

PIIRI- JA JÄÄHDYTYSLEVYJEN SUUNNITTELU GAN-  
TRANSISTOREILLA TOTEUTETULLE INVERTTERILLE  
PCB and Heatsink Design for a Single Phase GaN Inverter  
Henri Aalto

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Lut School of Energy Systems  
Sähkötekniikka

Henri Aalto

### **Piiri- ja jäähdytyslevyjen suunnittelu GaN-transistoreilla toteutetulle invertterille**

2017

Kandidaatintyö.

25 s.

Tarkastaja: DI Heikki Järvisalo

GaN-transistorit ovat uuden tyyppisiä tehopuolijohdekomponentteja. Ne ovat huomattavasti pienikokoisempia, kuin paljon käytetyt IGBT tai MOSFET -transistorit. GaN-transistoreista on tehty käytännön sovelluksia toistaiseksi vähän, joten niiden tutkimustyöhön tarvitaan teholähde, jolla pystytään testaamaan ja mittaamaan transistorien ominaisuuksia käytännössä.

Tässä kandidaatintyössä käsitellään teholähteen piirilevyn ja GaN-transistorien jäähdytyslevyn suunnittelua. Piirilevysuunnittelussa tutkitaan toteutetun piirilevyn haasteita ja ongelmia häiriönsuojauksessa ja komponenttisijoittelussa. Työssä käsitellään jäähdytyslevyn toimintaa erilaisten kytkentähäviöiden jäähdyttämisessä. Todettiin mittauksin ja laskelmin, että jäähdytyslevyllä kyetään jäähdyttämään 112 W suurin teho, jotta transistorit pysyvät valmistajan ilmoittaman suurimman liitoslämpötilan 150 °C alapuolella

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Lut School of Energy Systems  
Electrical Engineering

Henri Aalto

### **PCB and Heatsink Design for a Single Phase GaN Inverter**

2017

Bachelor's thesis.

25 p.

Examiner: M. Sc. Heikki Järvisalo

GaN-transistors are a new kind of power transistors, which can be used for example on power supplies. GaN-transistors are tinier compared to traditional power transistors and their switching frequency can be over 1 MHz. There are only a few surveys done about the GaN-transistors at this moment, so there was a need for a power supply prototype to research GaN-transistors.

This bachelor's thesis explains about realizing a PCB and a heatsink for this power supply. The main issues were reducing capacitive and inductive coupling and inventing a way to cool switching losses down.

The heatsink was tested by measurements and it was proven that the heatsink can cool down the switching losses below 112 watts to keep the GaN-transistors below their highest operating temperature 150°C.

# Sisältö

<b>Käytetyt merkinnät ja lyhenteet</b>	<b>5</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>6</b>
1.1 Sähkömagneettinen häiriö (EMI)	7
1.2 Suosituksia hyvästä piirilevydesignista	7
1.2.1 Piirilevyn tasot	7
1.2.2 Hot loop	7
1.2.3 Hilan jännite	8
1.2.4 Läpiviennit	8
<b>2 Piiriesittely</b>	<b>9</b>
2.1 Reunaehdot	9
2.2 Komponenttisijoittelu	10
2.3 Piirilevyn tasot	10
2.4 Piirilevyvedot	10
2.4.1 Hot-loop	10
2.5 Pääteaste	11
2.6 Kondensaattorit	11
2.7 Jäähdytyslevy	11
<b>3 Jäähdytyslevyn testaus</b>	<b>13</b>
<b>4 Johtopäätökset</b>	<b>17</b>
4.1 Piirilevy	17
4.2 Jäähdytyslevy	17
<b>Lähteet</b>	<b>18</b>
<b>A Piirilevyn layout-kuvat</b>	<b>19</b>

## Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

$C$	Lämpökapasiteetti
$E$	Energia
$P$	Teho
$Q$	Lämpömäärä
$T$	Lämpötila
$t$	Aika
GaN	Galliumnitraatti

# 1 Johdanto

Galliumnitridistä (GaN) valmistetut transistorit ovat pienikokoisia ja ne kykenevät yli 1 MHz:n kytkentätaajuuksiin (Reusch and Strydom, 2014). Suuret kytkentätaajuudet ovat etuna teholähteissä laitteen koon pienentämisessä. Ongelmakohtia ovat GaN-transistorien aiheuttamat suuret virran- ja jännitteen muutosnopeudet, joista seuraa sähkömagneettisia häiriöitä. Koska transistorissa on lämpöä luovuttavaa pinta-alaa vain muutama neliösenttimetri, on kytkimien häviöiden aiheuttaman lämmön poistaminen komponentista huomioitava.

Toimivalle teholähteen piirilevyllä ei ole yhtä oikeanlaista toteutustapaa, vaan toimiva kokonaisuus syntyy monen tekijän summana, mm. minimoimalla kapasitiivista ja induktiivista kytkeytymistä. Ratkaisut eivät ole yksiselitteisiä, sillä esimerkiksi kapasitiivista kytkeytymistä vähentämällä saatetaan samalla aiheuttaa induktiivisesti kytkettyjä häiriöitä.

Kandidaatintyössä käsitellään GaN-transistorien tutkimustyöhön toteutetun teholähteen piiri- ja jäähdytyslevyn suunnittelua. Työssä esitellään menetelmiä, kuinka piirilevyn toteutuksessa vältetään häiriöiden muodostumista. Työssä keskitytään vain häiriönsuojauksen kannalta tärkeimpien piirilevyvetojen esittelyyn ja jäähdytyslevyn suunnitteluun ja testaamiseen. Laitteen varsinainen testaus ja apuhakuripiirin toteutus jätetään työn ulkopuolelle. Jäähdytyslevyn toiminta testataan kokeellisesti siirtämällä siihen lämpöä vakioteholla. Jäähdytyslevyn lämpötilaa seurataan kokeen aikana ja mittaustuloksilla pystytään tutkimaan jäähdytyslevyn suoriutumista erisuuruisten kytkentähäviöiden jäähdyttämisestä. Esille nousevia kysymyksiä ovat: Miten komponentit on sijoitettava häiriönsuojauksen kannalta? Miten GaN-transistorien jäähdytys toteutetaan?

## 1.1 Sähkömagneettinen häiriö (EMI)

Sähkömagneettinen häiriö on epätoivottu häiriö, joka ilmenee virtapiirissä, joko johduneena tai ulkoisen häiriölähteen tuottamana säteilynä. EMI-häiriöt pystyvät mm. häiritsemään langattomien tieto- ja puhelinverkkojen toimintaa, joten sähkömagneettisten häiriöiden suodattaminen on tarpeellista sähkölaitteen häiriöttömän toiminnan takaamiseksi. (Kaur et al., 2011)

## 1.2 Suosituksia hyvästä piirilevydesignista

### 1.2.1 Piirilevyn tasot

Monikerroksisten piirilevyjen käyttäminen helpottaa levyvetojen johtamista ja risiteämistä. Jokaisessa piirilevykerroksessa kannattaa kuljettaa tieynlaisia piirilevyvetoja, jotta suurivirtaiset vedot eivät häiritse herkkiä ohjaus- ja mittaussignaaleja. Taulukossa 1.1 esitetään nelikerroksiselle piirilevyille sopiva kerrosasettelu.

