phone charger worked with different smart phone models of several manufacturers. The maximal over-measuring factor for the solar panel was determined to be about four times the power of what is needed for the load. Exact limit values for the measuring of a solar panel could not be determined with certainty, due to the nature of the research data that was used. Therefore, the study on the effects of weather on silicon based photovoltaic cells could be continued.

The results of this thesis show that correctly measured solar panels can be used as the sole power supplies of small electronic devices, and that it is possible to achieve high efficiencies.

### KEYWORDS:

photovoltaic, solar panel, switching power supply, battery charger

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2 AURINKOENERGIA</b>	<b>2</b>
2.1 Aurinkopaneelin hyötysuhde ja teho	2
2.2 Aurinkosähkösovellukset	4
2.3 Aurinkopaneelin mitoittaminen tasasähkösovelluksille	4
2.3.1 Ilmamassan vaikutus	5
2.3.2 Sääolosuhteiden vaikutus	6
2.3.3 Aurinkopaneelin ylimitoittaminen	7
<b>3 JÄNNITEREGULOINTI</b>	<b>9</b>
3.1 Lineaarinen regulointi	9
3.2 Hakkurit	9
3.2.1 Boost-hakkuri	10
3.2.2 Buck-hakkuri	11
<b>4 AURINKOPANEELIN JÄNNITEREGULAATTORI</b>	<b>12</b>
4.1 Regulaattorin suunnittelu	12
4.1.1 Buck-hakkuri LM2599	12
4.1.2 Ideaalinen diodi LTC4357	13
4.2 Regulaattorin toteutus	13
4.3 Regulaattorin laskut	16
4.4 Regulaattorin testaus	16
<b>5 MATKAPUHELINLATURI</b>	<b>18</b>
5.1 Älypuhelinten latausstandardi	18
5.2 Buck-hakkuri LM2670	18
5.3 Matkapuhelinlaturin toteutus	19
5.4 Matkapuhelinlaturin testaus	20
<b>6 AA-AKKULATURI</b>	<b>22</b>
6.1 Nikkelimetallihydridiakku (NiMH)	22
6.2 MAX712 toimintaperiaate ja mitoitukset	22
6.3 Akkulaturin toteutus	23

6.4 Akkulatorin teho ja hyötysuhde	25
6.5 NiMH-akkulatorin testaus	25
<b>7 LADATTAVA MATKAPUHELINLATURI</b>	<b>27</b>
7.1 Boost-hakkuri LM2621	27
7.2 Virtareittiohjain LTC4412	28
7.3 Ladattavan matkapuhelinlaturin toteutus	28
7.4 Ladattavan matkapuhelinlaturin testaus	31
<b>8 AUDIOVAHVISTIN</b>	<b>33</b>
8.1 Audiovahvistinpiirit LM386N-4 ja LM380	33
8.2 Stereosoitin	33
8.2.1 Stereosoittimen toteutus	33
8.2.2 Stereosoittimen testaus	35
8.3 Monosoitin	36
8.3.1 Monosoittimen toteutus	36
8.3.2 Monosoittimen testaus	37
<b>9 YHTEENVETO</b>	<b>38</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>39</b>

## SYMBOLIT JA LYHENTEET

$f$	Taajuus
$C$	Kapasitanssi; akun purku- tai latausvirran suhde kapasiteettiin
$C_{\text{out}}$	Ulostulon jännitteentasauksen kapasitanssi
$D$	Hakkurin kytkimen toimintajakso (Duty Cycle)
$I$	Virta; valosäteilyn intensiteetti
$I_{\text{SW(max)}}$	Hakkurin komponenttien huippuvirta
$L$	Induktanssi
$P_{\text{mpp}}$	Aurinkopaneelin maksimitehon toimintapiste (Maximum power point)
$U$	Jännite
$U_{\text{in}}$	Tulojännite
$U_{\text{oc}}$	Aurinkokennon avoimen piirin jännite
$U_{\text{out}}$	Ulostulojännite
$\eta$	Hyötysuhde
$\Delta I_L$	Kelan hurinavirta
$\Delta U_{\text{out}}$	Ulostulon hurinajännite
$AM$	Ilmamassa (Air Mass)
Boost	Jännitettä nostava hakkuritopologia
Buck	Jännitettä laskeva hakkuritopologia
DCP	USB-latausstandardin matkapuhelimen tunnistusmenetelmä (Dedicated Charging Port)

EMC	Sähkömagneettinen yhteensopivuus (Electromagnetic Compatibility)
LED	Hohtodiodi (Light Emitting Diode)
MOSFET	Eristehilakanavatransistori (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
NDV	Napajännitteen muutosta seuraava akkujen lataustekniikka (Negative Delta V)
NiCd	Nikkelikadmium
NiMH	Nikkelimetallihydridi
Okta	Pilvien suhteellinen määrä taivaalla kahdeksasosissa
STC	Aurinkopaneelien testausstandardi (Standard Test Conditions)
USB	Sarjaväyläarkkitehtuuri tietokoneen oheislaitteille (Universal Serial Bus)

# 1 JOHDANTO

Aurinkosähkö yleistyy kuluttajien keskuudessa. Suurin osa käytössä olevista aurinkosähkösovelluksista on kotitalouksille ja yrityksille suunnattu verkkosähköön kytkettävä järjestelmä, joka maksaa itsensä takaisin pienentämällä sähkölaskua. Toinen kaupallisesti huomattava kohde on kesäasuntojen sähköistäminen aurinkovoimalla, jossa sähkö varastoidaan akkuihin. Aurinkopaneelia voi käyttää myös suoraan hyötykuorman tehollähteenä, mikä oli lähtökohtana tätä opinnäytetyötä tehtäessä.

Kulutuselektroniikasta löytyy useita sellaisia teholuokan sovelluksia, jotka voivat saada käyttöjännitteensä suoraan aurinkopaneelistä. Esimerkki tällaisista sovelluksista joita on jo kuluttajien saatavilla, ovat matkapuhelimen latauslaitteet.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli määritellä sääolosuhteisiin mukautuvat raja-arvot aurinkopaneelin mitoittamiseen kuormalle. Sen lisäksi suunniteltiin ja rakennettiin jänniteregulaattori, matkapuhelinlaturi, AA-akkulaturi, ladattava matkapuhelinlaturi ja kaksi erilaista aktiivikautinta, jotka kaikki toimivat aurinkosähköllä.

Vastaavia opinnäytetöitä aurinkopaneelien käytöstä suoraan hyötykuorman tehollähteenä ei ole aikaisemmin tehty. Työn painotus oli elektroniikkalaitteiden suunnittelussa, prototyyppien rakentamisessa ja testaamisessa. Näissä huomiota kiinnitettiin mm. piirilevy-suunnitteluun ja laitteiden hyötysuhteisiin.

Työn toisessa osassa käydään läpi aurinkosähkön perusteita, sääolojen vaikutusta aurinkopaneelistä saatavaan tehoon ja aurinkopaneelin mitoittamista kuormalle. Kolmannessa osassa käsitellään jänniteregulaatiota ja sitä, mikä tekniikka sopii aurinkopaneeleille. Tämän jälkeen esitellään yksi kerrallaan työssä suunnitellut aurinkosähkökäyttöiset elektroniikkalaitteet.



## 2 AURINKOENERGIA

Aurinkosähkö perustuu ranskalaisen fyysikon Edmond Becquerelin vuonna 1839 löytämään ja nimeämään "valosähköiseen ilmiöön" (photovoltaic effect), jonka Albert Einstein selitti vuonna 1905. Ilmiö tarkoittaa sähkömagneettisen säteilyn puolijohdemateriaaliin tuottamaa jännitettä ja sähkövirtaa. [1][2]

Aurinkokennon yleisin materiaali on monikiteinen pii (Si), josta tehdään *pn*-puolijohdeliitos seostamalla sitä eri alkuaineilla. Valohiukkasen (fotonin) osuessa aurinkokennoon syntyy *pn*-liitoksessa elektroni-aukkopareja, rajapinnalle muodostuu sähkökenttä ja elektronit voivat kulkea vai tiettyyn suuntaan. Tällä tavalla syntyy sähkövirta suljettuun piiriin, ja kenno voi toimia ulkoisen piirin jännitelähteenä. [2][3][4]

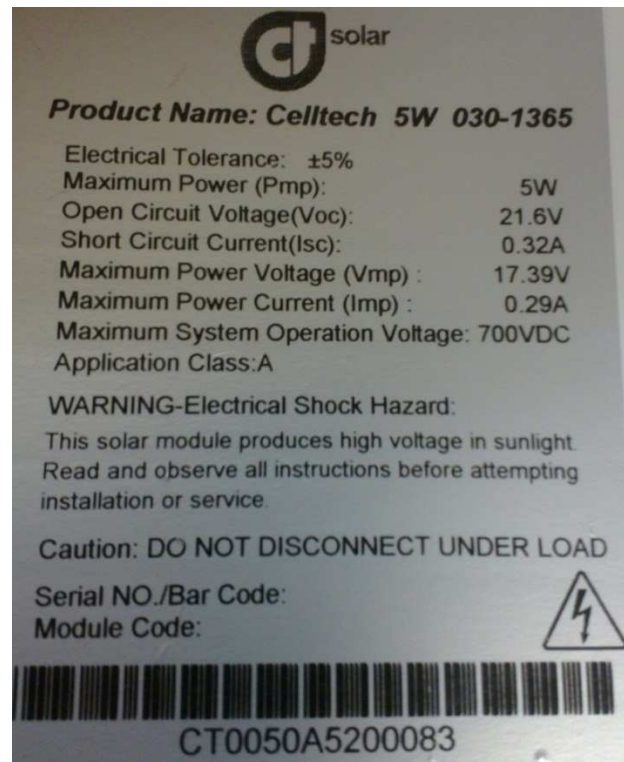
Yhden kennon antama jännite ( $U$ ) on seostuksesta riippuen 0,5...0,6 V [3][4]. Kaupallisten paneelien nimellisjännite on yleensä n. 18 V. Virta ( $I$ ) vaihtelee toimintapisteessä paneelin koosta ja maksimitehosta riippuen 1 A:n molemmin puolin.

### 2.1 Aurinkopaneelin hyötysuhde ja teho

Piipohjaisten aurinkokennojen teoreettinen hyötysuhde ( $\eta$ ) on 31 % auringonvalon muuttamisessa sähköksi. Kuitenkin hyötysuhdetta huonontavat erilaiset tekijät, kuten valon heijastuminen paneelin pinnalta, johteiden liitokset ja resistanssi. Kaupallisten paneelien todelliset hyötysuhteet ovat parhaimmillaan 18 %:n luokkaa. [4]

Aurinkopaneeli ei ole vakiojännitelähde. Paneelin ominaiskäyrä ilmoittaa virran ja jännitteen suhteen toisiinsa. Tehon maksimi on kompromissi jännitteen ja virran huippujen välillä. Kuormittamattoman paneelin avoimen piirin jännite  $U_{oc}$  (open circuit) voi olla useamman voltin verran suurempi kuin maksimitehopisteen jännite [5]. Kuormituksen kasvaessa jännite laskee. Paneelin valmistaja ilmoittaa paneelin maksimitehon toimintapisteen  $P_{mpp}$  (maximum power point) virran ja jännitteen arvon, josta voi laskea kyseisen paneelin optimikuorman. Esimerkiksi toimintapisteellä  $U = 18$  V ja  $I = 2$  A maksimiteho 36 W saadaan paneelista 9  $\Omega$ :n kuormalla. Raskaammalla kuormalla (pienempi resistanssi) paneelin jännite laskee, ja kevyemmällä kuormalla (suurempi resistanssi) paneeli tuottaa vähemmän virtaa. Kummassakaan tapauksessa paneelilla ei päästä aivan maksimitehoon.

Paneelin valmistajan ilmoittamat spesifikaatiot (Kuva 1) perustuvat STC-standardiin (Standard Test Conditions), joka tarkoittaa, että paneelin huipputeho on määritetty valon säteilyteholla  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ ,  $25\ ^\circ\text{C}$ :n lämpötilassa ja ilmamassan (*AM*, Air Mass) kertoimella 1,5. [5]



Kuva 1. Valmistajan ilmoittamat CT 030-1365 -aurinkopaneelin tekniset tiedot.

Säteilyteho  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$  on yleinen keskiarvo auringon maahan säteilemästä tehosta suhteessa pinta-alaan. Säteilyteho neliometriä kohti on suurempi auringon paistaessa maahan suoraan zeniitistä ja pienempi kun aurinko paistaa matalalta. [6]

Testausolosuhteiden lämpötila-arvo  $25\ ^\circ\text{C}$  on optimaalinen piikenneille. Lämpötilan muutos vaikuttaa heikentävästi piistä valmistettujen paneelien tuottamaan tehoon. Hyötysuhde pienenee noin  $0,45\ \%/K$ . [5]

*AM*-kerroin kertoo ilmamassan suhteen. Osa auringon säteilytehosta absorboituu ilmaan, ja mitä matalammalta aurinko paistaa, sitä suurempi osa absorboituu. Lisäksi ilmassa tapahtuu valon hajontaa. Ilmamassan arvo 1,5 vastaa Keski-Euroopan (leveysaste  $41,8^\circ$ ) olosuhteita siinä, kuinka paksun ilmakerroksen läpi auringon säteily keskimäärin kulkee, ennen kuin osuu maahan. Etelä-Suomessa (Turun leveysaste  $60^\circ\ 27'$ ) *AM*-kerroin on n. 2,0. [4]

Optimikulma paikalleen asennettaville, staattisille paneeleille on Suomessa 30°...40°. Jos paneeli pystytään suuntaamaan aurinkoon, ilmassa ja sääolosuhteet ovat ainoat aurinkosta saatavaan tehoon vaikuttavat tekijät. Paras teho aurinkopaneelistä saadaan keskipäivällä kirkkaalla ilmalla, kun paneeli on suunnattuna kohtisuorassa kulmassa aurinkoon. [4][6]

## 2.2 Aurinkosähkösovellukset

Kaupallisesti aurinkopaneeleita markkinoidaan lähinnä kotitalouksille kytkettäväksi sähköverkkoon. Järjestelmä vaatii paneeleille lisälaitteita, kuten invertterin (DC-AC-konvertteri). Sähköverkon ulkopuolella järjestelmä vaatii lisäksi akkuja, jotka latautuvat ja purkautuvat sähkön tuoton ja kulutuksen mukaan. Tällaiset järjestelmät vaativat huomattavaa rahallista investointia, ja niiden takaisinmaksuajat ovat pitkiä.

