

Heikki Saari

Hakkuriregulaattorin suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

9.5.2015

Tekijä Otsikko	Heikki Saari Hakkuriregulaattorin suunnittelu
Sivumäärä Aika	47 sivua + 4 liitettä 9.5.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	elektroniikka
Ohjaajat	hallituksen puheenjohtaja Mika Kuntijärvi yliopettaja Matti Fischer
<p>Insinöörityön tavoitteena oli määrittellä ja suunnitella yleisöautomaatin ohjauselektroniikan käyttöjännitteiden teholaähde. Teholähteen määrittely tehtiin alihankintayrityksessä asiakkaan automaatille asettamien määritelmien pohjalta.</p> <p>Insinöörityössä käytettiin piiri- ja piirilevysuunnitteluun Mentor Graphicsin PADS 9.3 -ohjelmistoa. Työn aikana laadittiin dokumentaatio teholahteen määrittelystä sekä suunnittelusta.</p> <p>Insinöörityön lopputuloksena syntyi määrittelyn mukaisen kolmen lähtöjännitteen teholahteen kytkentäkaavio sekä piirilevyn asettelu. Teholähteestä tehtiin myös prototyypiversio, jota mittaamalla varmistettiin laitteen toimivuus. Mittauksissa laitteesta löydettiin ongelma, jota ei projektin aikana ehditty korjata.</p>	
Avainsanat	tehoelektroniikka, hakkuri, buck, PADS

Author Title	Heikki Saari Design of a Switched Mode Power Supply
Number of Pages Date	47 pages + 4 appendices 9 May 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical engineering
Specialisation option	Electronics
Instructors	Mika Kuntijärvi, Chairman of the Board Matti Fischer, Principal Lecturer
<p>The goal of this thesis was to define and to design the power supply for the control electronics of a vending machine. The definition was made in a subcontractor company, based on the definitions for the whole vending machine provided by the customer.</p> <p>Mentor Graphics PADS 9.3 CAD software was used in the thesis. Documentation for the definition of the power supply and its design was made during the project.</p> <p>The outcome of the thesis was the logic and layout diagrams of a power supply with three different output voltages. A prototype board of the design was also built to test the designs functionality. A problem was found during the measurements that was not fixed during this thesis.</p>	
Keywords	power electronics, switched mode power supply, buck, PADS

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Jänniteregulaattorien teoriatausta	1
2.1	Jännitteen vakauttaminen ja DC/DC-muuntimet	1
2.2	Lineaariset regulaattorit	3
2.3	Hakkuriregulaattorit	4
2.3.1	Toimintaperiaate	4
2.3.2	Buck-topologia	7
2.3.3	Boost-topologia	10
2.3.4	Buck-boost-topologia	12
2.3.5	Erottavat hakkurit	15
2.4	Jännite- ja virtatakaisinkytkentä	17
2.4.1	Jännitetakaisinkytkentä	18
2.4.2	Virtatakaisinkytkentä	19
2.5	Synkroniset kytkimet	21
2.6	Piirisuunnittelu ja EMC	23
3	Teholähteiden määrittely	24
3.1	Sähköiset vaatimukset	24
3.1.1	Tulojännite	24
3.1.2	Lähtöjännite	25
3.2	Teholähteen toimintaympäristö	25
4	Hakkurikytkentöjen mitoitus ja suunnittelu	26
4.1	Ohjainpiiri	26
4.2	Komponenttien mitoitus	27
4.3	Piirilevyn suunnittelu	30
5	Regulaattorikytkentöjen mittaukset	32
5.1	Mittausjärjestelyt	32
5.2	Nousuaika	32
5.3	Rippelijännitteet	33
5.4	Pulssitettu kuorma	35
5.5	Linjaregulaatio	38

5.6	Kuormaregulaatio	40
5.7	Hyötysuhde	42
5.8	Mittaustulosten arviointi	44
6	Yhteenveto	46
	Lähteet	47

Liitteet

Liite 1. Hakkurikytkennän piirikaavio

Liite 2. Kuvat piirilevyn asettelusta

Liite 3. Kuvat piirilevystä

Liite 4. Mittatulokset

Lyhenteet

DC Tasavirta.

A/D Analog-to-Digital. Analogisen signaalin digitaaliseksi muuntaminen.

MOSFET Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor. Yleinen kytkimenä käytetty transistorityyppi.

EMC Electro Magnetic Compatibility. Sähkömagneettinen yhteensopivuus.

1 Johdanto

Insinööriyön tavoitteena on suunnitella ja mitata kolme hakkuriregulaattoria yleisöautomaatin ohjauselektronikan käyttöjännitteitä varten. Regulaattorit ovat osa suurempaa tuotekehitysprojektia. Työ tehdään vantaalaisen tehoelektronikkayrityksen, Zelteq Oy:n, asiakkaan tilauksesta.

2 Jänniteregulaattorien teoriatausta

2.1 Jännitteen vakauttaminen ja DC/DC-muuntimet

Jännitteen vakauttamisen eli reguloinnin tarkoituksena on luoda DC-jännite, eli tasajännite, joka on riippumaton ympäristön muuttujista kuten tulojännitteestä, kuormavirrasta sekä lämpötilasta. Käytännössä regulaattorit eivät kuitenkaan pysty toimimaan täysin ympäristöstään riippumatta, ja näitä epäideaalisuuksia kuvataan mm. linjaregulaatioprosentin sekä kuormaregulaatioprosentin avulla [1].

Linjaregulaatioprosentti kuvaa regulaattorin kykyä pitää lähtöjännite vakaana tulojännitteen muuttuessa. Se voidaan määrittellä prosenttimääräisenä lähtöjännitteen muutoksena tietyn tulojännitteen muutoksen johdosta. Kun lähtöjännitteen muutos tiedetään jollain tulojännitealueella, voidaan linjaregulaatioprosentti laskea yhtälön (1) mukaisesti [1].

$$\text{Linjaregulaatio} = \left(\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} \right) 100 \% \quad (1)$$

ΔV_{out} on lähtöjännitteen muutos

ΔV_{in} on tulojännitteen muutos

Vaihtoehtoisesti linjaregulaatioprosentti voidaan ilmoittaa yksikössä %/V, jolloin luku kertoo, kuinka monta prosenttia lähtöjännite muuttuu jokaista voltia kohden, jonka tulojännite muuttuu. Tässä tapauksessa linjaregulaatioprosentti voidaan laskea yhtälöstä (2)[1].