Taulukko 1.1: Suositeltava komponenttien ja johtimien sijoittelu nelikerrospiirilevyille (Zhang, 2012)

Kerros	Suosittelavat johtimet ja komponentit
1	Tehokomponentit ja johtimet
2	Maadoitus
3	Pienivirtaiset signaalit
4	Pienivirtaiset signaalit/ohjaus

Zhangin mukaan on suositeltavaa sijoittaa kaikki suurivirtaiset komponentit levyn yläpinnalle. Välissä käytetään maadoitustasoa, joka voi olla koko piirilevyn kokoinen kuparikaato. Alempiin tasoihin sijoitetaan heikkovirtaiset vedot ja komponentit. Tällaisella sijoittamisella vältetään induktiivista kytkeytymistä piirilevyn ylempien ja alempien osien välillä.

### 1.2.2 Hot loop

Hot-loopiksi kutsutaan virtasilmukkaa, joka kulkee hakkurin ylemmän ja alemman kytkimen läpi ja pienikokoisimman kondensaattorin kautta takaisin ylemmälle kytkimelle. Kytkimien läpi kulkevalla virralla on nopeat nousu- ja laskureunat, joten tämä virtasilmukka kykenee muodostamaan paljon induktiivisesti kytkeytyviä häiriöitä. Suositus on siksi pitää tämän virtasilmukan pinta-ala mahdollisimman pienenä. (Zhang, 2012)

### 1.2.3 Hilan jännite

Hilan jännite, joka kulkee hilaohjaimelta transistorin hilalle on luonteeltaan nopeasti nousevaa ja laskevaa virtaa. Hilaohjeen johteen tulee olla mahdollisimman leveä ja lyhyt impedanssin pienentämiseksi.(Zhang, 2012)

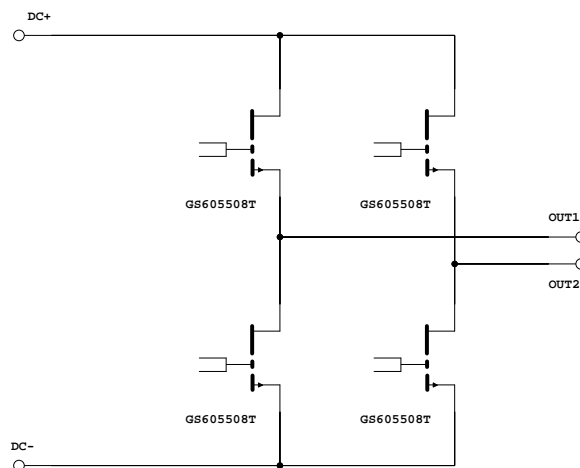
### 1.2.4 Läpiviennit

Piirilevyvedot siirretään läpivienneillä (via) piirilevyn eri kerrosten välillä. Läpivienti toimii virtareitin pullonkaulana, koska johteen pinta-ala on niissä useimmiten muihin vetoihin verrattuna pieni. Virranjohtavuutta voidaan parantaa sijoittamalla läpivientejä useita lähekkäin. Suositus on asentaa yksi läpivienti 200 mA virtaa kohden. (Texas Instruments, 2013)



## 2 Piiriesittely

Invertteri on suunniteltu GaN-transistorien tutkimusalustaksi. Laitetta käytetään apuna tutkittaessa minkälaisia muutoksia GaN-transistorien ominaisuuksiin tapahtuu jänniterasituksessa. Invertterissä käytetty kytkentätopologia on kuvassa 2.1 esitetty H-silta.



Kuva 2.1: Invertterin kytkentätopologia

Invertteri sisältää myös apuhakkurin, välipiirin kondensaattorit ja prosessorin. Apuhakkuri tuottaa käyttö sähköä mm. prosessorille ja hilaohjaimille. Liitteessä A esitetään piirilevyn vedot, kaadot ja osasijoittelu.

### 2.1 Reunaehdot

Laitteen koon vaatimuksena oli sen sopivuus mittalaitteeseen, johon sopii enintään 340 mm x 170 mm x 150 mm mitattava laite. Invertteriltä haluttiin mahdollisuutta erottaa yksittäisen GaN-transistorin nielu ja lähde virtapiiristä sekä laitteelta vaadittiin useita liittimiä tutkimuksen mittauksia varten.

Koon rajoitus ei kuitenkaan vaikuttanut piirilevysuunnitteluun juurikaan, sillä laite pystyttiin toteuttamaan helposti vaaditussa koossa. Littimiksi valittiin banaaniliittimet. Transistorit saatiin erotettaviksi, kun jokaiseen transistoriin kytkeytyvään vetoon asennettiin sarjaan 0 ohmin vastukset levyn yläpinnalle. 0 ohmin vastukset ovat 1812 -kotelolla käsittelyn helpottamiseksi.

## 2.2 Komponenttisijoittelu

Piirilevylle sijoitettiin pääteaste ja apuhakkuri selkeästi omiksi kokonaisuuksiksi niin, että ne sijaitsevat piirilevyn eri päissä. Välipiirin kondensaattorit sijaitsevat niiden välissä, keskellä levyä. Apuhakkurin ja pääteasteen välimatka vähentää häiriöiden kytkeytymistä niiden välillä. Litteessä A esitetään invertterin osasijoittelu. Apuhakkuripiiri on levyn toisessa päässä ja pääteaste toisessa. Suurimmat välipiirin kondensaattorit ovat C39, C45-C49.

Komponenttien sijoittelussa pyrittiin siihen, että mitään häiriöaltista vetoa ei tarvitsisi kuljettaa pitkää matkaa piirilevyllä. Liitteen A 2. välikerroksen kuvassa ruskealla värillä merkityt pitkät vedot ovat jännitevedot apuhakkuripiiristä hilaohjaimille, joiden pituudesta ei ole haittaa.