Aurinkosähkön tasasähkösovellukset vaativat vähemmän elektroniikka toimiakseen kuin vaihtosähkösovellukset. Kaupallisina sovelluksina tällaisia ovat esimerkiksi LED-pihavalot, jotka lataavat päivällä akkuja aurinkopaneeleilla ja valaisevat yöllä.

Kokoluokaltaan kannettavat aurinkopaneelimallit (3...30 W) pystyvät tuottamaan tarpeeksi sähköä sovelluksille, kuten matkapuhelinlaturi ja aktiivikaiutin. Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin ja toteutettiin tämän teholuokan aurinkosähkön jännitteen regulointi ja sovelluksia, jotka ovat myös kaupallistettavissa.

## 2.3 Aurinkopaneelin mitoittaminen tasasähkösovelluksille

Ilman akkuja toimivat sovellukset vaativat aurinkopaneelilta jatkuvasti riittävästi tehoa toimiakseen, koska sähkö ei varastoidu mihinkään. Sovelluksen suunnitteluvaiheessa tarvitsee mitoittaa teholtaan oikean kokoluokan aurinkopaneeli. Mitä lähempänä laitteen vaatimaa tehoa paneelin maksimiteho on, sitä pienemmät valon määrän säätelemät käyttömahdollisuudet sille tulee, ja sitä tärkeämpää on paneelin suuntaaminen suoraan aurinkoa kohti. Kun paneeli on mitoitettu yli vaaditun tehon, se pystyy tuottamaan laitteen vaatiman sähkön myös pilvisellä säällä tai auringon paistaessa matalalta.

### 2.3.1 Ilmamassan vaikutus

Auringon säteilyteho on lähellä horisonttia pieni, koska ilmakehä absorboi säteilyä. Auringon korkeuskulman pienentyessä ilmamassan arvo kasvaa, ja absorptio kasvaa. Auringon korkeuskulman vaikutus säteilyn intensiteettiin  $I$  voidaan laskea kokeellisesti määritellystä yhtälöstä [6]:

$$I = 1100 \cdot e^{\frac{-0,17}{\sin(a)}} \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (1)$$

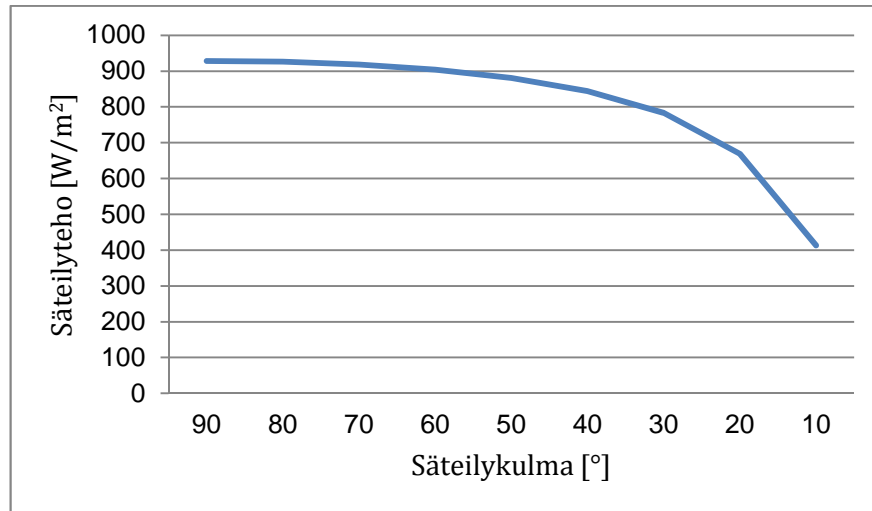
missä  $a$  on auringon korkeuskulma horisontin yläpuolella.

Kaavaa käyttämällä laskettiin auringon säteilytehon muutos auringon säteilykulman muuttuessa zenitistä pienemmäksi kymmenen asteen välein. Taulukossa 1 tulokset on esitetty suhteessa STC-standardin mukaiseen  $1000 \text{ W/m}^2$ .

**Taulukko 1.** Säteilytehon laskennallinen arvo auringon eli korkeuksilla ja vertailu suhteessa arvoon  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Säteilykulma [°]	Teho [W/m <sup>2</sup> ]	Suhde $1000 \text{ W/m}^2$ [-%]
90	928	7,2
80	926	7,4
70	918	8,2
60	904	9,6
50	881	11,9
40	844	15,6
30	783	21,7
20	669	33,1
10	413	58,6

Korkeilla kulmilla säteilytehon vaimeneminen ei ole huomattavaa. Kuvasta 2 nähdään, että vaimennus suhteessa  $1000 \text{ W/m}^2$ :een pysyy alle 10 %:n  $60^\circ$ :seen asti.  $30^\circ$  alempana teho pinta-alaa kohti laskee jyrkästi. Lisäksi näin matalalta paistaessaan auringon tielle voi helposti tulla esteitä, kuten puita ja rakennuksia. Fyysiset esteet käytännössä estävät riittävän valonsaannin.



Kuva 2. Auringon säteilytehon vaimentuminen auringon säteilykulman suhteessa.

Aurinkopaneelin suuntaaminen suoraan aurinkoon kompensoi säteilytehon vähenemistä pinta-alaa kohti, joten paneelin ylityöntäminen auringon korkeuskulman vaihtelun takia ei ole niin suuri kuin tehon suhteen muuttuminen  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$  suhteen (esim. 15,6 % tulokulmalla  $40^\circ$ ). Ilmakehän absorptiota ei kuitenkaan voida välttää, ja se vaikuttaa paneelin ylityöntästarpeeseen. Ilman absorptioon vaikuttavan vaikutuksen teoreettinen määrittäminen on hankalaa monen muuttujan takia, eikä sitä tehty tässä opinnäytetyössä.

### 2.3.2 Sääolosuhteiden vaikutus

Pilvillä on merkittävä vaikutus maahan asti saapuvaan säteilyyn. Pilvet heijastavat, absorboivat ja taittavat säteilyä [7]. Pilvisyyden ollessa vähäistä pilvien hajasäteilyn takia tietysti paikassa säteily voi olla jopa voimakkaampaa kuin kirkkaalla säällä. Taivaan ollessa kokonaan pilvessä suurin osa säteilystä on hajasäteilyä. Vaimennuksen voimakkuus riippuu pilvisyyden määrästä, pilvityypistä ja sen paksuudesta [7][8]. Tarkkoja tutkimustuloksia auringonsäteilyn jakautumisesta vuorokauden ajoille, kuukauden päville ja eri kuukausille on saatavissa, mutta hetkellistä vaikutusta on vaikeampi määrittää pilvien vaihtelevuuden takia, eikä tutkimuksia ole suoraan erilaisten pilvityyppien hetkellisistä vaikutuksista maahan tulevaan säteilytehoon.

Maahan tuleva säteily vaimenee huomattavasti runsaalla pilvisyydellä. Ruotsissa tehty tutkimus kertoo ultraviolettisäteilyn vaimentumisesta pilvissä: Vallitsevan pilvityypin ollessa sekä ala- että keskipilveä ilman sadantaa maahan tuleva kokonaissäteily

(300...3 000 nm) vaimenee 6 oktalla keskimäärin 0,7-kertaiseksi, 7 oktalla 0,5-kertaiseksi ja 8 oktalla (taivas täysin pilvessä) 0,25-kertaiseksi 1:een oktaan eli lähes pilvettömään säähän verrattuna. Sadepilvet vaimentavat säteilyä enemmän kuin poutapilvet, mutta niitä ei otettu huomioon, koska opinnäytetyössä suunniteltuja laitteita ei tehty kestäväksi sadetta. [8]

Pilvien vaimentava vaikutus on piikentöjen absorptioalueella (400...1100 nm) suurempaa suhteessa uv-säteilyyn, koska näkyvän ja infrapuna-alueen säteily on matalataajuisempaa [4][7]. Toisaalta pilvien vaimentama säteily ei lämmitä aurinkopaneelia niin paljon kuin suora auringonpaiste. Viileämpi paneelin pysyy todennäköisemmin lähempänä optimaalista lämpötilaa, mikä pitää hyötysuhteen parempana.

### 2.3.3 Aurinkopaneelin ylimitoittaminen

Niin monen eri muuttujan takia ilmakehän ja pilvien yhteisvaikutuksesta on mahdotonta luoda tarkkaa sääntöä aurinkopaneelin ylimitoitustarpeelle. Kuitenkin edellä esitetyistä laskuista ja tutkimustuloksista voidaan määrittää raja-arvot ja keskiarvoistettu ohjeisarvo, joissa otetaan tärkeimmät tekijät huomioon.

Pilvisellä säällä suurin osa auringon säteilystä on hajasäteilyä, eikä aurinkopaneelin suuntaamisesta ole juurikaan hyötyä. Ilmakehän vaimentavan vaikutuksen kompensointi voidaan suuntaamattomalle paneelille määrittellä suoraan lasketuista arvoista. Jos auringon korkeuskulman toleranssiksi asetetaan 30°, niin yksin ilmakehän vaikutuksesta saadaan ylimitoitustarpeeksi + 22 %.

Runsaan pilvisyyden kerroinvaikutus on minimissään 6 oktalla 0,6 (+ 43 %) ja maksimissaan 8 oktalla 0,25 (+ 300 %). Taulukossa 2 on esitetty runsaan pilvisyyden ja ilmakehän yhteisvaikutuksen luoma ylimitoitustarve. Keskiarvoistettuna runsaan pilvisyyden vaikutukseksi saadaan 148 %.

**Taulukko 2.** Ilman ja pilvisyyden yhteisvaikutuksen luoma ylimitoitustarve.

Pilvisyys [okta]	Ylimitoitus [%]
6	+ 65
7	+ 122
8	+ 322

Todellinen ylimitoitustarve on vaatimuksista riippuvainen. Tarkkoja lukuja on mahdotonta määrittää. Kuitenkin johtopäätöksenä voidaan todeta, että jo puolitoistakertainen (+ 50 %) huipputehon ylimitoittaminen luo pientä varaa pilvistä ja vuorokauden ajasta riippuviin toimintaolosuhteisiin. Paljon yli nelinkertaisella (+ 300 %) ylimitoittamisella ei saada enää juurikaan hyötyä toimintaolosuhteiden laajentamiseen.

Laskennallisesti keskiarvoistettuna kompromissina paneelin koon ja toimintaolosuhteiden välillä aurinkopaneeli voidaan mitoittaa huipputeholtaan n. 2,7-kertaiseksi kuormalaitteen vaatimaan tehoon verrattuna. Käytännössä saatavilla olevien aurinkopaneelien tehoskaalan rajallisuudesta johtuen tarkat spesifikaatiot täyttävän paneelin hankinta voi olla hankalaa. Tällöin ratkaisevat käytännölliset asiat, kuten sovelluksen vaatimukset, aurinkopaneelin hinta ja fyysinen koko, hankitaanko nimellisteholtaan tätä 2,7-kerrointa suurempi vai pienempi paneeli.

## 3 JÄNNITEREGULOINTI

### 3.1 Lineaarinen regulointi

Lineaarinen regulointi perustuu jännitteen vakavointiin puolijohdetekniikalla. Yksinkertaisin lineaarinen ratkaisu on zenerdiodi, jonka estosuuntainen zenerjännite muodostuu myös kuorman yli, ja ylimääräinen virta kulkee zenerdiodin läpi. Zenerilmiötä käytetään hyväksi referenssijännitteenä lineaarisissa regulaattoripiireissä. [3][9]

Lineaarisista regulaattoripiireistä 78XX-tuoteryhmä vastaa virranantokyvyltään (1 A) hyvin esim. 15 W (18 V, 0,83 A) teholuokkaa olevan aurinkopaneelin spesifikaatioita [10]. Esimerkiksi 7812-piirillä toteutettu 12 V jännitteen regulointi on myös taloudellisesti halpa ratkaisu. Lineaaristen regulaattoreiden yhteinen ongelma on kuitenkin tehonkulutus, koska tulojännitteen ja lähtöjännitteen erotus muuttuu kuormavirran kertoimella tehoksi regulaattoripiirissä [9]. Suurilla kuormavirroilla lineaariset regulaattorit tarvitsevat jäähdytystä. Koko laitteen hyötysuhde jää matalaksi, ja auringonvalosta riippuva toiminta-alue rajoittuu.

### 3.2 Hakkurit

Hakkuriregulaattori (switching regulator) perustuu puolijohteilla ja passiivisilla komponenteilla toteutettavaan katkojakytkentään. Kaikille hakkureille yhteistä on, että ohjainpiiri avaa ja sulkee kytkintä (bipolaari- tai kanavatransistori), mikä saa aikaan energian varastoitumisen kelan magneettikenttään. Diodilla ohjataan kelan virta kulkemaan vain yhteen suuntaan, ja kondensaattorilla tasataan lähdön jännite. Ohjainpiiri tarkkailee ulostulojännitettä, ja ohjaa sitä säätelämällä kytkentätaajuutta. [11]

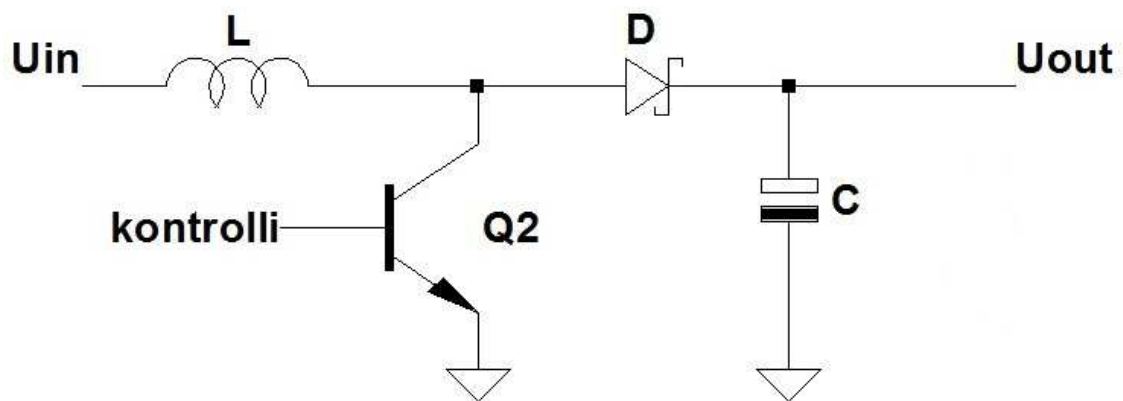
Hakkuripiirit ovat kalliimpia kuin lineaariset regulaattorit, ja hakkurikytkentöjen suunnittelu on monimutkaisempaa. Kuitenkin hakkureilla on mahdollista saada lineaarisia regulaattoreita huomattavasti parempia hyötysuhteita, mikä tekee hakkureista kannattavia aurinkopaneelien jänniteregulointiin.