$$\text{Linjaregulaatio} = \frac{\Delta V_{out}/V_{out} * 100 \%}{\Delta V_{in}} \quad (2)$$

ΔV_{out} on lähtöjännitteen muutos

V_{out} on nimellinen lähtöjännite

ΔV_{in} on lähtöjännitteen muutos

Kuormaregulaatioprosentti vuorostaan kuvaa regulaattorin kykyä pitää lähtöjännite vakaana kuormavirran muuttuessa, ja se voidaan määritellä prosenttimääräisenä lähtöjännitteen muutoksena tietyn lähtövirran muutoksen johdosta [1]. Kuormaregulaatioprosenttia voidaan kuvata esimerkiksi lähtöjännitteen prosenttimääräisenä muutoksena avoimen piirin (ei lainkaan kuormaa), ja täyden kuormavirran välillä. Näin määriteltynä kuormaregulaatioprosentti voidaan laskea yhtälöstä (3) [1].

$$\text{Kuormaregulaatio} = \left(\frac{V_{OC} - V_{FL}}{V_{FL}} \right) 100 \% \quad (3)$$

V_{OC} on lähtöjännite avoimeen piiriin

V_{FL} on lähtöjännite maksimi kuormavirralla

Lähtöjännitteen vakaus lämpötilan suhteen riippuu pitkälti komponenttien vakaudesta lämpötilan suhteen ja siitä, kuinka hyvin lähtöjännitteen vakauden osalta kriittiset komponentit ovat samassa lämpötilassa.

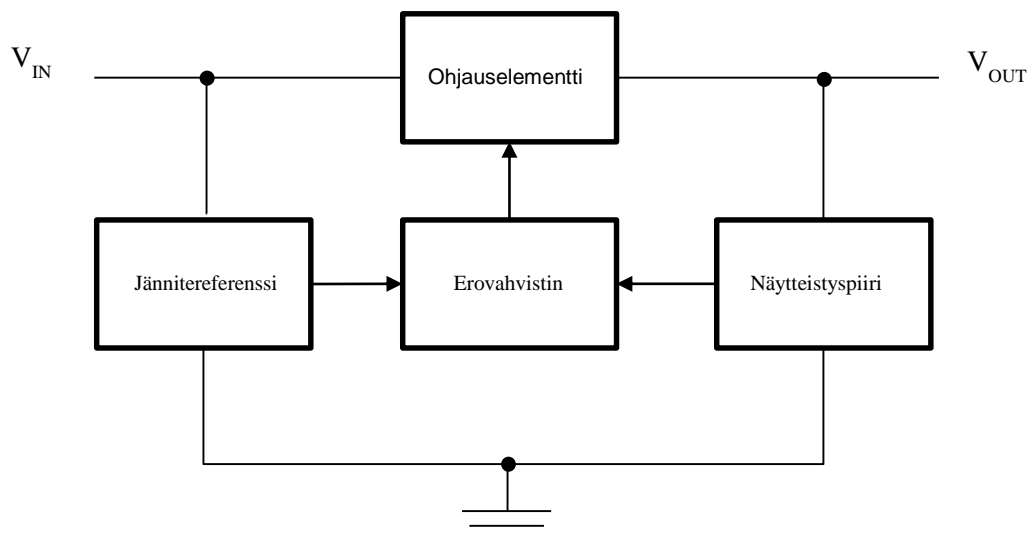
DC/DC-muuntimet ovat jänniteenvakauttamisessa erikoistapaus, jossa sekä tulo- että lähtöjännite ovat tasajännitteitä. Niitä käytetään laajalti tehonsa sähköverkosta tai paristoista ottavien laitteiden teholähteissä. DC/DC-muuntimet jaetaan yleensä karkeasti lineaarisiin regulaattoreihin sekä hakkuriregulaattoreihin.

2.2 Lineaariset regulaattorit

Lineaarisissa regulaattoreissa lähtöjännitettä säädetään muuntamalla ylimääräinen jännite yleensä lämmöksi resistiivisessä ohjauselementissä. Tämän takia korkean muuntosuhteen (tulojännitteen suhde lähtöjännitteeseen) regulaattoreissa hyötysuhde on matala, ja laitteen lämpösuunnittelusta tulee haasteellista. Toisaalta lineaariregulaattorin linja- ja kuormaregulaatioprosentit ovat tyypillisesti erittäin hyvät ja lähtöjännite erittäin vakaa, minkä takia niitä käytetään paljon A/D-muuntimien, joilla muunnetaan analoginen signaali digitaaliseksi, sekä herkkien analogipiirien teholähteissä.

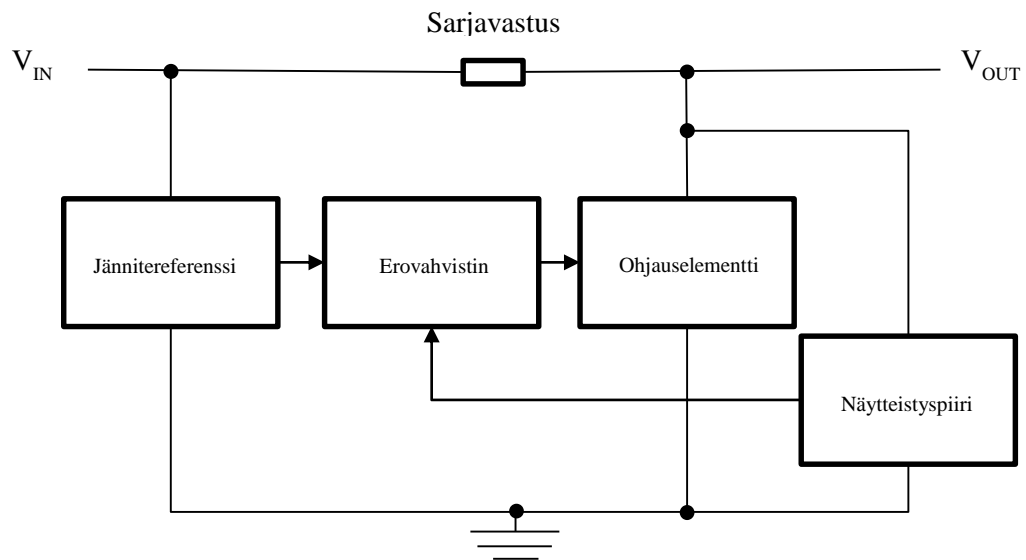
Lineaariregulaattorit voidaan jakaa karkeasti sarja- ja ohitusregulaattoreihin sen mukaan, missä kohti piiriä ohjauselementti on.