## 2.3 Piirilevyn tasot

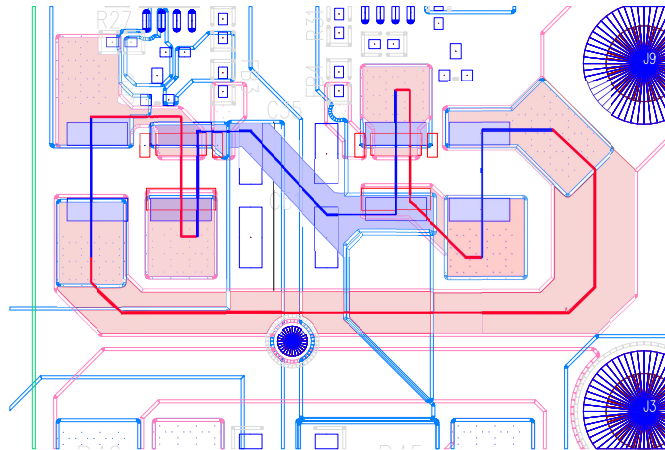
Teholähteessä käytettiin nelikerroksista piirilevyä. Vedot ja kaadot pyrittiin sijoittamaan taulukon 1.1 mukaisesti muutamaa poikkeusta lukuunottamatta. Asettelusta poikettiin invertterissä pääteasteen puolella. Jäähdytyslevy kiinnittyy erittäin lähelle piirilevyä, joten esimerkiksi hilaohjaimet oli sijoitettava tehokomponenteille tarkoitettulle ylimmälle tasolle. Myös GaN-transistorit jouduttiin sijoittamaan poikkeavasti alimmalle eli signaalitasolle jäähdytyksen mahdollistamiseksi.

Maakerros toimii taulukon asettelussa signaalien ja suurien virtojen välissä häiriösuoja. Se toteutettiin isolla yhtenäisellä kuparikaadolla, joka kattaa koko piirilevyn pääteastetta ja apuhakkurin muuntajien ympäristöä lukuunottamatta. Maadoitus siirtyy pääteasteen puolella ylimpään tasoon, jotta alempien kytkimien yhteys maadoitukseen pystytään katkaisemaan poistamalla 0 ohmin vastukset.

## 2.4 Piirilevyvedot

### 2.4.1 Hot-loop

Piirilevyn hot-loopin muodostavat komponentit C51, C35, R49, R48, R46, R47, Q6 ja Q8. Silmukasta pyrittiin tekemään mahdollisimman pieni. Kuvasta 2.2 huomataan, että hot-loopin koon aiheuttavat pääosin komponenttien fyysiset mitat, joista merkittävimpinä 0R vastukset.



Kuva 2.2: Piirilevyllä oleva hot-loop (Punainen ja sininen viiva)

## 2.5 Pääteaste

GaN-transistorien läpi johdettava virta joudutaan kuljettamaan piirilevyn yläkerroksesta alakerrokselle transistorien sijainnin takia. Näiden virtojen johtamiseen on tehty läpivientimatriisi (via stitching), eli useiden läpivientien muodostama kokonaisuus, mikä suurentaa kuparin poikkipinta-alaa virtareitillä ja pienentää impedanssia.

## 2.6 Kondensaattorit

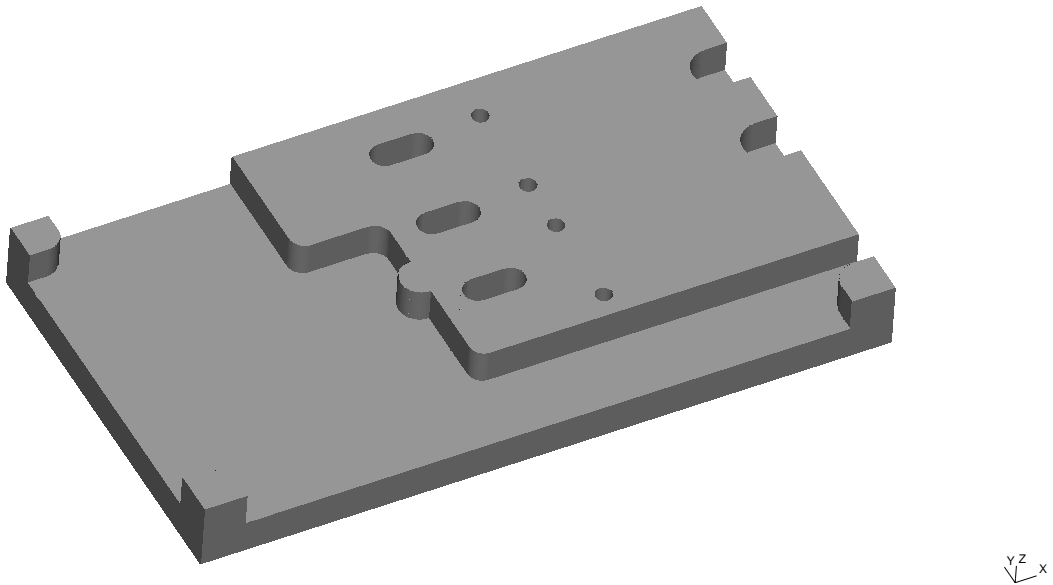
Suurikapasitanssiset kondensaattorit (C39, C45-C49) (liite A) on sijoitettu pääteasteen ja apuhakkuripiirien väliin. Kondensaattorien induktiivinen reaktanssi ja ekvivalenttinen sarjaresistanssi kasvavat suurilla taajuuksilla. Niitä pystytään pienentämään kondensaattorien rinnankytkennällä, jossa kondensaattorit sijaitsevat mahdollisimman symmetrisesti toisiinsa nähden. Toisin sanoen, jokaiselle kondensaattorille johtavat johtimet ovat mahdollisimman samanmittaisia. (Marty, 1999)

Tähän on pyritty GaN-invertterissä sijoittamalla kondensaattorit symmetrisesti pääteasteeseen nähden ja tekemällä DC+ ja DC- -kaadot niin, että kondensaattorien virtareittien pituuksissa olisi mahdollisimman vähän eroavaisuutta.

## 2.7 Jäähdytyslevy

GaN-transistorien jäähdytyslevy toteutettiin alumiinista piirilevyn kokoiseksi. Levy on CNC-jyrsitty Autocad:llä tehdyn mallin mukaiseksi. Jäähdytyslevyyn on jyrsit-

ty syvennykset, joilla väistetään piirilevyllä olevia komponentteja ja niiden jalkoja. Jäähdytyslevy kiinnitetään kuudella ruuvilla piirilevyyn, joista ainoastaan keskimäinen kiinnitysruuvi on kytketty laitteen maadoitukseen. Tällöin jäähdytyslevyn kautta ei pysty muodostumaan virtasilmuksia, jolloin vältetään jäähdytyslevyn toiminta johtuvien häiriöiden kulkureittinä.