Erilaisia hakkurien kytkentätopologioita on useita eri tarkoituksiin. Perusmalleista buck-hakkuri toimii tulojännitettä laskevana regulaattorina ja boost-hakkuri jännitettä nostavana. [11]



### 3.2.1 Boost-hakkuri

Boost-hakkurin lähtöjännite on suurempi kuin tulojännite. Kuvassa 3 esitetyssä perusmallissa kelaan yli vaikuttaa jännite  $U_{in}$ , kun kytkin suljetaan (transistori johtaa). Diodi estää lähdöstä virran kulkemisen väärään suuntaan. Kytkimen avautuessa kelaan indusoituu vastakkainen jännite. Diodin virta ei ole jatkuva, joten ulostulojännitteen tasaamiseen tarvitaan suhteellisen iso kapasitanssi, toisin kuin buck-topologiassa. [11][12]



Kuva 3. Boost-topologian peruskytkentä

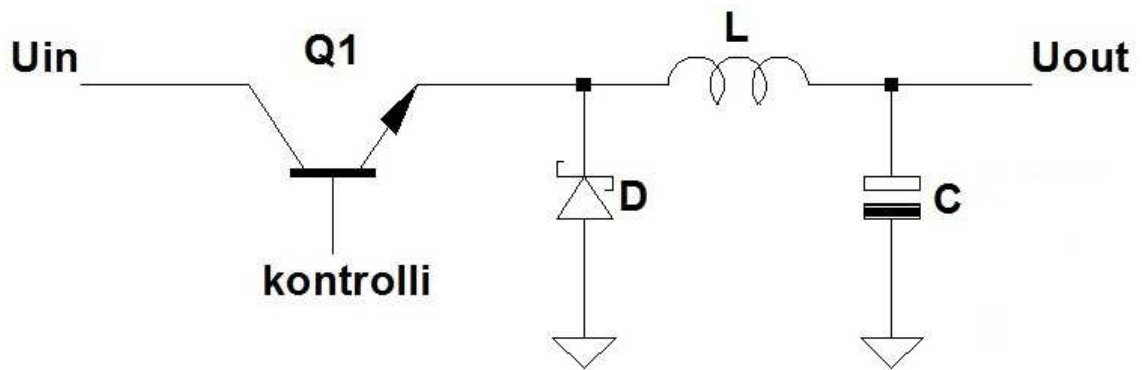
Pienelektronikassa boost-hakkuripiirien virranantokyky on yleisesti pienempi, kuin buck-hakkureilla. Paristokäyttöön suunniteltujen boost-hakkurien virranantokyky vaihtelee lähtö- ja tulojännitteiden suhteesta riippuen maksimiarvoltaan välillä 0,1...1 A. [13][14]

Jännitteen nostaminen kuormittaa erityisesti teholähdettä. Teoreettisesti ilman hyötysuhdehäviöitä tulo- ja lähtövirtojen suhde on sama kuin jännitteiden suhde. Tämä tarkoittaa, että teholähde syöttää piiriin suuremman virran, kuin mitä kuormaan päätyy. Tulo- ja lähtöjännitteiden eron kasvaessa teholähteen kuormitus kasvaa. Esimerkiksi paristokäytössä tämä lyhentää paristojen käyttöikää. Jännitteen nosto aurinkopaneelilla tarkoittaa heikkoa virranantokykyä, jos toimitaan lähellä maksimitehopistettä.

Boost-hakkurien sovellukset aurinkosähkön regulointiin ovat hyvin rajalliset heikon virranantokyvyn ja lähteen kuormittamisen vuoksi. Aurinkopaneelin oman napajännitteen riittämättömyys voi tulla vastaan esim. audiovahvistuksessa, jossa käyttöjännite asettaa vahvistusrajan signaalille. Tässäkin tapauksessa koko jännitealueen käyttävä vahvistin tarvitsee suhteellisen paljon tehoa, ja teholähteeltä vaaditaan virranantokykyä.

### 3.2.2 Buck-hakkuri

Buck-hakkurin lähtöjännite on pienempi kuin tulojännite. Kuvassa 4 esitetyssä perusmallissa kelan yli vaikuttaa jännite  $U_{in} - U_{out}$ , kun kytkin suljetaan (transistori johtaa). Kytkimen avautuessa kela vastustaa virran muutosta. Indusoituva virta kulkee diodin kautta, ja kelan lähtöön saadaan positiivinen jännite. Lähdön kondensaattori tasaa jännitteen. [11][12]



Kuva 4. Buck-topologian peruskytkentä

Usealla komponenttivalmistajalla on pienelektronikkaan suunniteltuja buck-hakkuripiirejä, joiden virranantokyky on aurinkopaneeleille sopivaa luokkaa (1...3 A), ja mahdollisuus saavuttaa n. 90 %:n hyötysuhde, mikä tekee buck-hakkurista sopivan aurinkosähkön regulointiin. [15][16]

## 4 AURINKOPANEELIN JÄNNITEREGULAATTORI

### 4.1 Regulaattorin suunnittelu

Yhtenä opinnäytetyön osana suunniteltiin ja toteutettiin aurinkopaneelin jänniteregulaattori, joka soveltuu eri kokoluokkaa oleville paneeleille ja mahdollistaa useamman sovelluksen yhtäaikaisen käytön. Tavoitteena regulaattorille oli riittävä virranantokyky, mahdollisimman hyvä hyötysuhde ja pieni koko.

Regulaattorin ulostulojännitteeksi ( $U_{out}$ ) valittiin 12 V, koska se on yleinen käyttöjännite usealle sovellukselle, ja muita opinnäytetyössä suunniteltuja sovelluksia mitoitettiin 12 V:n käyttöjännitteelle. Useat kannettavaa kokoluokkaa olevat aurinkopaneelit ovat nimellisjännitteeltään 18 V, joten regulaattorin hakkuritopologiaksi valittiin jännitettä laskeva (buck). Hakkuripiiriksi valittiin LM2599. Lisäksi laitteeseen lisättiin ideaalinen diodihjain LTC4357 estämään mahdollisia vikatiloja. Koteloituun regulaattoriin valittiin liittimet, jotka mahdollistavat myös aurinkopaneelien kytkemisen sarjaan.

#### 4.1.1 Buck-hakkuri LM2599

LM2599 on Texas Instruments -komponenttivalmistajan buck-hakkurihjain. Piiri valittiin jänniteregulaattoriin helpon käytettävyyden, korkean hyötysuhteen, hyvän virranantokyvyn ja saatavuuden takia. Piirissä on myös ”lepotila”-ominaisuus (shutdown), jolla piiri voidaan kytkeä pois, kun käyttöjännite laskee tietyn pisteen alle. Toimintoa käytettiin hyväksi ohjaamalla hakkuria alijännitelukolla. Piirin sisääntulojännitteen maksimiarvo on 45 V, mikä mahdollistaa kahden 18 V:n aurinkopaneelin kytkemisen sarjaan hakkurille. [15]

Hjain mahdollistaa regulaattorista 3 A:n maksimivirran kuormalle. Ideaalisessa tapauksessa ulostulojännitteen ollessa 12 V ja sisääntulojännitteen 18 V, tämä tarkoittaa 2 A sisääntulovirtaa [15]. Tämä mahdollistaisi 36 W aurinkopaneelin koko tehon hyödyntämisen.

Hakkurin ulostulojännitteeksi mitoitettiin 12,2 V. 18 V:n käyttöjännitteellä ja 3 A:n kuormalla valmistajan lupaama hyötysuhde on n. 90 % [15]. Pienemmällä kuormavirralla hyötysuhde on pienempi [15].

### 4.1.2 Ideaalinen diodi LTC4357

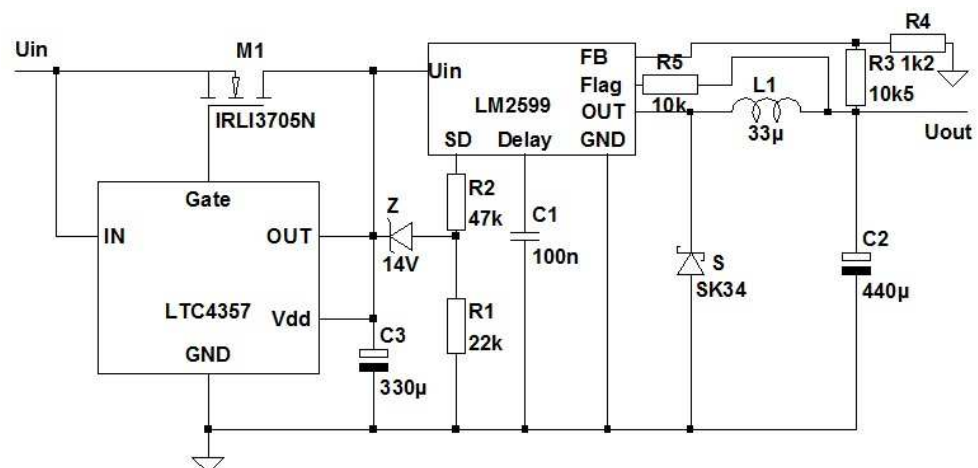
LTC4357 on Linear Technology -komponenttivalmistajan "ideaalinen diodiohjain" (ideal diode controller). Piiri ohjaa  $n$ -tyypin kanavatransistoria, millä voi korvata kytkennässä tehodiodin, jolla mahdollistetaan virrankulku vain yhteen suuntaan. Kanavatransistorin käyttö diodin sijasta pienentää tehohäviötä suurilla virroilla huomattavasti. Ohjainpiiri estää myös vikatilat, jossa jännite on kytketty väärinpäin, mikä voisi rikkoa komponentteja. Kanavatransistorin sulkuaika virransuunnan muutoksesta on valmistajan mukaan  $0,5 \mu\text{s}$ . [17]

Ideaalinen diodiohjain päätettiin lisätä regulaattorin kytkentään suojaapiiriksi. Ohjaimen käyttö aurinkopaneelin regulaattorissa suojaa piiriä paneelin väärin kytkemiseltä, mutta ei aiheuta mainittavaa tehohäviötä, kun laite toimii oikein. Kanavatransistorin  $0,01 \Omega$  kytkentävastuksella ja  $2 \text{ A}$  virralla häviöteho on  $0,04 \text{ W}$ , mikä on kymmenes osa siitä tehosta mikä kuluisi kynnyksjännitteeltään  $0,2 \text{ V}$ :n schottkydiodissa [18]. [17]

Kanavatransistorina kytkennässä käytettiin TO-220-kotelossa olevaa IRLI3705N-transistoria, jonka kytkentävastus on  $0,01 \Omega$ . [19]

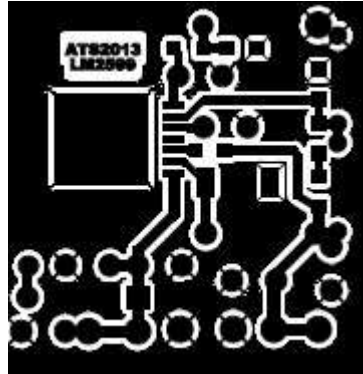
## 4.2 Regulaattorin toteutus

Hakkuripiirin oheiskytkentä (Kuva 5) mitoitettiin valmistajan ohjearvoja noudattaen.



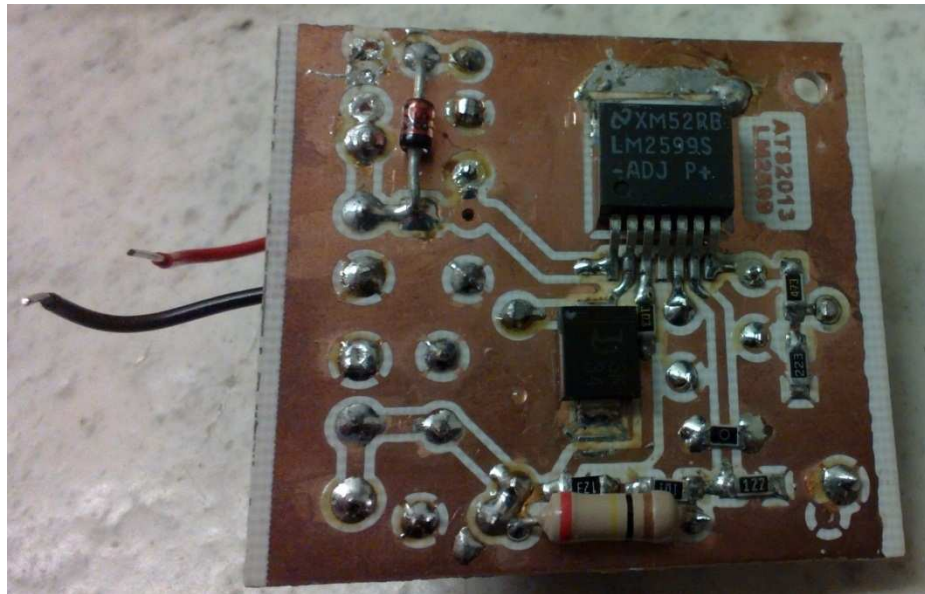
Kuva 5. Aurinkopaneelin jänniteregulaattorin kytkentäkaavio.

Hakkuripiirille ja sen oheiskytkennälle suunniteltiin, ja valmistettiin piirilevy (Kuva 6).



Kuva 6. LM2599-hakkurin piirilevyn ladontakuva

Piirilevy suunniteltiin Mentor Graphicsin PADS-piirilevysuunnitteluohjelmalla, ja valmistettiin Turun ammattikorkeakoulun elektroniikan laboratoriossa (Kuva 7).