Sarjaregulaattorissa, jonka lohkokaavio on esitetty kuvassa 1, ohjauselementti on sarjassa tulon ja lähdön välillä, ja ohjauselementin ylitse jäävää jännitettä säädetään. Eroahvistin vertaa lähtöjännitteestä näytteistettyä osaa referenssijännitteeseen, ja säättää ohjauselementtiä tarvittavalla tavalla nollatakseen jännitteiden eron [1].



Kuva 1. Sarjaregulaattorin lohkokaavio [1]

Ohitusregulaattorissa, jonka lohkokaavio on esitetty kuvassa 2, ohjauselementti on kuorman kanssa rinnakkain, ja tulon ja lähdön välillä sarjassa on kiinteä resistiivinen komponentti, jonka virtaa säädellään ohjauselementillä. Kuten sarjaregulaattorissa myös ohitusregulaattorissa erovahvistin vertaa referenssjännitettä näytteeseen lähtöjännitteestä ja säätelee ohjauselementtiä pitääkseen näiden eron nollassa [1].



Kuva 2. Ohitusregulaattorin lohkokaavio [1]

Lineaariregulaattoreissa käytetään ohjauselementtinä tyypillisesti transistoria, joka ohjataan sen lineaariselle toiminta-alueelle, jolloin se toimii resistiivisen komponentin tavoin. Lineaariregulaattoreiden toimintaperiaatteesta johtuen niiden lähtöjännite on aina regulaattorin kynnsjännitteen verran tulojännitettä pienempi. Perinteisellä lineaariregulaattoripiirillä, esimerkiksi 78xx-sarja, kynnsjännite on noin 2 V ja ns. Low-Drop-Out-piirillä jopa alle 0,1 V.

2.3 Hakkuregulaattorit

2.3.1 Toimintaperiaate

Toisin kuin lineaariregulaattoreissa, hakkuregulaattoreissa kuormajännitettä pidetään vakaana varastoimalla energiaa induktiivisen komponentin magneettikenttään, ja

purkamalla sitä kapasitiiviseen komponentin sähkökenttään, josta energia siirretään eteenpäin kuormalle. Tämä tapahtuu kytkemällä tulojännitettä kelan yli päälle ja pois sellaisella pulssisuhteella, että lähtöjännite on halutun suuruinen. Koska kelan virta- ja jänniteyhtälöt ovat seuraavanlaiset [5]

$$U_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} \quad (4)$$

$$I_L(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_0+t} U_L(t) dt + I_{t_0} \quad (5)$$

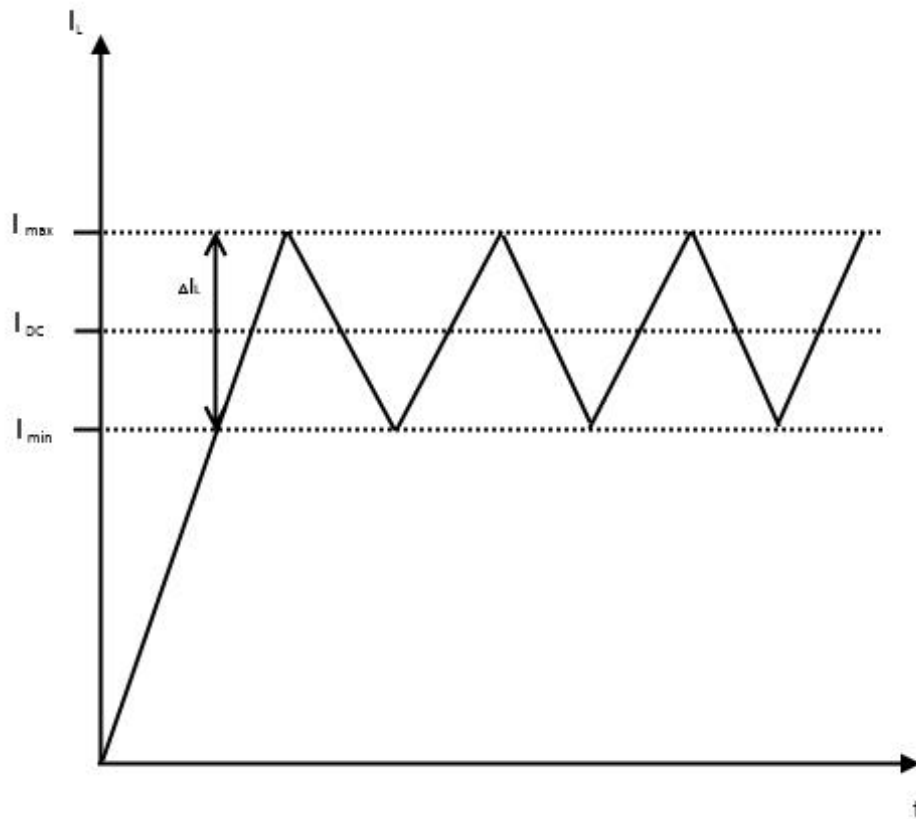
$U_L(t)$ on kelan jännite ajan funktiona

L on kelan itseinduktanssi

$I_L(t)$ on kelan virta ajan funktiona

I_{t_0} on kelan virta hetkellä t_0

kelan virta alkaa kasvaa lineaarisesti, kun sen yli kytketään tasajännite, ja vastaavasti se alkaa laskemaan saavuttamastaan huippuarvosta, kun kelasta aletaan purkaa energiaa.