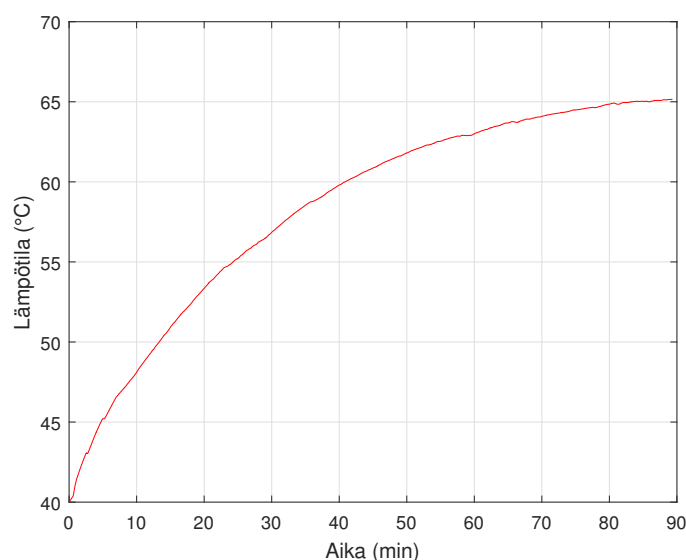
Kuva 2.3: Transistorien jäähdytykseen käytettävä alumiinilevy.

Jäähdytyslevyn äärimitat (p x l x k) ovat 200 mm x 110 mm x 20mm. Gan-transistorit eristetään sähköisesti jäähdytyslevystä lämpöä johtavalla matolla.

### 3 Jäähdytyslevyn testaus

Jäähdytyslevylle asennettiin termoparit, joiden avulla pystyttiin seuraamaan kuorimitustilanteessa jäähdytyslevyn lämpötilaa. Termoparit kiinnitettiin mahdollisimman lähelle transistoreja jäähdytyslevyn ja lämpöä johtavan maton väliin.

Jäähdytyslevyn toiminta testattiin johtamalla transistorien läpi tasavirtaa. Virran syöttämiseen käytettiin piirilevylle asennettuja DC+ ja DC- liittimiä. Syötetyn kokonaistehon suuruutena pidettiin kokeen ajan noin 25 W. Mitatut lämpötilat tallennettiin viiden sekunnin välein. Koetta jatkettiin, kunnes havaitaan jäähdytyslevyn lämpötilan kohoavan alle 1 °C 15 minuutin aikana. Kokeen aloitushetkellä jäähdytyslevyn lämpötila oli 40 °C. Kuvassa 3.1 esitetään mitattu lämpötila ajan funktiona.



Kuva 3.1: Jäähdytyslevyn lämpötilan mittaustulokset, kun levy lämmitettiin 25 W vakioteholla.

Edellä kuvattu jäähdytyslevyn lämmittäminen vakioteholla vastaa ensimmäisen kertaluvun systeemiä, koska systeemissä on yksi energiavarasto, eli tässä tapauksessa jäähdytyslevy (Nise, 2011). Ensimmäisen kertaluvun systeemin käyttäytymistä voidaan ennustaa erilaisissa olosuhteissa, kun on mitattu jäähdytyslevyn lämpiäminen yhdellä vakioteholla. Kuvan 3.1 mittaustuloksista pystytään siis approksimoimaan systeemille siirtofunktio. Approksimoitun siirtofunktion avulla voidaan piirtää systeemin vaste ja arvioida sovitetun käyrän ja mittaustulosten yhteneväisyyttä.

Johdetaan siirtofunktio lämpötehosta jäähdytyslevyn lämpötilaan:

Jäähdytyslevyllä on lämpökapasiteetti  $C$ , joka saadaan (Tynjälä, 2010)

$$C = \frac{dQ}{dT}. \quad (3.1)$$

Ratkaistaan yhtälöstä  $dT$  ja derivoidaan yhtälö ajan suhteen, saadaan.

$$\dot{T}(t) = \frac{1}{C}\dot{Q}(t). \quad (3.2)$$

Lämpömäärä  $Q$  on nyt kappaleeseen siirretty lämpöenergia  $E$ , jolloin

$$\dot{T}(t) = \frac{1}{C}\dot{E}(t). \quad (3.3)$$

Lämmitykseen käytetty energia on lämmitystehon aikaderivaatta.

$$\dot{E}(t) = P(t). \quad (3.4)$$

Jäähdytyslevyä lämmitettäessä teholla  $P_i$  osa lämmitystehosta siirtyy ympäröivään ilmaan ja osa kappaleeseen

$$P = P_i(t) - P_o(t), \quad (3.5)$$

missä  $P$  on jäähdytyslevyyn siirtyvä lämpöteho ja  $P_o$  on ympäristöön siirtyvä lämpöteho. Sijoitetaan nyt yhtälöön 3.3 yhtälöt 3.4 ja 3.5 ja laplace-muunnetaan yhtälö, saadaan

$$sT = \frac{1}{C}(P_i(s) - P_o(s)). \quad (3.6)$$

Nyt ympäristön lämpötila ei muutu juurikaan kokeen aikana, joten ympäristöön siirtyvän lämpötehon voidaan olettaa olevan suoraan verrannollinen kappaleen lämpötilaan  $T$

$$P_o(s) = kT, \quad (3.7)$$

missä  $k$  on systeemille ominainen vakio.

Yhdistetään yhtälöt 3.6 ja 3.7 ja ratkaistaan saadusta yhtälöstä siirtofunktio läm-

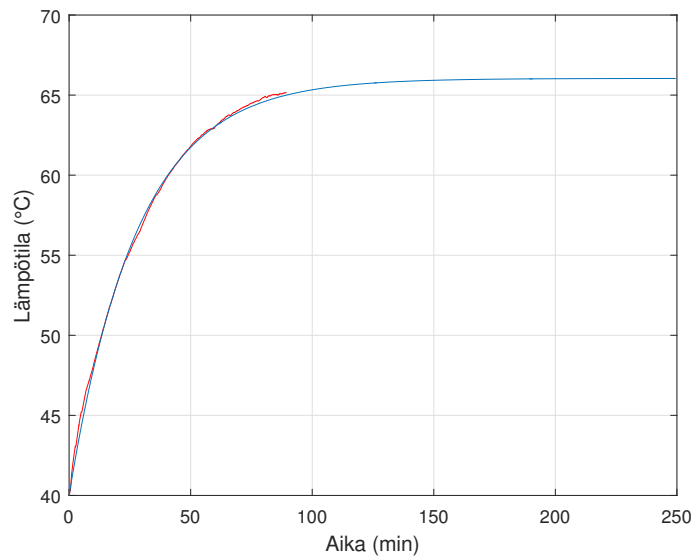
mitystehosta  $P_i(s)$  lämpötilaan  $T(s)$ .