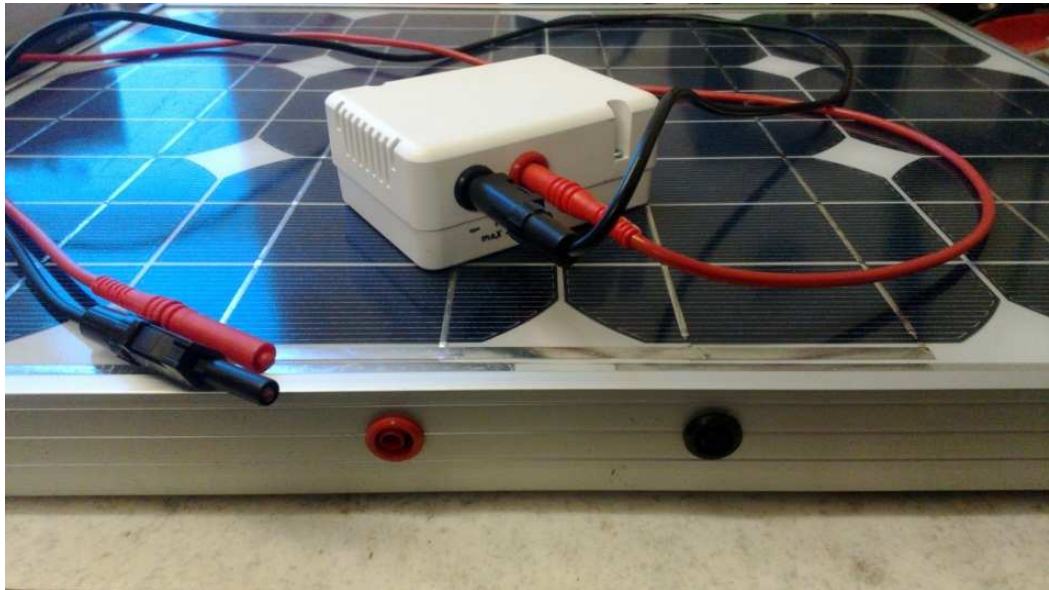


Kuva 7. Jänniteregulaattorin piirilevyn kuparipuoli.

Ideallinen diodi toteutettiin erilliselle reikälevylle. Laite kotelointiin, ja koteloon asennettiin liittimet aurinkopaneelia ja kuormalaitteita varten.

Tulopuolen liittimiksi valittiin turvaliittimet ("banaaniliittimet") vahingollisen oikosulun estämiseksi ja häviöiden minimoimiseksi (Kuva 8). Erilliset liittimet molemmille navoille mahdollistavat myös aurinkopaneelin kytkemisen sarjaan, mikäli yhden paneelin teho ei

riitä. Kaapeliksi valittiin kuparista tehty ja PVC-päällystetty monisäikeinen 1,0 mm<sup>2</sup>:n mit-tajohdin, joka on mekaanisesti kestävä ja pienihäviöistä.



Kuva 8. Aurinkopaneelin ja regulaattorin välinen liitäntä toteutettiin banaaniliittimillä.

Käytetyn johtimen resistanssi on noin 0,017  $\Omega$ /m [3]. Varsinkin regulaattorin tulopuolella pitkien johtimien resistanssilla voi olla merkitystä kokonaistehon kannalta, jos aurinkopaneeli toimii lähellä maksimitehopistettä. Testikäyttöön hankittiin 1 m pitkät johtimet. Tämä aiheuttaa kokonaisuudessaan n. 0,04  $\Omega$ :n kuorman aurinkopaneelille, mikä ei suhteellisesti ole suuri, eikä vaikuta huomattavasti hyötykuormaan saatavaan tehoon. 10 m pitkät johtimet aiheuttaisivat n. 0,4  $\Omega$ :n kuorman, mikä vastaisi n. 4 %:n osuutta kuormasta aurinkopaneelilla, jonka  $P_{mpp}$  on mitoitettu 10  $\Omega$ :n kuormalle.

Lähdön liittimiksi valittiin 2,1·5,5 mm DC-pistoke, mikä ei mahdollista napaisuuden kytkytymistä väärin päin. DC-runkoliittimeksi valittiin mutterikiinnityksellä oleva naarasliitin. Samaa liitintä samalla polariteetilla käytettiin kaikissa opinnäytetyön laitteissa. Positiivinen jännite kytkettiin liittimen keskinapaan. Aluksi liittimiä asennettiin laitteeseen kaksi, mutta niitä voi tarvittaessa lisätä, mikäli on tarvetta, ja jos laitteiden kokonaiskuormittavuus ei ylitä regulaattorin virranantokykyä tai aurinkopaneelin maksimitehopistettä.

Samaa standardia liittimille noudatettiin opinnäytetyön muissa laitteissa, jotta ne olisivat yhteensopivia.

### 4.3 Regulaattorin laskut

Lasketaan regulaattorin toimintajakso  $D$  (duty cycle), kelan virran rippeli  $\Delta I_L$  ja ulostulojännitteen rippeli  $\Delta U_{out}$  ja komponenttien huippuvirta  $I_{SW(max)}$ . Käytetään lähtöarvoina sisääntulojännite  $U_{in} = 17,8 \text{ V}$ , ulostulojännite  $U_{out} = 12,2 \text{ V}$ , maksimikuormavirta  $I_{out\_max} = 3 \text{ A}$ , ”kytkimen virtaraja” (switch current limit)  $I_{lim} = 4,55 \text{ A}$  [15], hyötysuhde  $\eta = 90 \%$  [15], kytkentätaajuus  $f = 150 \text{ kHz}$  [15], kelan induktanssi  $L = 33 \text{ }\mu\text{H}$  ja ulostulossa rippelijännitteeseen vaikuttava kokonaiskapasitanssi  $C_{out} = 220 \text{ }\mu\text{F}$ .

Toimintajakso lasketaan kaavalla [20]:

$$D = \frac{U_{out} \cdot \eta}{U_{in}} = \frac{12,2 \text{ V} \cdot 0,9}{17,8 \text{ V}} = 0,616. \quad (2)$$

Kelan hurinavirta lasketaan kaavalla [20]:

$$\Delta I_L = \frac{(U_{in} - U_{out}) \cdot D}{f \cdot L} = \frac{(17,8 \text{ V} - 12,2 \text{ V}) \cdot 0,616}{150 \text{ kHz} \cdot 33 \text{ }\mu\text{H}} = 0,696 \text{ A}. \quad (3)$$

Ulostulon hurinajännite lasketaan kaavalla [20]:

$$\Delta U_{out} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f \cdot C_{out}} = \frac{0,696 \text{ A}}{8 \cdot 150 \text{ kHz} \cdot 220 \text{ }\mu\text{F}} = 2,6 \text{ mV} \approx 3 \text{ mV}. \quad (4)$$

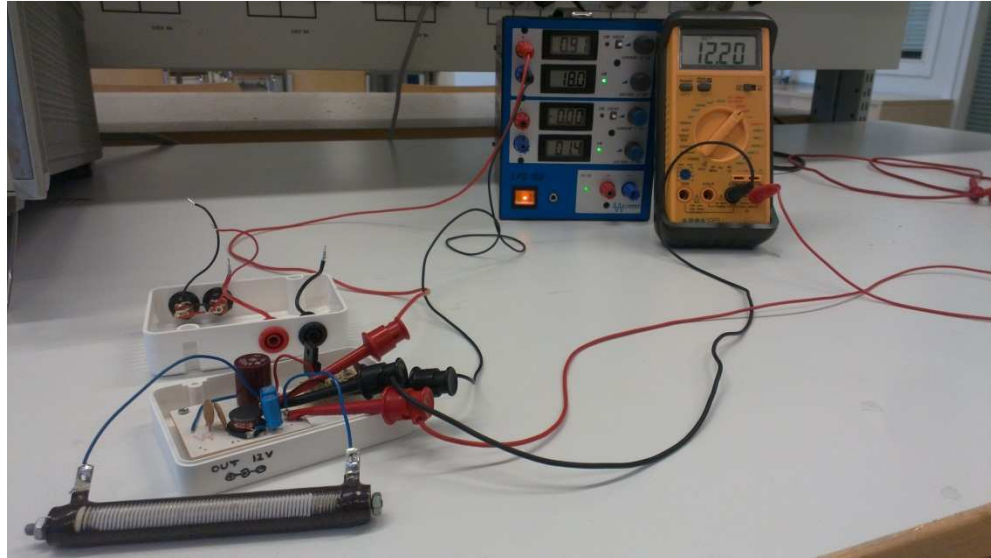
Komponenttien huippuvirrat lasketaan kaavalla [20]:

$$I_{SW(max)} = \frac{\Delta I_L}{2} + I_{out\_max} = \frac{0,696 \text{ A}}{2} + 3 \text{ A} = 3,3 \text{ A}. \quad (5)$$

Ulostulon hurinajännitteen arvo 3 mV on hyväksyttävä tässä regulaattorisovelluksessa. Minkään oheiskomponentin virtasuositus ei ylitä virran mahdollisella 3,3 A huippuarvolla [18].

### 4.4 Regulaattorin testaus

Jänniteregulaattorin toiminta testattiin laboratorio-oloissa ja käytännön toiminnassa. Käytännössä testaus toteutettiin käyttämällä regulaattoria aurinkopaneelin ja muitten opinäytetyössä suunniteltujen laitteiden kanssa. Laboratorio-oloissa suoritettiin hakkurin hyötysuhteen määrittäminen (Kuva 9).



Kuva 9. LM2599-hakkuriregulaattorin kuormitustesti.

Regulaattorin kuormitustestissä ideaalinen diodi ohitettiin, jotta saatiin mitattua pelkän regulaattorin hyötysuhde. Regulaattoria kuormitettiin  $10\ \Omega$ :n tehovastuksella, joka aiheuttaa laskennallisen  $1,22\ \text{A}$ :n kuormavirran. Sisääntuloteho laskettiin teholähteen ilmoittamista arvoista  $18,0\ \text{V}$  ja  $0,91\ \text{A}$ . Tästä voidaan laskea hakkurin hyötysuhde:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{12,2\ \text{V} \cdot 1,22\ \text{A}}{18,0\ \text{V} \cdot 0,91\ \text{A}} = 0,90 = 90\ \%, \quad (6)$$

mikä vastaa täysin valmistajan lupaamaan arvoa.

Käytännön testaus laitteelle tehtiin käyttämällä sitä aurinkopaneelin jännitteen regulointiin muitten tässä työssä toteutettujen laitteiden testeissä.



## 5 MATKAPUHELINLATURI

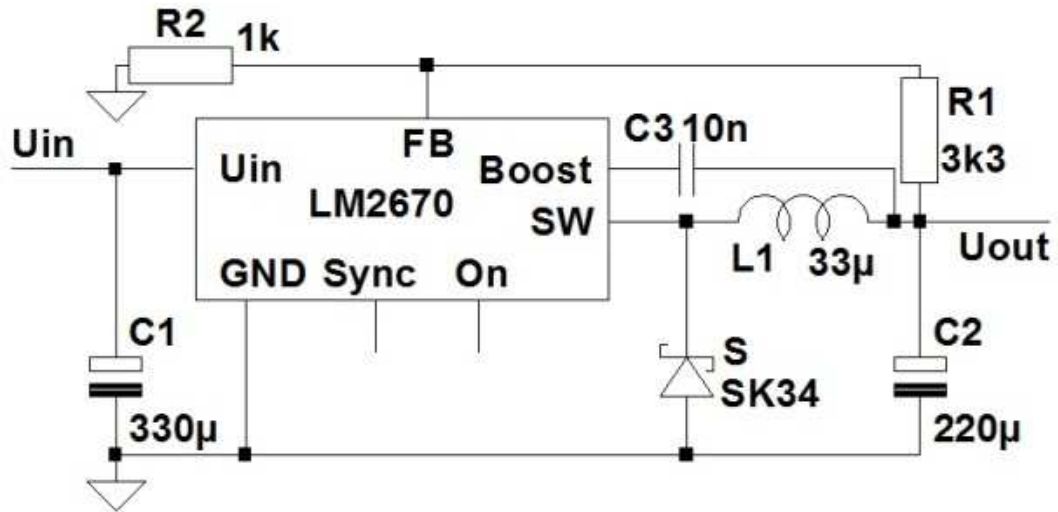
Yhtenä aurinkopaneelisovelluksena suunniteltiin ja toteutettiin matkapuhelinlaturi, joka toimii aurinkopaneelista saadulla sähköllä. Yleisen standardin mukaisen latausjännitteen regulointi suunniteltiin toteutettavaksi hakkuripiirillä LM2670. Laitteeseen tehtiin useampi lähtö mahdollistamaan kolmen laitteen yhdenaikaisen lataamisen.

### 5.1 Älypuhelinlatausstandardi

Älypuhelimissa yleistynyt akun lataaminen USB-liittimen (Universal Serial Bus) kautta mahdollistaa yleisen standardin mukaisen latauslaitteen valmistamisen, joka toimii usean laitevalmistajan puhelimilla. USB-liittimessä on neljä nastaa: käyttöjännite, kaksi datanastaa ja maa. Matkapuhelimen lataamiselle USB-portin kautta on standardi, jolla puhelin ja latauslaite tunnistavat toisensa. Puhelin nostaa toisen datanastan loogiseen ykköseen, ja jos toisen datanastan jännite seuraa perässä, puhelin tunnistaa laitteen laturiksi [21]. DCP-standardin (Dedicated Charging Port) mukainen impedanssi datanastojen  $D+$  ja  $D-$  välissä on  $200 \Omega$  [21]. Tällä tavalla toteutettu latauslaite ei vaadi latausta tarkkailevaa prosessoria latauslaitteeseen. Standardin mukainen ulostulojännite latauslaitteelle on  $4,75...5,25 \text{ V}$  ja virta  $0,5...1,5 \text{ A}$  [21]. Laturin teho on siis minimissään noin  $2,5 \text{ W}$ .