Kuva 3. Kelan virta tyypillisessä hakkurikytkennässä

Kuvassa 3 i_{\max} ja i_{\min} ovat kelan maksimi- ja minimivirrat, i_{DC} on virran keskiarvo pitkällä aikavälillä ja Δi_L on kelan virran vaihteluväli eli ns. rippelivirta. Rippelivirta on havainnollisuuden vuoksi liioitellun suuri, ja sen tulee hakkurin ollessa ns. steady-statessa olla keskiarvoltaan 0. Kelaan varautunut energia voidaan laskea yhtälöstä (6).

$$w(t) = \frac{1}{2}Li(t)^2 \quad (6)$$

w(t) on kelan energia ajan funktiona

L on kelan itseinduktanssi

i(t)² on kelan virran neliö ajan funktiona

Kondensaattorin virta- ja jänniteriippuvuudet ovat vuorostaan yhtälöiden (7) ja (8) mukaiset [5].

$$I_c(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt} \quad (7)$$

$$U_c(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_0+t} I_c(t) dt + U_{t_0} \quad (8)$$

$I_c(t)$ on kondensaattorin virta

C on kondensaattorin kapasitanssi

$U_o(t)$ on kondensaattorin jännite

U_{t_0} on kondensaattorin jännite hetkellä t_0

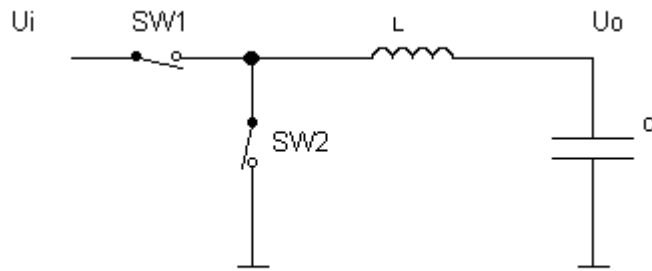
Kondensaattorin ylitse olevassa jännitteessä on myös hakkurikytkennässä pieni vaihteleva rippelijännite, jonka muoto riippuu siitä, mitä topologiaa käytetään. Esimerkiksi jännitettä nostavassa boost-topologiassa se on hyvin samanlainen kuin kelan rippelivirta [4]. Rippelijännite on käytännössä hyvin pieni, ja se usein oletetaan hakkureita analysoidessa mitättömän pieneksi, jolloin sitä ei huomioida.

Koska jännitteen regulointi perustuu energian muuttamiseen muodosta toiseen hyvin pienellä määrällä resistiivisiä komponentteja, hakkuriregulaattoreilla voidaan päästä hyvin korkeisiin, käytännössä yli 90 %:n, hyötysuhteisiin. Hakkuriregulaattorien häviöt johtuvat pitkälti kytkiminä käytettävien transistorien ja diodien johtumis- sekä kytkentähäviöistä, reaktiivisten komponenttien sarjaresistanssista sekä ohjauslogiikan tarvitsemasta tehosta.

Hakkuriregulaattorikytkennöillä lähtöjännitettä voidaan tulojännitteen suhteen nostaa, laskea tai kääntää polariteetiltaan. Lähtöjännite voidaan myös galvaanisesti erottaa tulojännitteestä, jos ollaan tekemisissä verkkojännitteiden kanssa. Seuraavaksi esitellään yleisimmät hakkurikytkennät sekä niiden toiminta jatkuvassa tilassa, jolloin kelavirta ei koskaan putoa noltaan. Tyypillisesti käytännön kytkennöissä kytkimenä SW1 on transistori, ja kytkimenä SW2 diodi. Epäjatkuvan tilan analyysit ohitetaan.

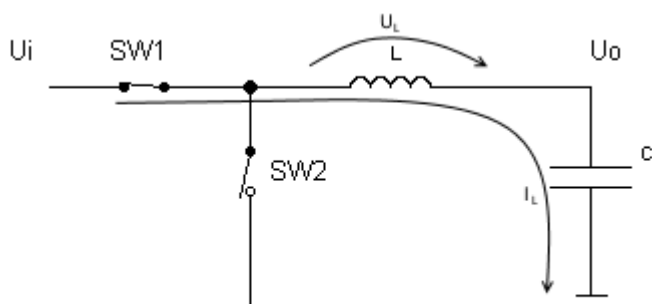
2.3.2 Buck-topologia

Kun lähtöjännitettä halutaan laskea tulojännitteeseen nähden, käytetään ns. buck-topologiaa, joka on esitetty kuvassa 4. Kuvassa U_i on tulojännite ja U_o lähtöjännite.



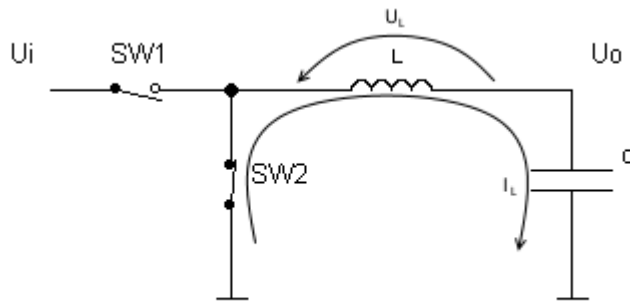
Kuva 4. Buck-topologia [6]

Kytкимиä kytetään vuorotellen päälle ja pois sen mukaan, onko lähtöjännite haluttua suurempi vai pienempi, eli halutaanko kelaan ladata energiaa vai halutaanko sitä purkaa kondensaattoriin.



Kuva 5. Kelan lataus

Kuvan 5 tilanteessa, jossa kytkin SW1 on kiinni ja kytkin SW2 on auki, kelan yli vaikuttaa jännite $U_i - U_o$, joka oletetaan vakioksi lyhyellä aikavälillä. Tällöin kelan virta kasvaa lineaarisesti. Koska kelan virta ja jännite ovat samansuuntaiset, varastoi kela itseensä energiaa. Kondensaattorin kapasitanssin tulee olla riittävän suuri, jotta lähtöjännite U_o ei muutu merkittävästi. Kun kelan virran on annettu kasvaa riittävästi, alkaa kondensaattorin jännite kasvaa, jolloin kelasta täytyy purkaa energiaa jännitereguloinnin säilyttämiseksi. Tämän saavuttamiseksi SW1 avataan ja SW2 suljetaan kuvan 6 esittämällä tavalla.



Kuva 6. Kelan purku

Tässä tilanteessa kelan yli vaikuttaa jännite U_o , mutta nyt vastakkaiseen suuntaan kuin aiemmin. Koska lähtöjännite pysyy lyhyellä aikavälillä vakiona, laskee kelan virta lineaarisesti huippuarvostaan. Kelan jännite ja virta ovat nyt keskenään erisuuntaiset, jolloin kela antaa energiaa muulle kytkennälle. Kun kelan virta pääsee laskemaan riittävän paljon, alkaa kondensaattorin jännite pudota merkittävästi, jolloin kelaan täytyy taas varastoida lisää energiaa jännitereguloinnin säilyttämiseksi, ja silloin siirrytään takaisin kuvan 5 tilanteeseen. Näiden kahden kytkentärajan seurauksena tulee kelan virran keskiarvon, I_{DC} , olla yhtä suuri kuin kuormavirran, jotta lähtöjännite pysyisi vakaana.