$$\frac{T}{P_i(s)} = \frac{1}{Cs + k}. \quad (3.8)$$

Kuvasta 3.1 huomataan, että vakion  $k$  arvo on noin  $25\text{W}/26^\circ\text{C}$  ja aikavakio noin 26.67. Tällöin saadaan siirtofunktioksi

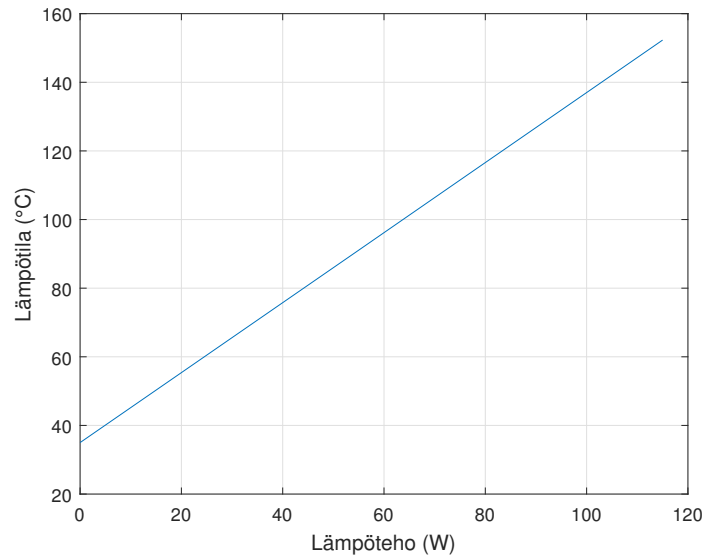
$$\frac{T}{P_i(s)} = \frac{1}{26,67s + 0,96}. \quad (3.9)$$

Kuvassa 3.2 esitetään sekä mittaustulokset, että niihin sovitetun mallin avulla laskettu lämpötila. Huomataan, että sovitettu lämpötilan käyrä vastaa hyvin mittaustuloksia ja suurin mittauksessa saatu lämpötila vakiintuu noin  $66^\circ\text{C}$  asteeseen. Kun systeemin siirtofunktio ja mittauksessa käytetty lämpöteho ovat tiedossa, saadaan selvitettyä kuinka paljon jäähdytyslevy lämpenee minkä tahansa muunkin lämmitystehon seurauksena.



Kuva 3.2: Lämpötilan mittaustulokset ja niihin sovitetun systeemin askelvaste.

GaN-transistorien suurin suositeltu liitoslämpötila on  $150^\circ\text{C}$ . (GaN Systems, 2016). Oletetaan, että jäähdytyslevyä ympäröivän ilman lämpötila on  $35^\circ\text{C}$  astetta, mikä on mahdollinen tehölähteen käyttöympäristössä eli esimerkiksi sähkömoottorin lähistöllä suljetussa kotelossa. Siirtofunktion perusteella saadaan edelleen hahmoteltua jäähdytyslevyn lämpötila lämmitystehon funktiona. (Kuva 3.3).



Kuva 3.3: Jäähdytyslevyn lämpiäminen eri häviötehoilla

Kuvassa on lämpötilan arvo, johon jäähdytyslevyn lämpötila vakiintuu pitkän ajan kuluessa. Huomataan, että tehon on oltava alle 112 W, jotta transistorit saadaan pysymään alle 150 °C asteen lämpötilassa. Todellisen käyttölämpötilan on kuitenkin oltava huomattavasti pienempi, alle 125 °C astetta.



## 4 Johtopäätökset

### 4.1 Piirilevy

Läpivientimatriisi (Via stitching) vie runsaasti piirilevytilaa, joten käytettävissä oleva tila on rajoittanut niiden tekemistä pääteasteeseen. Kaikki invertterin ohjaaman kuorman virta on vietävä läpivientien kautta kytkimille, joten läpiviennit toimivat virtojen pullonkaulana. Todennäköisesti läpivientien vähäisyys rajoittaa invertterillä ajettavan kuorman kokoa huomattavasti.

Hilaohjeiden leveys vaihtelee piirilevyllä. Transistorin lähistöllä veto on leveä, ja se on lähellä transistorin nielua. Hilaohje viedään yhdellä läpiviennillä levyn vastapuolelle, josta se kulkee kapeana vetona hilaohjaimelle. Hilaohjeen etäisyyttä nieluun tulisi kasvattaa, jotta vältetään häiriön kytkeytyminen viereisestä suurivirtaisesta johtimesta. Hilaohjeeseen voitaisiin lisätä läpivientejä yksi tai kaksi, jotta vedon impedanssi pienenesi. Samasta syystä vedon kannattaisi olla mahdollisimman leveä aina hilaohjaimelta saakka. Hilaohjeiden vetämisessä ja hilaohjaimien sijoittamisessa voitaisiin pyrkiä symmetriaan, jotta kaikille kytkimille saataisiin mahdollisimman samanmittaiset hilaohjevedot.

Laitetta voidaan parantaa sijoittamalla GaN-transistorit piirilevyn yläpinnalle, jolloin kaikki tehokomponentit sijaitisivat samalla puolella levyä. Tällöin suuria virtoja ei tarvitsisi johtaa piirilevyn läpi signaalitasolle, joka on herkkä häiriöille. Teholähteen jäähditys tulisi tällöin suunnitella uudestaan ja käyttää mahdollisesti pohjasta lämpönsä luovuttavia GaN-transistoreja. Kaikkien tehokomponenttien nostamisessa piirilevyn yläpinnalle on haasteena välipiirin kaatojen sijoittaminen niin, että ne sopisivat levyille ja olisivat riittävän suurikokoisia.

### 4.2 Jäähdytyslevy

Mittauksissa havaittiin, että jäähdytyslevy kykenee jäähdyttämään 112 W:n häviötehon niin, että GaN-transistorit pysyvät suurimman toimintalämpötilansa alapuolella. Jäähdytyslevyn ominaisuuksia pystyttäisiin parantamaan entisestään tekemällä levyn kääntöpuolelle rivoitus. Rivoitetun levyn jäähtymistä pystyttäisiin edistämään puhaltimella. Jäähdytyslevyn kehittäminen ja kehitellyn jäähdytyslevyn toiminnan testaaminen voisivat toimia jatkotutkimuksen aiheina.