### 5.2 Buck-hakkuri LM2670

LM2670 on Texas Instruments -komponenttivalmistajan buck-hakkuriohjain. Piiri valittiin matkapuhelinlaturiin helpon käytettävyyden, korkean hyötysuhteen ja saatavuuden takia. Toimiakseen hakkuri tarvitsee kytkentään kelan, schottkydiodin, kaksi vastusta ja kolme kondensaattoria ulkoisiksi komponenteiksi (Kuva 10). [16]



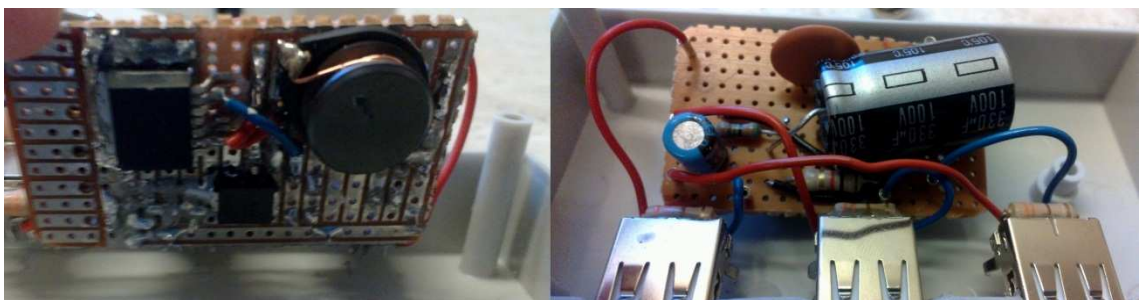
Kuva 10. LM2670-hakkurin kytkentäkaavio.

12 V:n käyttöjännitteellä, 5 V ja 0,5...1,5 A ulostulolla hakkurin valmistajan lupaama hyötysuhde on n. 88 %. Maksimivirta hakkurilla on 3 A. [16]

### 5.3 Matkapuhelinlaturin toteutus

Hakkurin ulostulojännitteeksi laturille mitoitettiin 5,2 V, mikä on lähellä USB-laitteiden standardijännitteen ylärajaa [21]. Laite voi toimia sekä esireguloidulla 12 V:lla että suoraan aurinkopaneelista tuodulla reguloimattomalla 17...20 V:n käyttöjännitteellä.

Laite rakennettiin reikälevylle ja koteloitiin (Kuva 11).



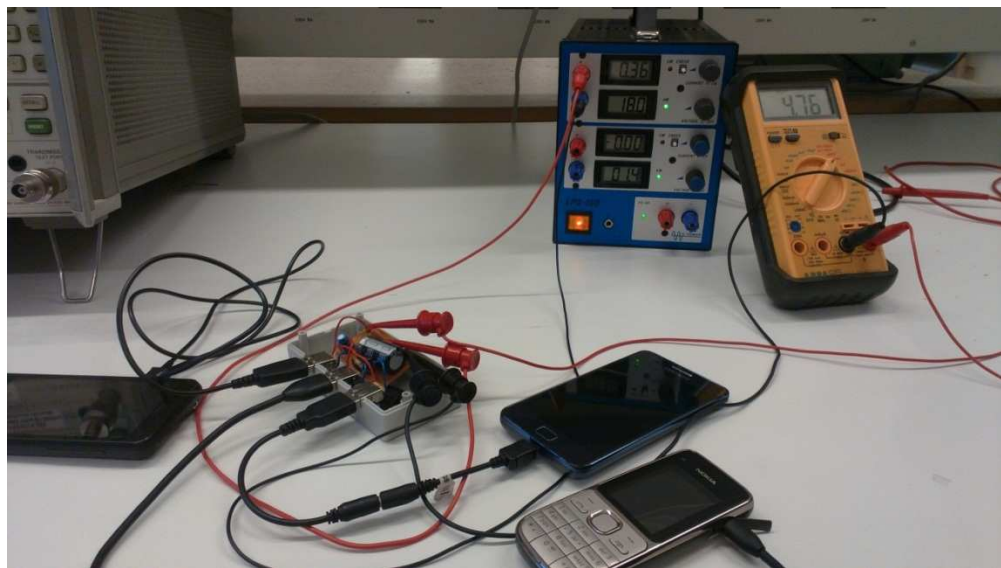
Kuva 11. Matkapuhelinlaturi rakennettiin reikälevylle.

Liittimeksi tulopuolelle valittiin sama DC-liitin kuin muihinkin tässä opinnäytetyössä toteutettuihin laitteisiin. Koska hakkuripiirin maksimivirta mahdollistaa useamman laitteen lataamisen yhtäaikaan standardin rajoissa, ulostuloon asennettiin kolme USB-liitintä, joiden

datanastoihin kytkettiin 220  $\Omega$ :n vastukset. Minimilatausvirralla 0,5 A tämä tarkoittaa 1,5 A:n kokonaiskuormitusta. 18 V:n paneelille 88 %:n hyötysuhteella tämä tarkoittaa n. 0,47 A:n kuormitusta. [16]

#### 5.4 Matkapuhelinlaturin testaus

Matkapuhelinlaturin toiminta testattiin sekä laboratorioteholähteellä että aurinkopaneelilla. Laboratorioteholähteellä testattiin useamman puhelimen kuormituksen vaikutus (Kuva 12).



Kuva 12. Matkapuhelinlaturilla ladataan yhtäaikaisesti kolme puhelinta.

Laturin DCP-standardin toiminta testattiin usean eri valmistajan (Nokia, Apple, Samsung, HTC) puhelinmalleilla. Kaikki testatut puhelimet tunnistivat latauslaitteen DCP-standardin mukaisesti. Kolmen puhelimen yhteiskuormituksessa laturin ulostulojännite laski mitoitetusta. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, että matkapuhelin testaa latauslaitteen virranantokykyä aiheuttamalla virtapiikin kytkeytyessään laturiin ennen kuin pienentää latausvirtaansa. Koska useampi puhelin on samassa lähteessä kiinni, ei hakkuri pysty palauttamaan jännitettä mitoitetulle tasolle. Latausjännite laski kolmella puhelimella n. 4,75 V:iin, joka on standardin alarajalla ja täten hyväksyttävä ilmiö, joten jännitteen laskemisen syytä ei selvitetty tätä tarkemmin.

Latauslaitetta testattiin myös yhden ja kahden puhelimen lataukseen. Taulukossa 3 on esitetty latausjännite ja teholähteen kuormitus, kun ladattavana on yksi, kaksi ja kolme puhelinta.

**Taulukko 3.** Matkapuhelinlaturin ulostulojännite ja teholähteen kuormitus.

Ladattavia puhelimia	$U_{out}$ [V]	Teholähteen kuormitus [W]
Yksi	5,25	3,6
Kaksi	4,85	6,3
Kolme	4,75	6,5

Teholähteen kuormituksesta ei voi tehdä suoria päätelmiä eri puhelimien lukumäärillä, koska latausvirta on riippuvainen myös puhelimen omasta tekniikasta ja täten mallikohmainen.

Latauslaitteen kolmelle puhelimelle jakama latausvirta voidaan laskea ulostulojännitteen 4,75 V, sisääntulojännitteen 18 V, sisääntulovirran 0,36 A ja arvioidun hyötysuhteen 0,88 kanssa oheisella kaavalla:

$$I_{out} = \frac{U_{in} \cdot I_{in} \cdot \eta}{U_{out}} = \frac{18 \text{ V} \cdot 0,36 \text{ A} \cdot 0,88}{4,75 \text{ V}} = 1,2 \text{ A.} \quad (7)$$

Tulos on tyydyttävä ajatellen että virta jakautuu puhelimille tasaisesti. Kaupalliset verkkomuuntajalla toimivat latauspistokkeet antavat yleisesti 1...1,5 A latausvirran pelkästään yhdelle puhelimelle. Kuitenkin latauslaite toimi, ja pienempi latausteho on kätevämpi ajatellen laturin käyttöä aurinkopaneelilla.

Aurinkopaneelin mitoitus matkapuhelinlaturille voi olla hyvinkin lähellä vaadittua tehoa riippuen halutusta toiminta-alueesta. Kun teho ei riitä puhelimen lataamiseen, niin puhelimen oma elektroniikka keskeyttää lataamisen. Yhden puhelimen lataukseen riittää n. 5 W:n paneeli aurinkoisella säällä.

## 6 AA-AKKULATURI

Yhtenä aurinkopaneelisovelluksena suunniteltiin ja toteutettiin latauslaite NiMH-akuille (nikkelimetallihydridi). Laturi mitoitettiin kahdelle akulle, joiden lataamiseen suunniteltiin NDV-tekniikalla (Negative Delta V) toimiva latauspiiri.

### 6.1 Nikkelimetallihydridiakku (NiMH)

Kuluttajien saatavissa olevista nikkelipohjaisista AA- ja AAA-akuista nikkelimetallihydridi on ominaisuuksiltaan NiCd-akkuja (nikkelikadmium) tehokkaampi. NiMH-akuilla on 30...40 % suurempi kapasiteetti. Ne ovat myös vähemmän alttiita muisti-ilmiölle eli kapasiteetin alenemiselle käytetyn purkausmäärän mukaan. Ekologinen vahvuus on myös se, että NiMH ei sisällä myrkyllisiä metalleja, toisin kuin nikkelikadmium- ja lyijyakut. NiMH-akkujen heikkoudet ovat lämmön muodostuminen latauksessa ja itsepurkautuminen: 20 % ensimmäisen vuorokauden aikana ja sen jälkeen 10 % kuukaudessa. NiMH-akun kennojännite on 1,2 V. Kaupallisten AA-akkujen kapasiteetti on 800 ja 2 850 mAh:n välillä. [22]

Nikkelipohjaisia akkujen lataamisessa täyden kapasiteetin saavuttamiseen voidaan käyttää akkujen napajännitteen muutosta ja lämpötilan kasvamista. Tyhjän akun napajännite nousee, ja laturipiiri tarkkailee jännitteen muutosta. Kapasiteetin täyttyessä akun jännite notkahtaa laskuun. NDV-tekniikka tarkoittaa tarkkailua napajännitteen kääntymisestä laskuun. Osa energiasta muuttuu lämmöksi, kun akku on lähes täynnä. Laturipiiri voi tarkkailla myös lämmön kasvua ja katkaista lataus, kun akun lämpötilan nousu ylittää tietyn pisteen. [22][23]

NiMH-akkujen latausvirran tulee olla tarpeeksi suuri, jotta NDV-tekniikka voidaan käyttää määrittämään latauksen valmistuminen. Jos latausvirta on pienempi kuin 0,3 C, laturipiiri ei välttämättä tunnista jännitteenmuutosta. [22][23]

### 6.2 MAX712 toimintaperiaate ja mitoitukset

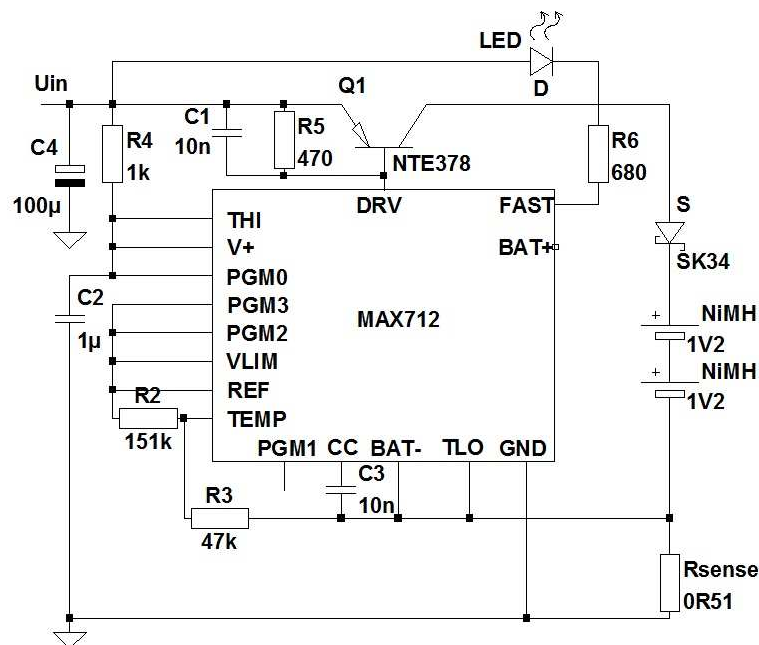
MAX712 on Maxim Integrated -komponenttivalmistajan valmistama lataussäädinpiiri nikkelimetallihydridi- (NiMH) ja nikkelikadmiumakuille (NiCd). Piiri valittiin akkulaturiin

saatavuutensa ja monipuolisuutensa takia. Toimiakseen piiri tarvitsee *pnp*-tehotransistorin, diodin, kolme vastusta ja kolme kondensaattoria ulkoisia komponentteja. Latausvirta ja ladattavien akkujen lukumäärä ovat valittavissa. MAX712 asettaa akkujen latausvirran säätämällä ulkoisen *pnp*-bipolaaritransistorin kantavirtaa. Piiri tarkkailee ladattavien akkujen yli olevaa jännitettä säädettävien väliajoin ja lopettaa pikalataamisen, kun akkujen napajännite kääntyy laskuun (NDV-tekniikka). Napajännitteen tarkkailun lisäksi piirillä on sisäinen ajastin, jolla on mahdollista säätää maksimilatausaika. Piirillä on myös toimintamahdollisuutena akkujen lämpötilan tarkkailu lämpövastusten avulla, mutta tätä ominaisuutta ei käytetty. [23]

Huono puoli MAX712-latauspiirin kytkennässä on *pnp*-transistoriin jäävä teho. Käyttöjännitteestä akkujen yli oleva jännite jää transistorille ja diodille, joka aiheuttaa suhteellisen suuren tehohäviön. Tästä syystä laitteen hyötysuhde on huono. Esimerkiksi kahden akun latauksessa 12 V:n käyttöjännitteellä ja 1 A:n latausvirralla transistorin ja diodin yhteinen minimiteho on 9 W, mikä on noin kolme kertaa suurempi kuin akkujen latausteho, kun napajännite on 1,5 V akkua kohden. [23]

### 6.3 Akkulaturin toteutus

Laturipiirin oheiskytkentä suunniteltiin valmistajan ohjearvojen mukaan (Kuva 13).