Tyypillisesti jännitettä laskevan hakkurin pulssisuhteeksi D ilmoitetaan kytkimen SW1 pulssisuhde. Tällöin kytkin on auki ja kiinni seuraavanlaisesti:

$$t_{on} = DT \quad (9)$$

$$t_{off} = (1 - D)T \quad (10)$$

t_{on} on aika jolloin kytkin johtaa

t_{off} on aika jolloin kytkin ei johda

D on pulssisuhde

T on kytkentätapahtuman jaksonaika

Näiden perusteella voidaan yllä esitetystä kytkentätilanteista muodostaa yhtälö (11).

$$(U_i - U_o)DT - U_o(1 - D)T = 0 \quad (11)$$

Yhtälöstä (11) sieventämällä saadaan pulssisuhteelle riippuvuus tulo- ja lähtöjännitteiden suhteesta yhtälön (12) esittämällä tavalla.

$$D = \frac{U_o}{U_i} \quad (12)$$

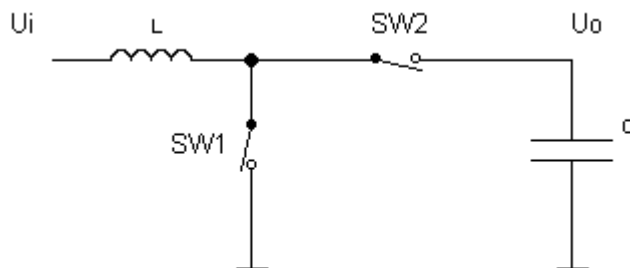
Koska pulssisuhte voidaan ilmaista myös kytkimen päälläoloajan ja jaksonajan suhteena yhtälön (13) mukaan.

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (13)$$

Pulssisuhte ei voi koskaan olla suurempi kuin 1, joten lähtöjännitteen täytyy myös olla pienempi tai yhtä suuri kuin tulojännitteen.

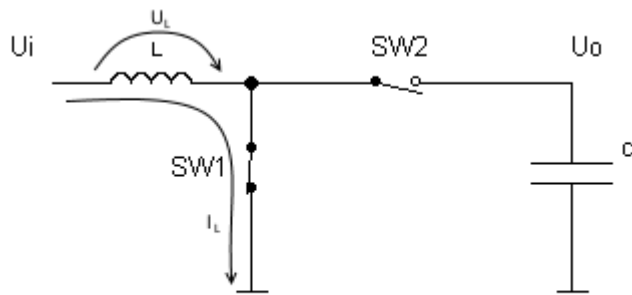
2.3.3 Boost-topologia

Kun lähtöjännitteestä halutaan tulojännitettä suurempi, käytetään ns. Boost-topologiaa, joka on esitetty kuvassa 7.



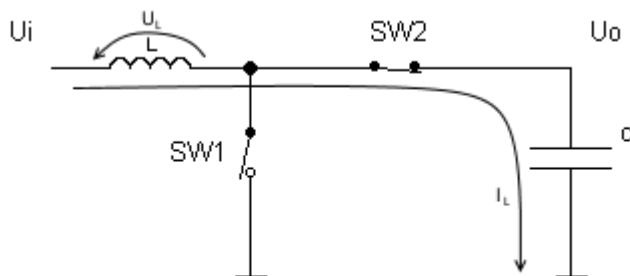
Kuva 7. Boost-topologia [6]

Samoin kuin jännitettä laskevassa kytkennässä myös jännitettä nostavassa kytkennässä kytkimiä SW1 ja SW2 kytetään vuorotaiiin päälle ja pois sen mukaan, tarvitseeko hetkellistä lähtöjännitettä nostaa vai laskea jännitereguloinnin saavuttamiseksi. Kuvassa 8 on esitettyä kytkinten asennot tilanteessa, jossa kelaan ladataan energiaa.



Kuva 8. Kelan lataus

Kun kytkin SW1 on kiinni ja kytkin SW2 auki, kelan yli on jännite U_i , joka oletetaan lyhyellä ajalla vakioksi. Tällöin kelan virta kasvaa lineaarisesti. Koska kelan virta ja jännite ovat samansuuntaiset, varastoi kela itseensä energiaa. Kun kondensaattorin yli oleva jännite on laskenut kuormavirran vaikutuksesta merkittävästi, täytyy siihen purkaa kelasta energiaa jännitereguloinnin säilyttämiseksi, ja siirrytään kuvan 9 esittämään tilanteeseen, jossa SW1 avataan ja SW2 suljetaan.



Kuva 9. Kelan purku

Kun kelasta aletaan purkamaan energiaa, alkaa sen virta taas laskea, jolloin kela synnyttää yhtälön (4) mukaisesti ylitseen jännitteen, joka vastustaa virran muutosta. Tällöin kelan jännite on samansuuntainen tulojännitteen kanssa, jolloin lähtöjännitteen täytyy Kirchoffin jännitelain mukaan olla tulojännitteen ja kelan synnyttämän jännitteen summa. Kelan virta ja jännite siis ovat tässä tilanteessa erisuuntaiset, eli kela purkaa energiaansa kondensaattoriin, ja kun kondensaattorissa on niin paljon varausta, että lähtöjännite muuttuu merkittävästi, siirrytään takaisin kuvan 8 tilanteeseen.

Hakkuriregulaattorin normaalitoiminnassa kelavirran täytyy olla kytkentäjakson alussa yhtä suuri kuin kytkentäjakson lopussa, ja kelavirran muutoksiin pätee yhtälöt (14) ja (15).

$$\Delta I_{L_{on}} = \frac{DT}{L} U_i \quad (14)$$

$$\Delta I_{L_{off}} = \frac{(U_i - U_o)(1-D)T}{L} \quad (15)$$

Nämä kaksi asiaa voidaan yhdistää yhtälön (16) esittämällä tavalla.

$$\frac{DTU_i}{L} + \frac{(U_i - U_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad (16)$$

Tämä voidaan sieventämää yhtälön (17) esittämään muotoon.