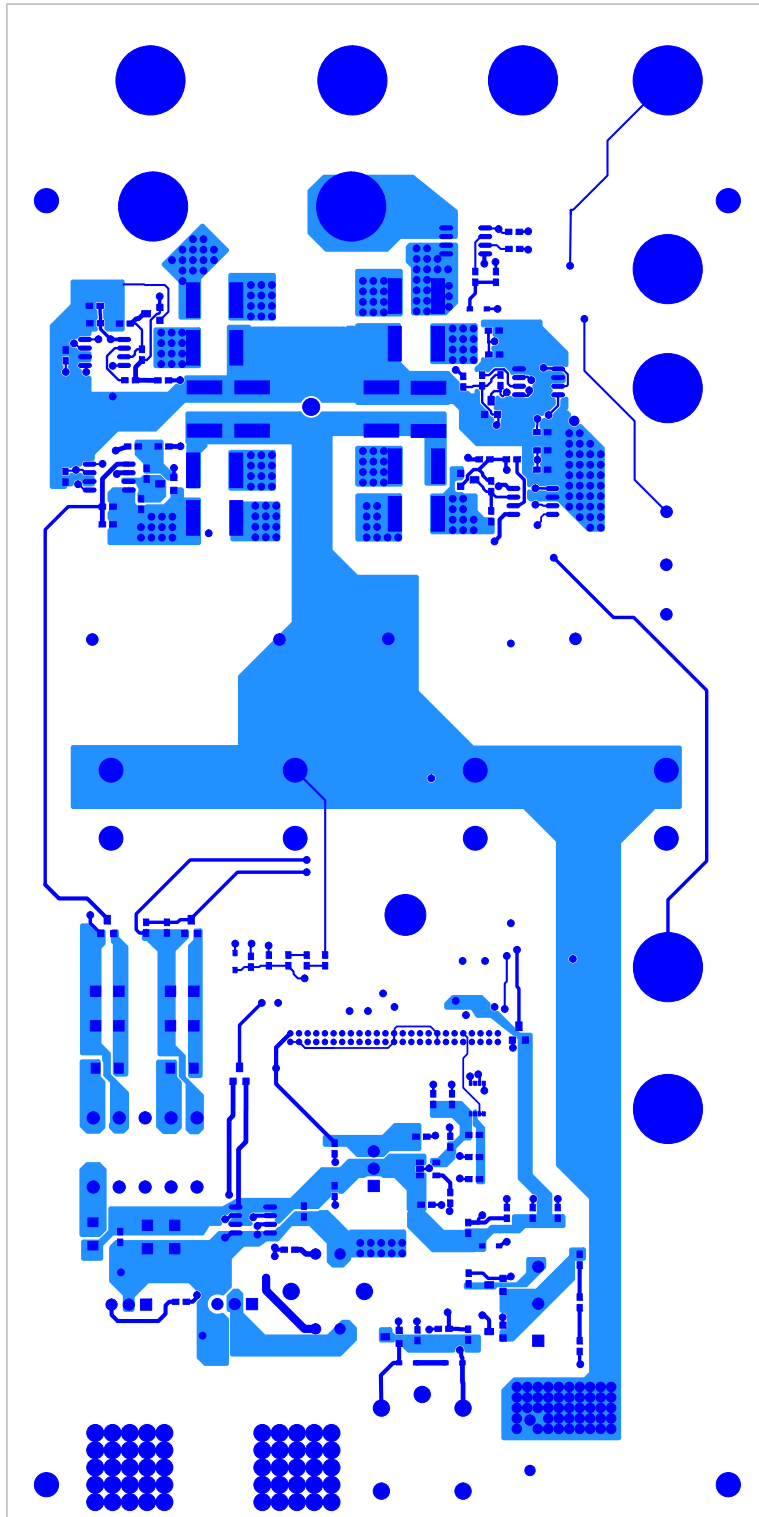
## Lähteet

- GaN Systems (2016). *GS66508T Top-side cooled 650 V E-mode GaN transistor Preliminary Datasheet*. GaN Systems Inc.
- Kaur, M., Kakar, S., and Mandal, D. (2011). Electromagnetic interference. In: *Electronics Computer Technology (ICECT), 2011 3rd International Conference on*, vol. 4, pp. 1–5.
- Marty, B., ed., (1999). *Considerations in Designing the Printed Circuit Boards of Embedded Switching Power Supplies*.
- Nise, N.S. (2011). *Control Systems Engineering*, 6th edn.
- Reusch, D. and Strydom, J. (2014). Evaluation of gallium nitride transistors in high frequency resonant and soft-switching DC-DC converters. In: *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*, pp. 464–470. ISSN 1048-2334.
- Texas Instruments (2013). *Layout Guidelines for Switching Power Supplies*. Texas Instruments.
- Tynjälä, T. (2010). *Teknillinen termodynamiikka, luentomoniste osa 1*. Lappeenranta teknillinen yliopisto.
- Zhang, H.J., ed., (2012). *PCB Layout Considerations for Non-Isolated Switching Power Supplies*.