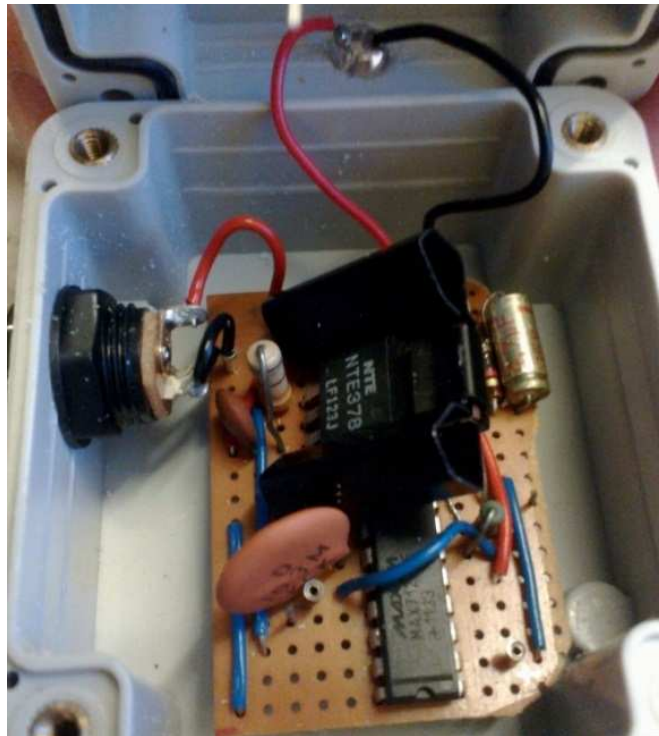
Kuva 13. MAX712-piirin oheiskytkentä kahdelle ladattavalle AA-akulle

Latauslaitteelle mitoitettiin 0,5 A:n latausvirta. Ladattavien akkujen kapasiteetista riippuen tämä voi olla niin pieni virta, ettei NDV-tekniikka toimi kunnolla, koska akun jännite ei lähde selvään laskuun. Latauksen aikakatkaisuksi valittiin 90 min, joka estää ainakin pitkäkestoisen ylilatauksen. Tämä kompromissi latausvirralla tehtiin aurinkopaneelien virranantokyvyn takia. Pienemmällä latausvirralla tarvittavan paneelin maksimiteho on pienempi. Aikakatkaisun jälkeen akuille tulee vielä n. 30 mA:n ylläpitovirta. [23]

Laite suunniteltiin toimimaan 12 V:n reguloidulla jännitteellä. Toimiakseen oikein laite tarvitsee verkkomuuntajan tai tässä opinnäytetyössä suunnitellun aurinkopaneelin jänniteregulaattorin. Suoraan aurinkopaneeliin kytkettynä laitteen tulojännite on korkea ja voi olla vahingollinen etenkin kytkennän *pnp*-transistorille tai sen lämmön nousun kautta muille komponenteille.

Latausvirtaa MAX712 säätää kontrolloimalla *pnp*-transistorin kantavirtaa. Transistoriksi valittiin NTE378, jonka kollektorivirran maksimiarvo on 10 A. [23][24]

Laturipiiri oheiskytkentöineen rakennettiin reikälevylle (Kuva 14).



Kuva 14. Akkulaturi rakennettiin reikälevylle.

Laite koteloitiin ja kotelon päälle asennettiin kahden pariston AA-paristokotelo, jossa paristot ladataan. Koteloon asennettiin myös LED-merkkivalo (Light Emitting Diode), jonka syttyminen merkitsee latauksen olevan käynnissä ja sammuminen latauksen loppumista.

#### 6.4 Akkulaturin teho ja hyötysuhde

Maksimiteho 12 V:n käyttöjännitteellä ja 0,5 A:n latausvirralla on 6 W. Kun käyttöjännite on 12 V ja ladattavien akkujen kennojännite on 1,0 V, saadaan transistorin maksimiteho  $P_{tr}$  kaavalla:

$$P_{tr} = (U_{in} - U_{kenno}) \cdot I = (12 \text{ V} - 2 \cdot 1 \text{ V}) \cdot 0,5 \text{ A} = 5 \text{ W} \quad (7)$$

Akkujen latausteho  $P_{akku}$  on tällöin:

$$P_{akku} = U_{kenno} \cdot I = 2 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A} = 1 \text{ W} \quad (8)$$

Hyötysuhde  $\eta$  akuille saatavasta tehosta on tällöin:

$$\eta = \frac{P_{akku}}{P_{tr}} = \frac{1 \text{ W}}{5 \text{ W}} = 0,2 = 20\% \quad (9)$$

Akkulaturin minimihyötysuhde on melko huono, mutta huonon hyötysuhteen aiheuttama tehohäviö on aurinkopaneelisovelluksessa alun perin lähtöisin auringosta, joten ainut kustannuskysymys on aurinkopaneelin mitoittaminen. Parempi hyötysuhde olisi saavutettavissa hakkuritekniikkaan perustuvalla lataussäätimellä, joka ei tuhlaisi transistoriin niin paljon tehoa. Toisaalta hyötysuhdetta voisi tässä parantaa jo transistorille ja latauksen ohjainpiirille tulevaa jännitettä säätävällä hakkurilla, joka aloittaisi latauksen pienellä käyttöjännitteellä, ja akkujen kennojännitteen noustessa nostaisi jännitettä. Laitteen monimutkaistamiseen verrattuna hyötyä ei kuitenkaan nähty niin suurena, että se olisi toteutettu.

#### 6.5 NiMH-akkulaturin testaus

AA-akkulaturin toiminta todettiin halutunlaiseksi laboratorioteholähteellä ja aurinkopaneelistista reguloidulla käyttöjännitteellä (Kuva 15).





Kuva 15. Akkulaturin testaus 25 W:n aurinkopaneelilla

Akkulaturin toiminta testattiin 1 800 mAh:n ja 2 550 mAh:n NiMH-akuilla. 0,5 A latausvirta on 2550 mAh:n akulle vain n. 0,2 C, joka aiheutti testeissä ongelmia, koska NDV-tarkkailumenetelmä ei toiminut kunnolla. Latauksen säätöpiiri MAX712 ei aina katkaissut latausta, vaikka akut tulivat täyteen. Kuitenkaan latausvirta 0,5 A ei aiheuttanut akkujen yllilatauksessa huolestuttavaa kuumenemista, ja 90 min:n aikakatkaaisu toimi testeissä halutulla tavalla, joten laturin voidaan sanoa toimivan.

Aurinkopaneelin mitoittamisessa akkulaturille on hyvä noudattaa runsasta ylimitoittamista, koska säästä johtuvat keskeytykset voivat aiheuttaa akkujen turhaa latausta. Latausohjainpiirin ajastimet nollautuvat aina kun lataus keskeytyy. Jos laitetta ei tarkkailla, niin sään vaihdellessa laturi voi turhaan ladata akkuja. Toisaalta latauspiirin täyden latauksen tarkastus latauksen alussa varmistaa, ettei täyttä akkua ladata pitkään turhaan. 20...30 W:n aurinkopaneeli sopii 12 V:n jänniteregulaattorin ja 6 W:n laturin tehollähteeksi, jotta akkujen lataus ei häiriinny pilvisellä säällä.

## 7 LADATTAVA MATKAPUHELINLATURI

Yhtenä aurinkopaneelisovelluksena suunniteltiin matkapuhelinlaturi, joka toimii vaihtoehtoisesti ulkoisella teholähteellä ja AA-akuilla. Laite suunniteltiin mahdollistamaan matkapuhelimen lataaminen myös olosuhteissa, joissa aurinkopaneeli ei pysty tuottamaan tarpeeksi tehoa. Laitteen vaatimuksiin kuului latausvirran lähteen sulava vaihtaminen aurinkopaneelin ja akkujen välillä.

Laturi mitoitettiin neljälle NiMH AA -akulle, joiden lataamiseen suunniteltiin NDV-tekniikalla toimiva latauspiiri. Akuista reguloidaan boost-hakkurilla (jännitettä nostava) latausjännite matkapuhelimelle.

Laite toimii ulkoisella 12 V:n teholähteellä, johon soveltuu reguloidun aurinkosähkön lisäksi verkkosähkömuuntaja. Ulkoisella teholähteellä toimiessa akut ladataan MAX712-piirillä ja matkapuhelimen latausjännitteen regulointiin käytetään LM2670 buck-hakkuripiiriä. Akkuja käytettäessä latausjännitteen regulointi toimii LM2621 boost-hakkuripiirillä. Ulostulon lähteen valinta kahden regulaattorin välillä tapahtuu LTC4412-piirillä.

### 7.1 Boost-hakkuri LM2621

LM2621 on Texas Instruments -komponenttivalmistajan boost-topologian hakkuriohjain. Se on tarkoitettu paristokäyttöisiin pienjännitesovelluksiin. Piiri valittiin matkapuhelinlaturiin reguloimaan sormiakuista latausjännite soveltuvuutensa ja saatavuutensa takia. Piirin valmistaja lupaa piirin antavan ulostuloon 1 A virtaa, mikä riittää USB-latausstandardille. Piirin oheiskytkentää kuuluu minimissään kela, schottkydiodi, neljä vastusta ja neljä kondensaattoria. [14]

Hakkurille mitoitettiin ulostuloon 4,9 V, mikä on lähellä USB-laitteiden standardin alarajaa [21]. Lähtöjännitteen ja -virran arvoilla 5 V ja 0,5 A ja tulojännitteen arvolla 4,8 V (neljä AA-akkua) valmistajan lupaama laitteen hyötysuhde on n. 90 %, ja tulojännitteen arvolla 3,3 V hyötysuhde on n. 87 % [14].

## 7.2 Virtareittiohjain LTC4412

LTC4412 on Linear Technology -komponenttivalmistajan "pienen hävikin virtareittiohjain" (low loss powerpath controller). Piirin tarkoitus on toimia lähes ideaalisena ohjaimella kahta  $p$ -kanavaista MOSFET-transistoria (eristehilakanavatransistori, metal-oxide-semiconductor field-effect transistor), joiden yli oleva jännite pyritään pitämään 20 mV:ssa hilavirtaa säätelemällä. [25]

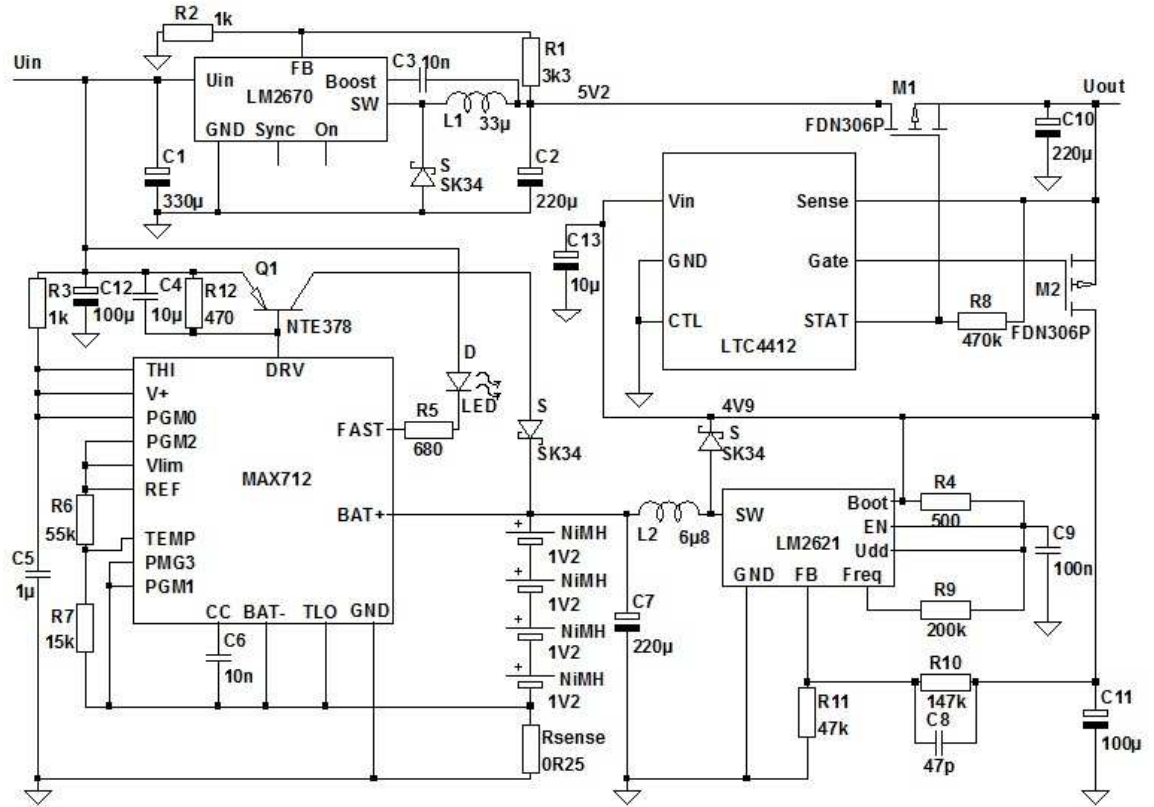
LTC4412 mahdollistaa kahden eri teholähteen käytön samassa kytkennässä, joista vain toisesta päästetään virtaa kuormalle [25]. Samalla piiri varmistaa, ettei virta kulje kanavatransistorien läpi väärään suuntaan [25]. Piiri valittiin matkapuhelinlaturiin ohjaamaan latausvirta joko ulkoisesta teholähteestä buck-hakkurin kautta tai akuilta boost-hakkurin kautta.

Schottkydiodin nimellinen kynnysjännite on n. 0,5 V (estojännite < 50 V) [18], mikä on 25 kertaa enemmän kuin ideaalisen diodikytkennän kanavatransistorien yli oleva 20 mV [25]. 0,5 A:n kuormavirralla komponenttien laskennallisiksi häviötehoiksi muodostuu schottkydiodille 250 mW ja kanavatransistorille 10 mW. Tällä tehonsäästöllä on etenkin merkitystä laturin toimiessa akuilla, koska akkujen kokonaiskapasiteetista saadaan suurempi osuus kuormalle.