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1-D} \quad (17)$$

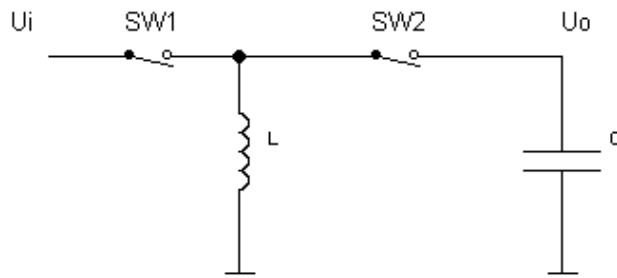
Yhtälö (17) voidaan järjestellä uudelleen, jotta saadaan selville pulssisuhde D.

$$D = 1 - \frac{U_i}{U_o} \quad (18)$$

Yhtälöstä (17) nähdään, että lähtöjännite on aina tulojännitettä suurempi ja pulssisuhteen lähestyessä yhtä lähtöjännite lähestyy ääretöntä, sekä pulssisuhteen lähestyessä nollaa lähtöjännite lähestyy tulojännitettä.

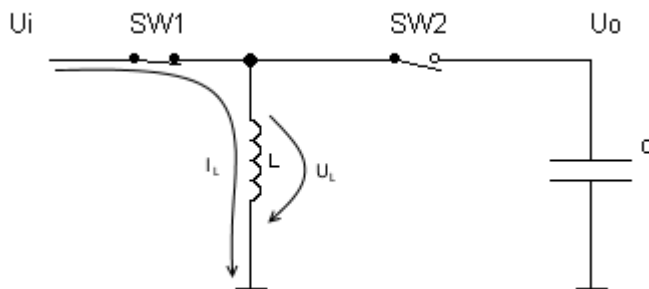
2.3.4 Buck-boost-topologia

Jos lähtöjännitteen tulee olla polaarisuudeltaan vastakkainen tulojännitteeseen nähden, käytetään ns. buck-boost-topologiaa, joka on esitetty kuvassa 10.



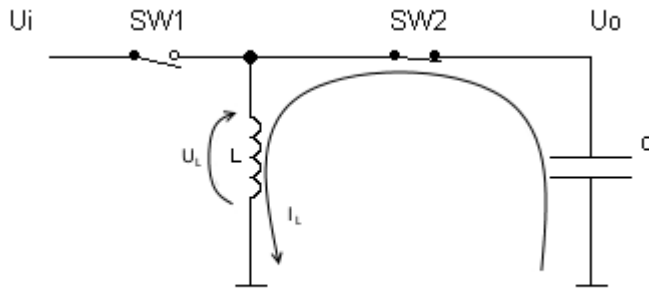
Kuva 10. Buck-Boost-topologia [6]

Myös jännitteen kääntävässä kytkennässä kytkimiä SW1 ja SW2 kytketään vuorotahtiin päälle ja pois lähtöjännitteen pitämiseksi vakaana. Kuvassa 11 on esitetty tilanne, jossa kelaan ladataan energiaa.



Kuva 11. Kelan lataus

Kun SW1 on kiinni ja SW2 auki, kelan ylitse on jännite U_i , jonka oletetaan pysyvän vakiona lyhyen aikavälin tarkastelussa. Koska kelan ylitse on vakiojännite, alkaa sen virta kasvamaan lineaarisesti. Kelan virta on samansuuntainen sen yli olevan jännitteen kanssa, jolloin kela ottaa energiaa tulojännitteestä ja varastoi sitä magneettikenttäänsä. Kun kondensaattorin jännite on muuttunut kuormavirran vaikutuksesta merkittävästi, aletaan energiaa purkaa kelasta muuttamalla kytkinten asennot kuvan 12 esittämällä tavalla.



Kuva 12. Kelan purku

Kun kelasta aletaan purkaa energiaa kondensaattoriin alkaa myös sen virta laskea, jolloin kela synnyttää yhtälön (4) mukaisesti ylitsensä muutosta vastustavan jännitteen, joka on polariteetiltaan vastakkainen tulojännitteeseen nähden. Tällöin Kirchoffin jännitelain mukaan myös lähtöjännitteen täytyy olla polariteetiltaan vastakkainen tulojännitteeseen nähden. Tällöin kelan virta ja jännite ovat tässä tilanteessa erisuuntaiset, jolloin kela purkaa energiaa magneettikentästään lähtöön. Kun lähtöön on purettu niin paljon energiaa, että lähtöjännite alkaa merkittävästi muuttumaan, käännetään kytkimet kuvan 11 esittämään asentoon.

Kuten jännitettä nostavassa kytkennässä, myös jännitteen kääntävässä kytkennässä kytkentäjakson virtojen muutosten keskiarvo on 0. Kytkimen SW1 ollessa kiinni virran muutokselle pätee yhtälö (19).

$$\Delta I_{L_{on}} = \frac{U_i DT}{L} \quad (19)$$

Kytkimen SW1 ollessa auki vuorostaan pätee yhtälö (20).

$$\Delta I_{L_{off}} = \frac{U_o(1-D)T}{L} \quad (20)$$

Nämä yhdistämällä saadaan yhtälö (21).

$$\frac{U_i DT}{L} + \frac{U_o(1-D)T}{L} = 0 \quad (21)$$

Yhtälö (21) voidaan sieventää yhtälön (22) muotoon.

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{D}{D-1} \quad (22)$$

Yhtälö (22) voidaan uudelleenjärjestää yhtälöksi (23) pulssisuhteen selvittämiseksi.

$$D = \frac{U_o}{U_o - U_i} \quad (23)$$

Yhtälöstä (22) nähdään, että lähtöjännite on itseisarvoltaan tulojännitettä pienempi pulssisuhteen ollessa alle 50 % ja suurempi pulssisuhteen ollessa yli 50 %.

2.3.5 Erottavat hakkurit

Jos tulojännite otetaan sähköverkosta, pitää lähtöjännite erottaa siitä galvaanisesti turvallisuussyistä. Tämän voi tehdä käyttämällä verkkovirran taajuudelle suunniteltua muuntajaa, jonka täytyy matalan käyttötaajuuden vuoksi olla suurikokoinen. Jos muuntaja halutaan pienempään tilaan, voidaan vaihtojännite esimerkiksi tasasuunnata ja tämän jälkeen kytkeä tasajännitettä paljon verkkojännitteen taajuutta suuremmalla taajuudella muuntajan yli, jolloin sen fyysisiä mittoja voidaan pienentää yhtälöiden (24), (25) ja (26) mukaan [2].