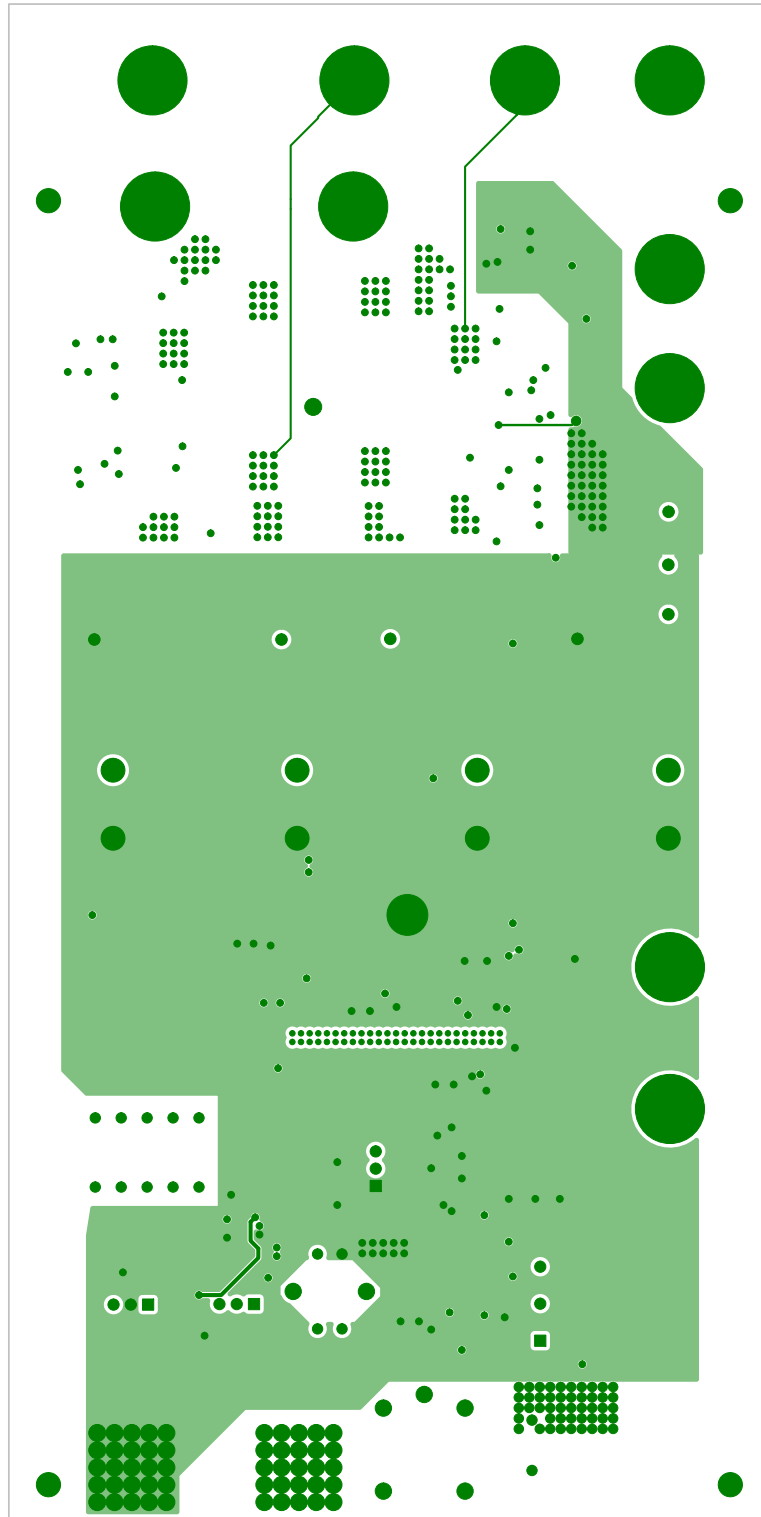
## Liitteet

### A Piirilevyn layout-kuvat

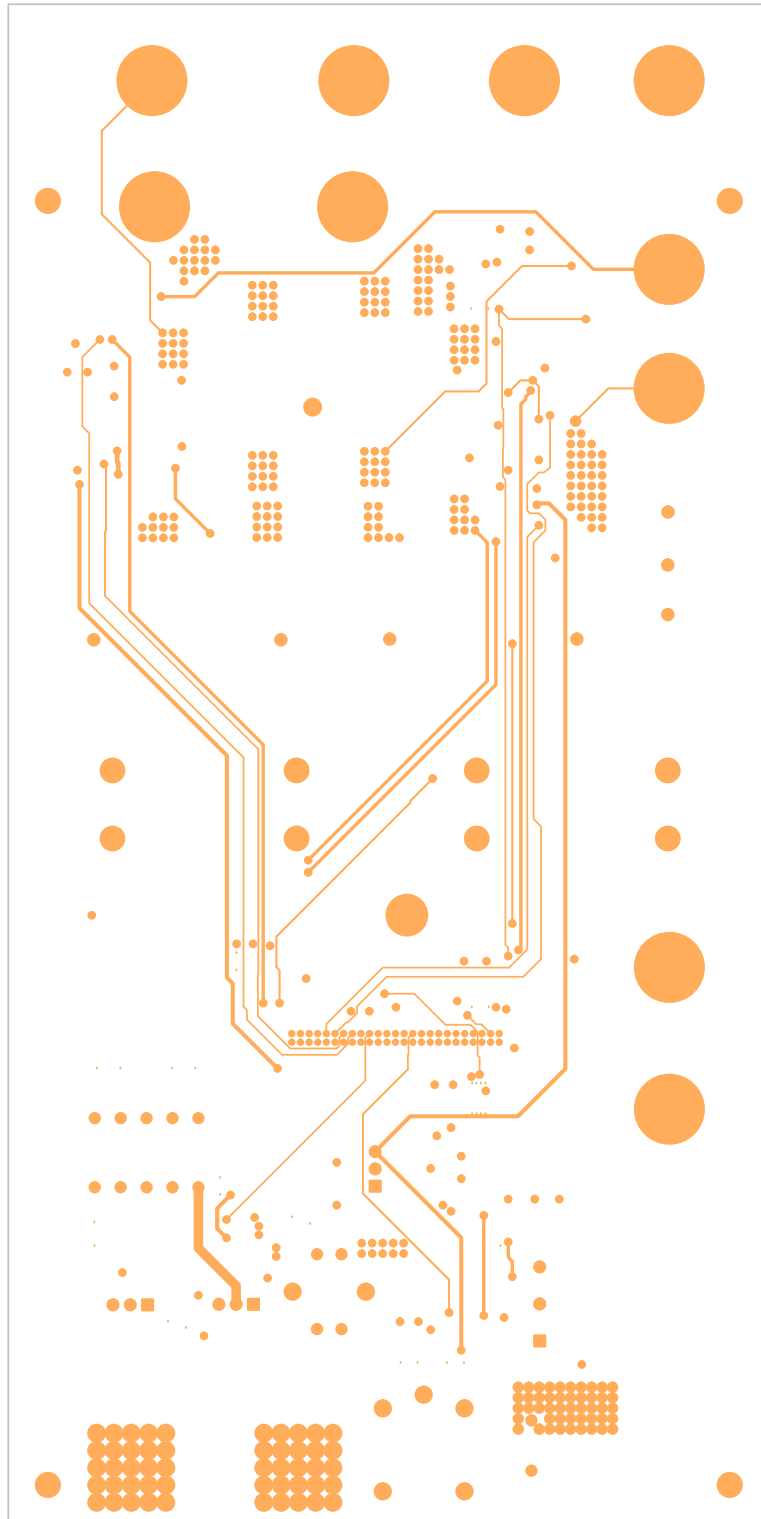
## Ylin kerros, vedot ja kaadot



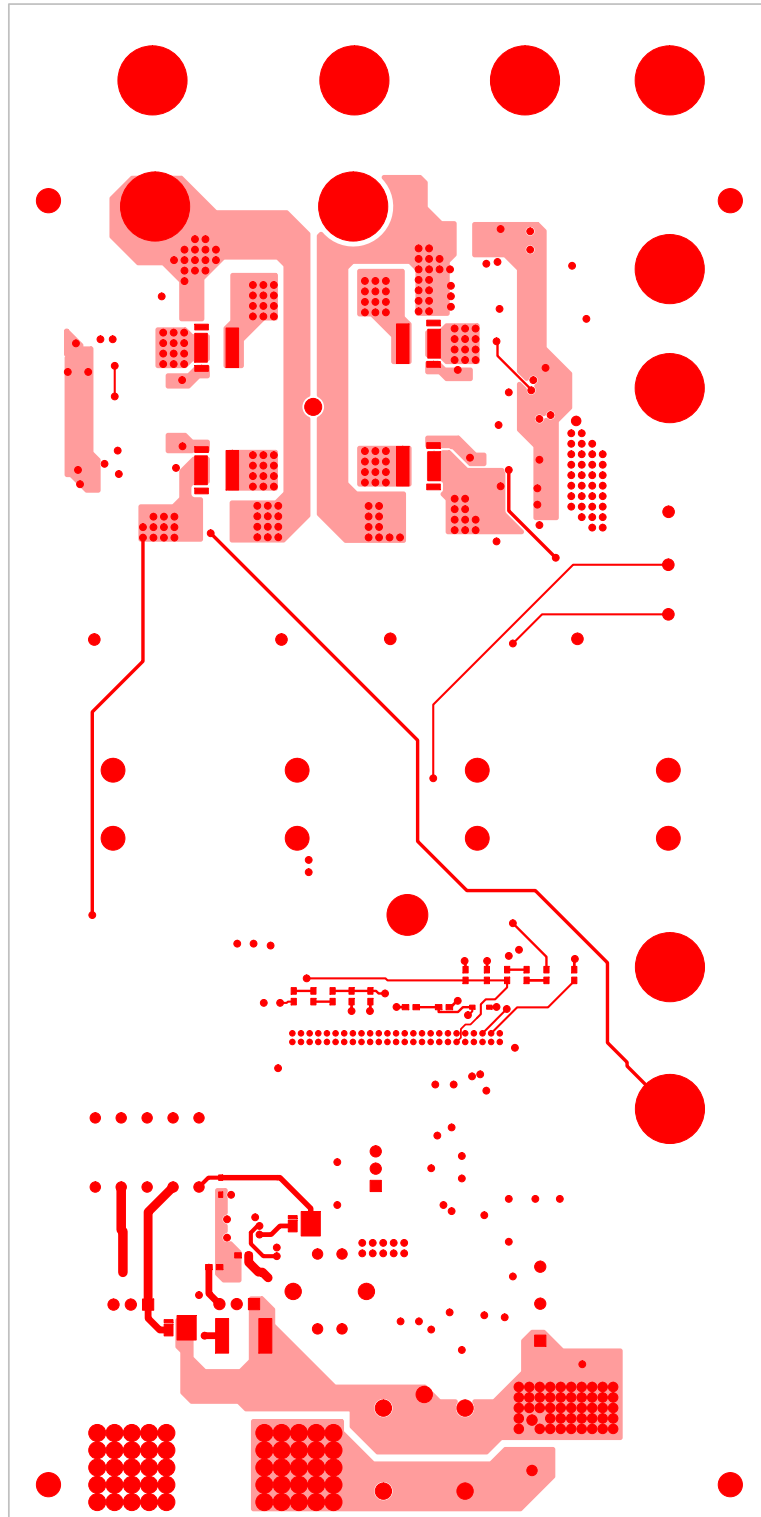