Piirin oheiskytkennässä käytettiin Fairchild Semiconductor -komponenttivalmistajan FDN306P kanavatransistoria, jota LTC4412 datalehdessä käytetään esimerkkikytkennöissä. Transistorin kytkentävastus on n. 40 m $\Omega$ , mikä 0,5 A:n kuormavirralla tuottaa 20 mV jännitteen transistorin yli. [27]

## 7.3 Ladattavan matkapuhelinlaturin toteutus

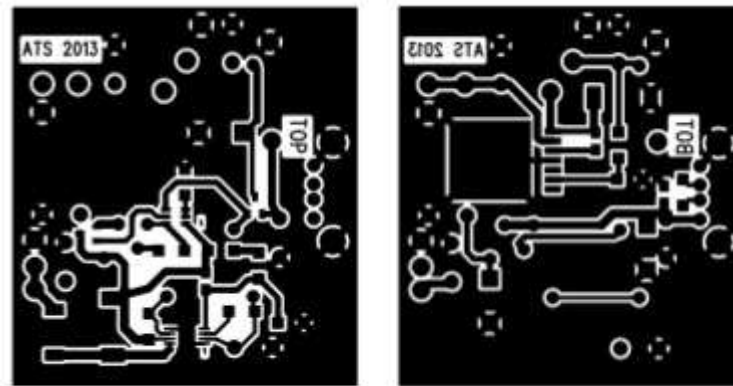
Matkapuhelinlaturi toteutettiin kahdelle erilliselle piirilevyille ja koteloitiin (Kuva 16). Toinen piirilevy käsittää hakkurit ja virtareittiohjaimen oheiskytkentöineen ja toinen akkujen latausohjaimen oheiskytkentöineen. Piirilevy suunniteltiin Mentor Graphicsin PADS-piirilevynsuunnitteluohjelmalla ja valmistettiin Turun ammattikorkeakoulun elektronikan laboratoriossa.



Kuva 16. Ladattavan matkapuhelinlaturin kytkentäkaavio.

Matkapuhelinlaturiin suunniteltu akkulaturi mitoitettiin lataamaan neljää NiMH-akkua 1 A:n virralla. Suunnitelmassa noudatettiin MAX712-piirin valmistajan ohjeita. Latausohjain ohjelmoitiin niin, että pikalatauksen lopettamisen jälkeen akuille tulee vielä n. 130 mA:n ylläpitovirta [23].

Piirilevysuunnittelussa huomioitiin EMC-näkökulma (sähkömagneettinen yhteensopi- vuus), koska levyllä tuli kaksi hakkuria ja useita aktiivisia komponentteja. Komponenttien valinnassa ja sijoittamisessa levyllä pyrittiin ottamaan huomioon hakkuripiirit, jotka toimivat eri kytkentäaajuuksilla. Hakkurien korkeat kytkentäaajuuden voivat aiheuttaa häiriöitä toisissaan ja muissa komponenteissa. Piirilevyllä suunniteltiin molemmat puolet kattava yhtenäinen kuparinen maa-alue, joka vähentää sähkömagneettisia häiriöitä. Hakkuri- piirit sijoitettiin eri puolille levyä mahdollisimman kauas toisistaan (Kuva 17). Lisäksi hakkureitten oheiskytkennöissä pyrittiin minimoimaan vetojen pituudet.



Kuva 17. Ladattavan matkapuhelinlaturin hakkurikomponentit ja virtareittiohjaimen sisältävän piirilevyn ladontakuva.

Buck-hakkurin kela käämittiin toroidisydämelle, jolla saatiin minimoitua kelan emissio. Boost-hakkurin kela on magneettisesti suojattu kotelolla [26].

NiMH-laturi rakennettiin kuparireikälevylle. Komponenttien sijoittelussa otettiin huomioon *pnp*-transistorin ja schottkydiodin lämpötilan nousu. Transistorille ja jäähdytyslevylle pyrittiin jättämään jäähdyttävää ilmatilaa lopullisen koteloitun laitteen sisällä.

Kaksi levyä yhdistettiin koteloituna yhdeksi laitteeksi alumiinisilla kytkentälangoilla (Kuva 18).



Kuva 18. Ladattava matkapuhelinlaturi kotelossa.

Koteloon liitettiin DC-liitin ulkoiselle teholähteelle ja kytkin, jolla saa valittua, ovatko akut latauksessa vai käyttövalmiudessa. Kytkimen asento ei vaikuta buck-hakkurin toimintaan, ja USB-liittimelle tulee latausjännite LM2670-hakkurin kautta ulkoiselta teholähteeltä myös akkuja ladatessa. MAX712-piirin toiminta ja etenkin *pnp*-transistorin lämpötilan nousu nostaa koko koteloidun laitteen lämpötilaa huomattavasti. Kotelon kanteen porattiin reikiä kompensoimaan lämpötilan nousua kotelon sisällä.

#### 7.4 Ladattavan matkapuhelinlaturin testaus

AA-akkulaturia, akkuja ja LM2621 boost-hakkuria testattiin purkamalla ja lataamalla akkuja. Kuormana purkamiseen käytettiin erikseen sekä tehovastuksia että matkapuhelinta. Testauksessa laitteen teholähteenä käytettiin lineaarista 12 V:n verkkopistokemuuntajaa. Laite testattiin kahdella eri akkutyypillä: Duracellin 1800 mAh:n akuilla ja GP:n 2 550 mAh:n akuilla. Molemmat akkutyypit ovat 1,2 V NiMH AA -akkuja.

Matkapuhelinlaturia testattiin käyttämällä kuormana sekä matkapuhelinta että tehovastuksia. Laitteen toimivuus testattiin sekä boost- että buck-hakkurin osalta. Matkapuhelinten lataamista DCP-standardin rajoissa testattiin eri valmistajien malleilla.

Taulukossa 4 on esitetty 2550 mAh:n akkujen kuusi lataus ja purkukertaa ja niiden keskiarvot. Akkujen purkaminen testissä tapahtui 10  $\Omega$ :n vastukseen, mistä saatiin jatkuvaksi kuormavirraksi n. 0,5 A. Purkautumisen katsottiin päättyneen, kun hakkurin lähtöjännite laski alle DCP-standardin 4,75 V.

**Taulukko 4.** Akkujen lataus MAX712-piirillä ja purku boost-hakkurin kautta:

Akkujen purku/latauskerta	Purkuaika [min]	Latausaika [min]
1	116	80
2	115	67
3	105	77
4	128	90
5	141	68
6	104	89
ka.	118	79

Purkuajan keskiarvoksi saatu n. 2 h on hyvä ajatellen ajantarvetta matkapuhelimen lataukseen. Akkujen latausaika n. 80 min on sekin hyvä ajatellen akkujen lataamista aurinkopaneelista.

Laite toimi suunnitellulla tavalla muuten, paitsi virtareittiohjaimen osalta. Testissä LTC4412 ei vaihtanut lähdettä kuormituksen aikana akuista ulkoiseen lähteeseen, kun ulkoinen lähde kytkettiin kiinni kuormituksen aikana. Ennakoimaton ongelma korjattiin testissä ohittamalla buck-hakkurilta tuleva kanavatransistori hyppylangalla, mikä sai laitteen toimimaan halutulla tavalla, mutta toisaalta huonontaa hieman akuista hyötykuorman saatavaa tehoa, koska boost-hakkurin toinen feedback-vastus kytkeytyy suoraan kuorman rinnalle.

## 8 AUDIOVAHVISTIN

Kannettavan koon aurinkopaneelien teholuokka sopii hyvin muutaman watin teholuokkaa oleville audiovahvistinpiireille, jotka on suunniteltu paristokäyttöön. Teholuokaltaan 0,5...10 W:n kaiuttimet sopivat tähän tarkoitukseen. Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin kaksi aurinkosähkökäyttöistä aktiivikaiutinta, jotka toimivat erilaisilla vahvistinpiireillä.

### 8.1 Audiovahvistinpiirit LM386N-4 ja LM380

Soittimet suunniteltiin toimimaan Texas Instruments -komponenttivalmistajan vahvistinpiireillä LM386N-4 ja LM380. Molemmat piirit on suunniteltu audiovahvistinkäyttöön, ja ne eivät vaadi usean oheiskomponentin kytkentää toimiakseen. [28][29]

LM386N-4-piiri on DIL8-kotelossa. Vahvistimella on sisäisen kytkennän kautta jännitevahvistus 20 (26 dB), mitä on mahdollista kasvattaa ulkoisilla komponenteilla. Piirin maksimikäyttöjännite on 22 V. 12 V:n käyttöjännitteellä 8  $\Omega$ :n hyötykuormaan saatava maksimiteho on n. 0,7 W. Työssä käytettiin kahta LM386N-4-piiriä stereosoittimen rakentamiseen 0,5 W:n kaiuttimilla. [28]

LM380-piiri on DIL14-kotelossa. Piirin sisäinen jännitevahvistus on 50 (34 dB), ja maksimikäyttöjännite 22 V. 18 V:n käyttöjännitteellä 8  $\Omega$ :n kuormaan maksimiteho on 2,5 W. Työssä käytettiin LM380-piiriä käytettiin monosoittimen rakentamiseen 2 W:n kaiuttimella. [29]

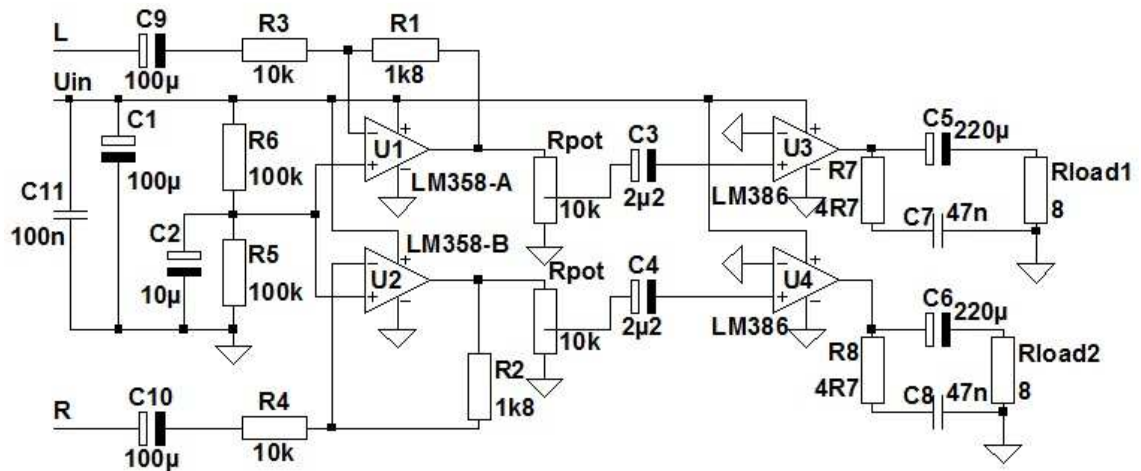
### 8.2 Stereosoitin

#### 8.2.1 Stereosoittimen toteutus

Stereosoittimen valmistamiseen käytettiin kahta LM386N-4 -vahvistinpiiriä ja kahta siniteholtaan 0,5 W kaiutinta. Laitteen käyttöjännitteeksi valittiin 12 V, koska sillä vahvistinpiireistä saadaan maksimiteho ulos. Signaali tuodaan kertoimella 0,18 vaimentavan LM358-operaatiovahvistimen kautta 10 k $\Omega$ :n liukupotentiometrille, jolla toteutettiin äänenvoimakkuuden säätö [30]. Operaatiovahvistimen kanssa toteutettu vaimentava esivahvistin sijoitettiin kytkentään ennen potentiometriä, jotta koko kytkennän sisääntu-

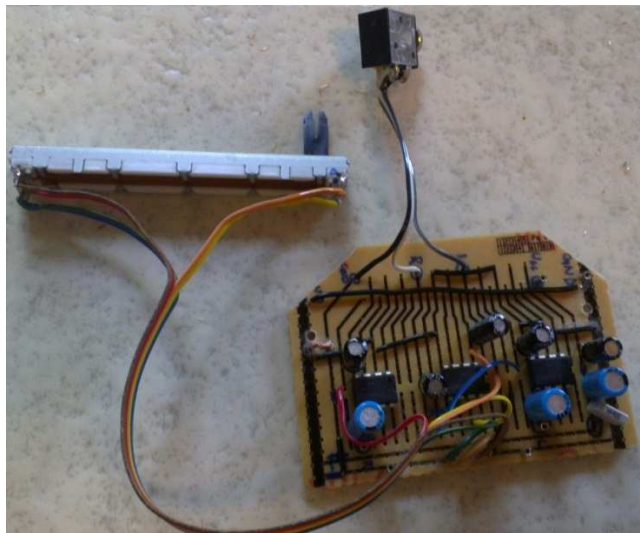


loimpedanssi saataisiin suuremmaksi kuin 10 k $\Omega$ . Oheiskytkennän komponenttiarvoissa noudatettiin valmistajan ohjevoja (Kuva 19). Operaatiovahvistimen vaimennus laskettiin siten, että kaiuttimien valmistajan antama 1 W:n maksimiteho ei ylittyisi 1 V:n sisään-tulosignaali. Koko laitteen laskennallinen nettojännitevahvistus on 3,6 (11,1 dB). [28]



Kuva 19. Stereosoittimen kytkentäkaavio

Laite rakennettiin reikälevylle ja kotelointiin (Kuva 20).



Kuva 20. Reikälevylle rakennettu stereovahvistin

Audioliittimeksi valittiin kannettavissa musiikkisoittimissa ja matkapuhelimissa yleinen 3,5 mm jakkiliitin ja käyttöjänniteliihtimeksi sama DC-liitin kuin opinnäytetyön muihinkin laitteisiin.

### 8.2.2 Stereosoittimen testaus

Stereosoittimen amplitudivaste mitattiin audioalueella (20 Hz ... 20 kHz) syöttämällä sisääntuloon huippuarvoltaan 1 V sinisignaali signaaligeneraattorista, ja mittaamalla ulostuloa oskilloskoopilla (kuva).

Vahvistimen mittauksissa taajuusalueella 500 Hz ... 20 kHz saatiin vahvistukseksi 4,2 (12,4 dB), mikä on hieman suurempi kuin mitoitettu arvo.

Stereosoittimen äänentoistoa testattiin myös käytännössä (Kuva 21).