$$U_{rms} = K_v f N B_{max} A_m \quad (24)$$

$$K_v = \frac{k}{\tau f} \quad (25)$$

$$k = \frac{U_{rms}}{u_{avg}} \quad (26)$$

U_{rms} on tulojännitteen tehollisarvo

f on tulojännitteen taajuus

N on ensiökää min kierrosten lukumäärä

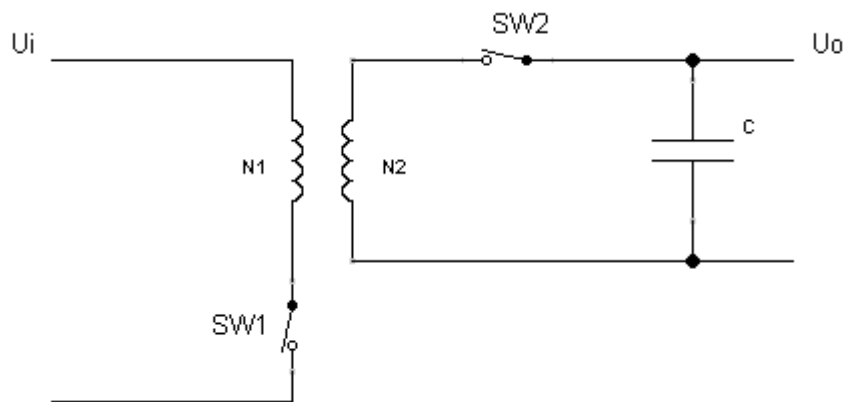
B_{max} on muuntajan vuontiheyden maksimiarvo

A_m on muuntajan ytimen efektiivinen koko

τ on tulojännitteen jaksonaika

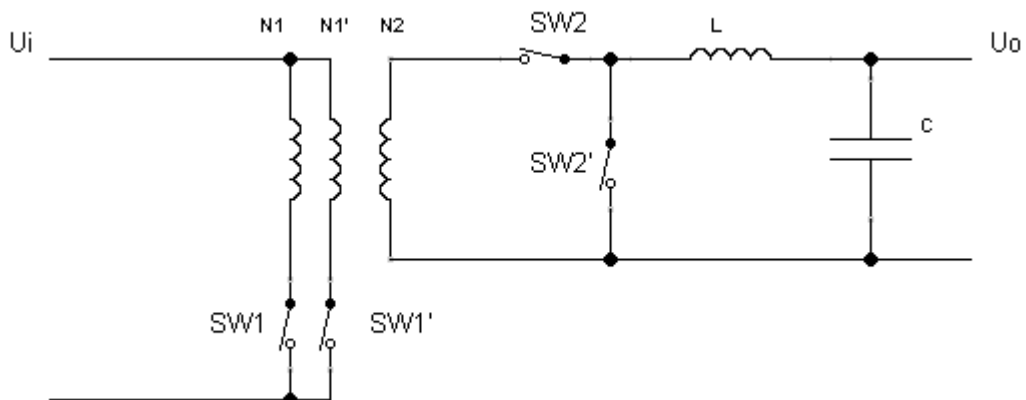
U_{avg} on tulojännitteen keskiarvo

Kaksi yleisintä erottavaa hakkuriregulaattoritopologiaa ovat flyback ja forward, ja ne esitellään seuraavaksi pintapuolisesti.



Kuva 13. Flyback-topologia [6]

Kuvan 13 flyback-kytkennässä käytetään muuntajaa energiavarastona erillisen kelan sijasta, jolloin kelan ferriitissä täytyy olla kohtalaisen suuri ilmarako, jotta siihen saisi riittävästi energiaa varastoitua lähtöjännitteen vakauttamiseksi. Tämä pienentää muuntajan ytimen efektiivistä kokoa, joka puolestaan johtaa siihen, että ensiöön tarvitaan enemmän kierroksia [2]. Kytkimen SW1 ollessa kiinni kytkin SW2 on auki, jolloin ensiössä ladataan kelaan energiaa, ja toisiossa sitä puretaan kondensaattorista. Kun kytkinten asennot käännetään, siirretään muuntajaan varastoitunut energia kondensaattoriin.

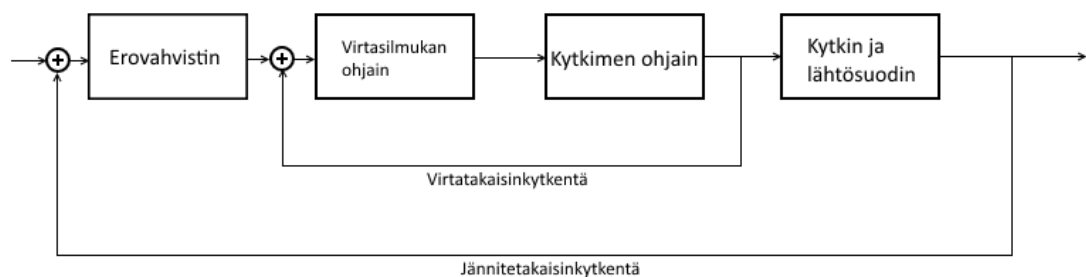


Kuva 14. Forward-topologia [6]

Toisin kuin flyback-kytkennässä, kuvan 14 forward-kytkennässä ei muuntajassa ole lainkaan ilmarakoa, jonka johdosta sen ensiöön tarvitaan huomattavasti vähemmän käämin kierroksia. Ilmaraon puutteen takia energiavarastoksi tosin tarvitaan kytkentään erillinen kela, sekä ytimen saturoitumisen estämiseksi muuntajan ensiöön apukäämi, jossa on yhtä monta kierrosta kuin pääkäämissä, mutta joka on käämitty vastakkaiseen suuntaan ytimen demagnetointia varten. Tämän takia kytkennän pulssisuhde ei myöskään voi olla yli 50 %. Toision erilliseen kelaan varastoidaan energiaa kytkinten SW1 ja SW2 ollessa kiinni, jolloin kytkimet SW1' ja SW2' ovat auki. Kun kytkinten tilat vaihdetaan, puretaan kelasta energiaa piirin lähtöön. Kytkin SW1' on tyypillisesti diodi.

2.4 Jännite- ja virtatakaisinkytkentä

Takaisinkytkennällä tarkoitetaan tässä systeemin, tai jonkin sen osan jollain tavalla skaalatun lähtösignaalin käyttöä systeemin säädössä. Hakkuriregulaattoreissa takaisinkytkettävänä signaaleina käytetään tyypillisesti lähtöjännitettä sekä kelan virtaa.