## 1. välikerros, vedot ja kaadot



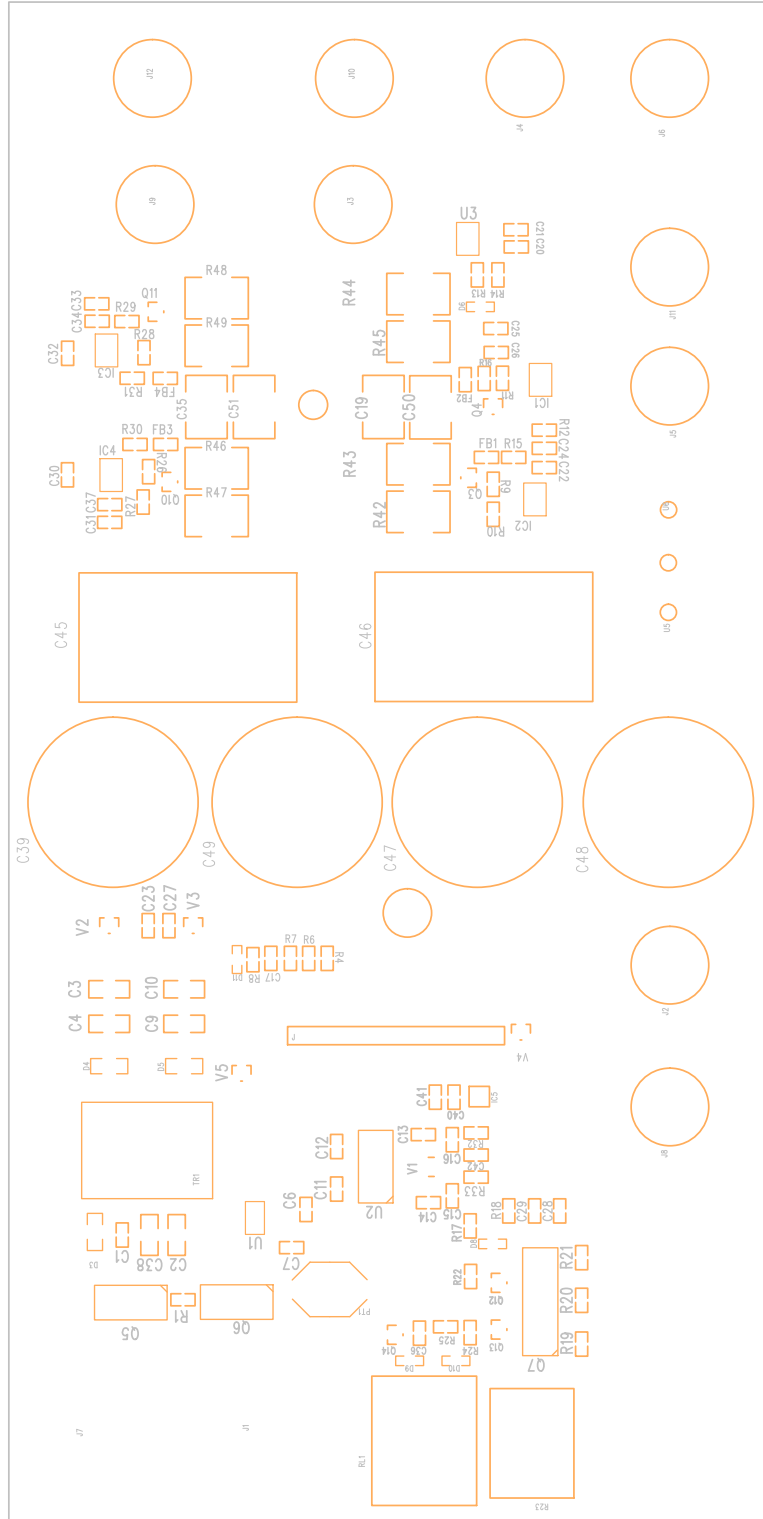
## 2. välikerros, vedot ja kaadot



## Alin kerros, vedot ja kaadot



# Ylin kerros, osasijoittelu





## Alin kerros, osasijoittelu