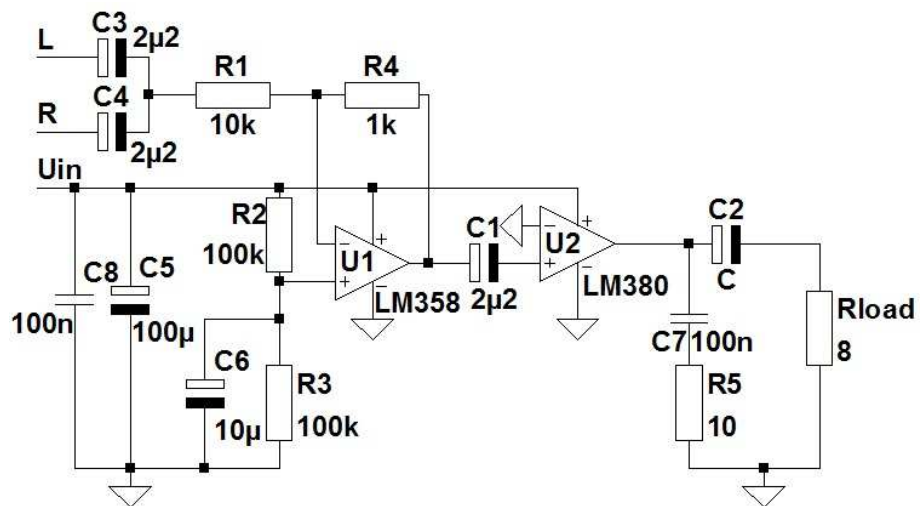
Kuva 21. Koteloitu stereosoitin

Maksimiäänenvoimakkuudella kaiuttimien ääni säröytyi, koska valmistajan antama siniteho 0,5 W ylittyi. Liukupotentiometri osoittautui epäkäytännölliseksi, koska sitä säädettäessä signaali häiriintyi ja äänentoisto pätki. Myös tämän opinnäytetyön yhteydessä tehdyn jänniteregulaattorin kanssa käytettäessä stereosoittimeen tuli häiriöitä, jotka kuuluivat äänentoistossa huomattavana sirinä. Tämä johtui todennäköisesti hakkuriregulaattorin kytkentätaajuuden audioalueella olevien harmonisten komponenttien vahvistumisesta vahvistinpiirin käyttöjännitelinjan kautta. Ongelma korjattiin lisäämällä soittimen käyttöjännitteen ja maan väliin 330  $\mu$ F kondensaattori, mikä vaimensi ylimääräisen äänen.

## 8.3 Monosoitin

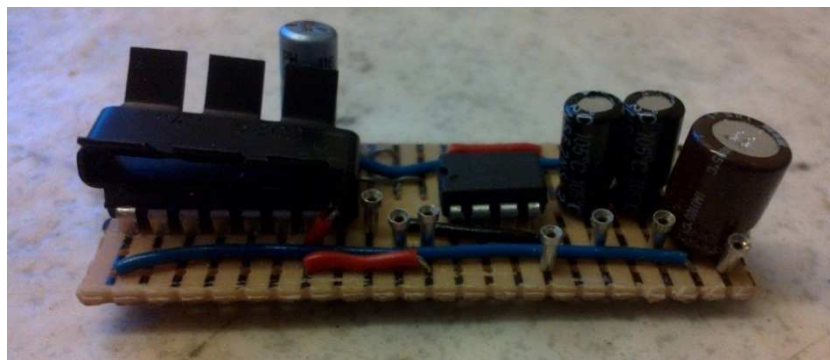
### 8.3.1 Monosoittimen toteutus

Monosoitin toteutettiin LM380-vahvistinpiirillä ja siniteholtaan 2 W:n kaiuttimella. Laite suunniteltiin toimivaan 12...18 V:n käyttöjännitteellä, mikä mahdollistaa joko aurinkopaneelista reguloidun tai reguloimattoman jännitteen käytön. Signaalin erillinen vaimennus kertoimella 0,1 tehtiin LM358-operaatiovahvistimella, mutta äänenvoimakkuuden säätömahdollisuutta ei tehty kuten stereosoittimella. Laitteen nettojännitevahvistukseksi mitoitettiin 5 (14 dB). Oheiskytkennässä noudatettiin valmistajan ohjearvoja (Kuva 22). [29]



Kuva 22. Monosoittimen kytkentäkaavio

Laite rakennettiin reikälevylle ja koteloitiin (Kuva 23).

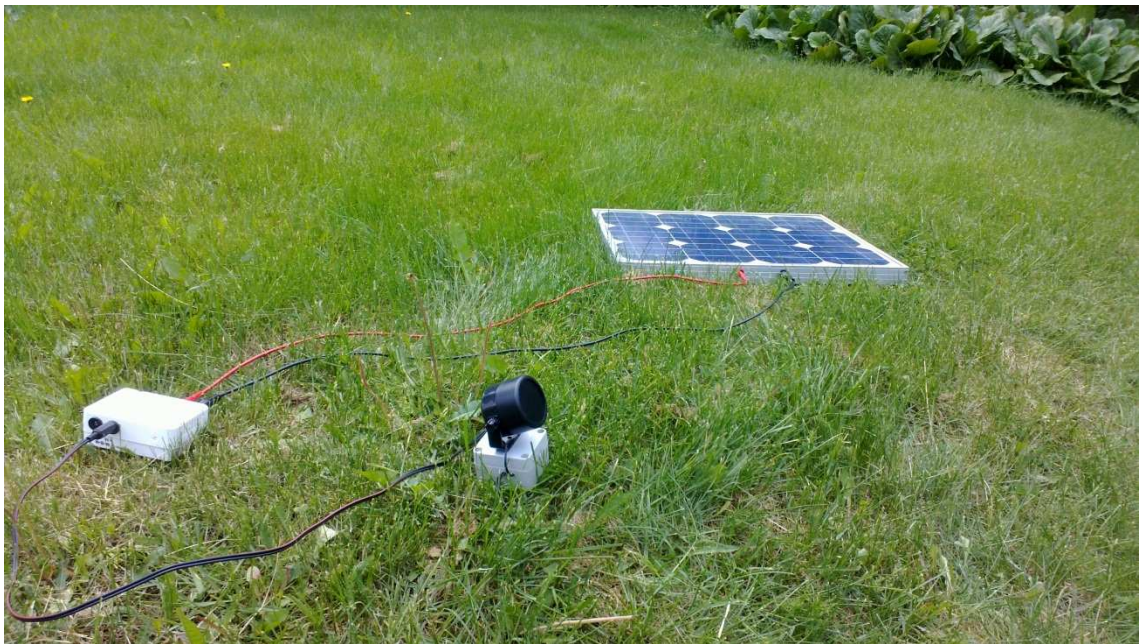


Kuva 23. Monosoitin rakennettiin reikälevylle.

Monosoittimen liittimiksi asennettiin sama audiojakkiliitin ja sama DC-liitin kuin stereosoittimeen.

### 8.3.2 Monosoittimen testaus

Monosoittimesta ei mitattu amplitudivastetta, kuten stereosoittimesta. Laitteen toimivuus ja audioalueen vahvistus kuitenkin todennettiin käytännön testeissä (Kuva 24).



Kuva 24. Monosoitin saa käyttöjännitteen regulaattorilta.

Testeissä monosoittimella havaittiin sama ongelma kuin stereosoittimella käyttöjännitteen tullessa hakkuriregulaattorilta, joissa hakkurin kytkentätaajuus aiheuttaa korvin kuultavia häiriöitä äänentoistoon. Ongelma korjattiin lisäämällä käyttöjännitteen ja maan väliin 330  $\mu\text{F}$ :n kondensaattori samalla tavalla kuin stereosoittimeen.

Toinen havaittu ongelma käytettäessä monosoitinta aurinkopaneeli teholähteenä, oli äänen katkominen valoisuuden muuttuessa. Ongelma todennettiin johtuvan käyttöjännitteen muutoksista laboratorioteholähteellä. Käyttöjännitteen muuttuessa hiemankin korkeammaksi tai matalammaksi vahvistin katkaisi äänentoiston muutamaksi sekunniksi. Tämä ongelma tulee esiin aurinkopaneelilla erityisesti pilvisyyden vaihdellessa, koska valon intensiteetin vaihtelu aiheuttaa pientä vaihtelua aurinkopaneelin jännitteeseen. Tämän ilmiön todettiin olevan vahvistinpiirin ominaisuus, joka ei ole korjattavissa.

## 9 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa elektroniikkalaitteita aurinkopaneelikäyttöön, sekä tarkastella aurinkopaneelien mitoittamista kuormalle. Auringon säteilykulman ja sään vaikutusta aurinkopaneelistä saatavaan tehoon määritettiin käyttämällä jo olevassa olevia mittaustuloksia. Laitteita suunniteltaessa käytettiin hyväksi komponenttivalmistajien jo olemassa olevia integroitua piirejä, mutta itse laitteet suunniteltiin itse.

Aurinkopaneelin mitoittamiseen saatiin tuloksiin on suhtauduttava kriittisesti, koska käytetyt mittaustulokset olivat valmiiksi keskiarvoistettuja, ja piikentöjen absorptioalueen säteily vaimenee pilvissä uv-säteilyä enemmän. Kuitenkin saadut tulokset ovat oikeassa mittaluokassa, ja niitä voidaan käyttää ohjearvoina.

Aurinkopaneelin jänniteregulointi LM2599-piirillä saatiin toimimaan tavoitteiden mukaisesti ja odotetulla 90 %:n hyötysuhteella. Laite mahdollisti myös aurinkopaneelin kytkemisen sarjaan, jolla voi kasvattaa regulaattorista saatavaa tehoa tai parantaa toimintaolosuhteita.

Suunnitellut aurinkosähkösovellukset: matkapuhelinlaturi, akkulaturi, ladattava akkulaturi ja aktiivikaiuttimet saatiin kaikki toimimaan. Matkapuhelinlaturi tehtiin noudattamaan yleistä latausstandardia. Akkulaturi tehtiin lineaarisella jännitteenpudotuksella, mikä tuotti huonon hyötysuhteen, mutta oli kuitenkin toimiva ratkaisu.

Aurinkopaneelien hyötysuhteiden kasvu tulevaisuudessa luo parempia edellytyksiä kannettavan kokoluokan aurinkopaneelille, kun sama teho saadaan pienempään kokoon. Tällöin on mahdollista, että aurinkopaneelit alkavat joissakin sovelluksissa kilpailla akkujen kanssa, mikä mahdollistaisi tässäkin opinnäytetyössä suunniteltujen sovellusten kaupallistumisen.

## LÄHTEET

- [1] Wikipedia: A. E. Becquerel [viitattu 4.2.2014]. Saatavissa [http://en.wikipedia.org/wiki/A.\\_E.\\_Becquerel](http://en.wikipedia.org/wiki/A._E._Becquerel)
- [2] Lehto, Heikki; Havukainen, Raimo; Leskinen, Janna & Luoma Tapani 2007. Fysiikka 8: Aine ja säteily. Tammi, 19 – 22.
- [3] Inkinen, Pentti; Manninen Reijo & Tuohi, Jukka 2009. Momentti 2: Insinöörifysiikka. Otava, 86 & 574–577.
- [4] Suntekno: Aurinkopaneelit [viitattu 4.2.2014]. Saatavissa <http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>
- [5] Datalehti CT SolarStandard. CellTech Energy Systems. Saatavissa [https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/CTseries\\_eng\\_tds.pdf](https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/CTseries_eng_tds.pdf)
- [6] Suntekno: Aurinkoenergia [viitattu 4.2.2014]. Saatavissa <http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki/aurinkoenergia.pdf>
- [7] National Aeronautics and Space Administration 1999. Clouds and the energy cycle [viitattu 4.2.2014]. Saatavissa <http://nenes.eas.gatech.edu/Cloud/NASAClouds.pdf>
- [8] Josefsson, W. & Landelius, T. 2000. Effects of clouds on UV irradiance: As estimated from cloud amount, cloud type, precipitation, global radiation and sunshine duration. Journal of geophysical research, vol 105, no D4, 4927–4935
- [9] Huhtinen, Ville. Lineaariset lähteet. Teholähteet luentomateriaali.
- [10] Datalehti LM78XX. Fairchild Semiconductors. Saatavissa <http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM7805.pdf>
- [11] Huhtinen, Ville. Hakkureista. Teholähteet luentomateriaali.
- [12] Nelson, Carl 1986. Application Note 19: LT1070 Design Manual. Linear Technology [viitattu 4.2.2014]. Saatavissa <http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an19fc.pdf>
- [13] Datalehti LT1302. Linear Technology. Saatavissa <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/lt1302.pdf>
- [14] Datalehti LM2621. Texas Instruments. Saatavissa <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2621.pdf>
- [15] Datalehti LM2599. Texas Instruments. Saatavissa <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2599.pdf>
- [16] Datalehti LM2670. Texas Instruments. Saatavissa <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2670.pdf>
- [17] Datalehti LTC4357. Linear Technology. Saatavissa <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/4357fd.pdf>
- [18] Datalehti SK34. Unisonic Technologies. Saatavissa <http://www.unisonic.com.tw/datasheet/SK34.pdf>
- [19] Datalehti IRLI3705N. International Rectifier. Saatavissa <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irli3705n.pdf>

- [20] Hauke, Brigitte 2012. Application Report: Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage. Texas Instruments [viitattu 4.2.2014]. Saatavissa <http://www.ti.com/lit/an/slva477a/slva477a.pdf>
- [21] Battery Charging Specification, Revision 1.1. USB Implementers Forum, Inc. 2009 [viitattu 4.2.2014]. Saatavissa [http://e-tools.info/project/documents/18001\\_19000/18509/batt\\_charging\\_1\\_1\\_final.pdf](http://e-tools.info/project/documents/18001_19000/18509/batt_charging_1_1_final.pdf)
- [22] Charging nickel-metal-hydride. Battery University [viitattu 4.2.2014]. Saatavissa [http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_nickel\\_metal\\_hydride](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_nickel_metal_hydride)
- [23] Datalehti MAX712. Maxim Integrated. Saatavissa <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX712-MAX713.pdf>
- [24] Datalehti NTE378. NTE Electronics. Saatavissa <http://www.nteinc.com/specs/300to399/pdf/nte377.pdf>
- [25] Datalehti LTC4412. Linear Technoogy. Saatavissa <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/4412fa.pdf>
- [26] Datalehti SRR0604. Bourns. Saatavissa <http://www.bourns.com/pdfs/SRR0604.pdf>
- [27] Datalehti FDN306P. Fairchild Semiconductor. Saatavissa <http://www.fairchildsemi.com/ds/FD/FDN306P.pdf>
- [28] Datalehti LM386. Texas Instruments. Saatavissa <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm386.pdf>
- [29] Datalehti LM380. Texas Instruments. Saatavissa <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm380.pdf>
- [30] Datalehti LM358. Texas Instruments. Saatavissa <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>