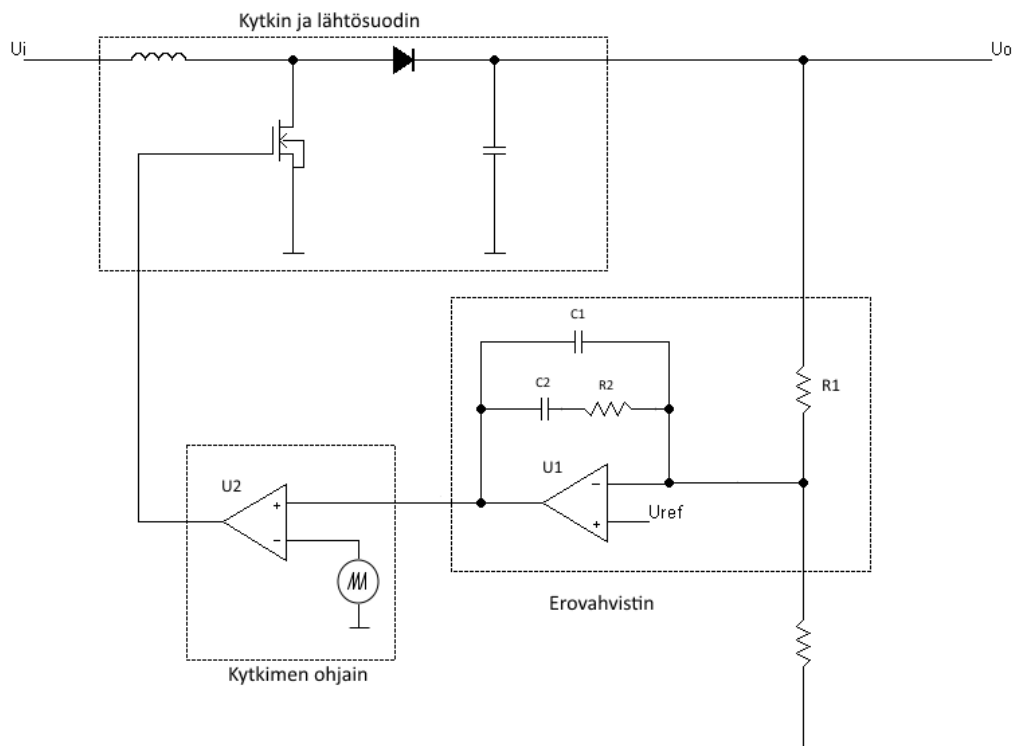
Kuva 15. Jännite- ja virtatakaisinkytketyn hakkurin ohjaussilmukka

Tämä takaisinkytkentärakenne voidaan esittää yleisesti kuvan 15 mukaisesti [3; 4]. Kuvassa lähtösuotimeen kuuluvat lähdön kela ja kondensaattori, sekä muut mahdolliset komponentit. Kun kuvan lohkojen siirtofunktiot tunnetaan voidaan takaisinkytkentäsilmukalle määrittää sopiva kompensatio halutun steady-state- ja transienttivasteen aikaansaamiseksi. Tyypillisesti kompensatio tehdään erovahvistimessa sekä virtarampin jyrkennyksellä.

Seuraavaksi käsitellään jännitettä nostavaa kytkentää esimerkkinä käyttäen jännite- ja virtatakaisinkytkennän pääperiaatteet.

2.4.1 Jännitetakaisinkytkentä

Jännitetakaisinkytkentä mittaa lähtöjännitettä, ja tuo sen sopivasti skaalattuna erovahvistimelle, jolloin lähtöjännite voidaan vakauttaa halutulle tasolle.



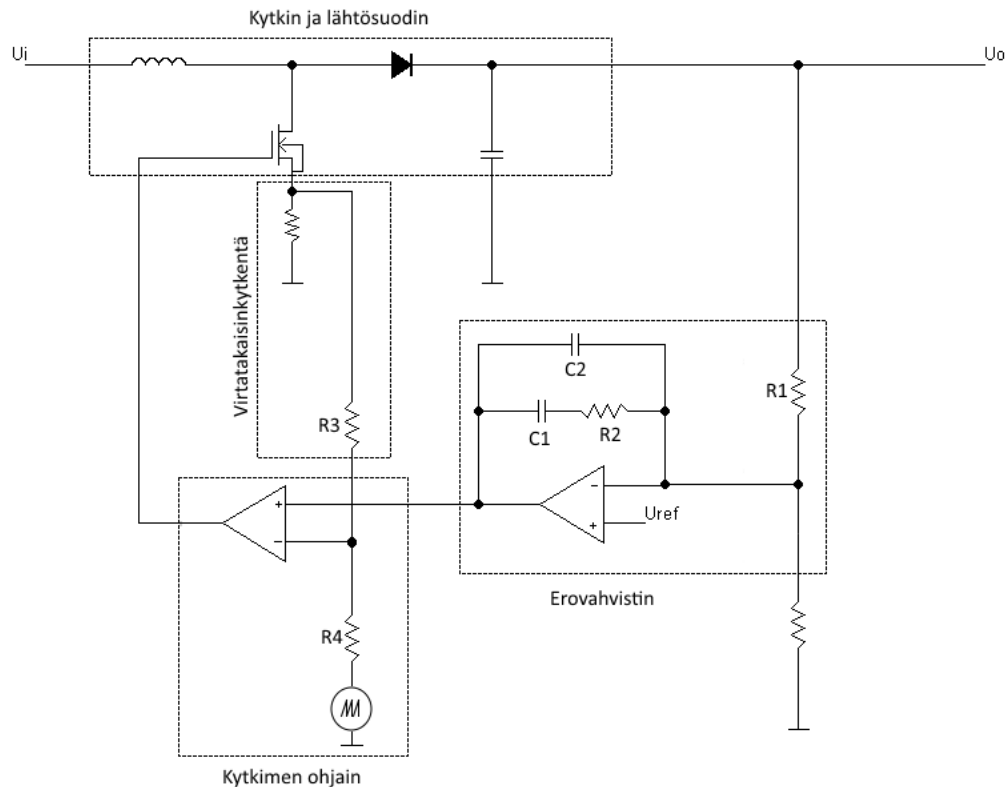
Kuva 16. Jännitetakaisinkytkennän periaatekytkentä

Lähtöjännite mitataan tyypillisesti suoraan resistiivisellä jännitteenjaolla lähtöjännitteestä, kuten kuvassa 16. Jännitteenjako mitoitetaan niin että lähdön ollessa halutulla tasolla on erovahvistimelle U_1 syötettävä jännite samansuuruinen kuin U_{ref} .

Erovahvistimen lähtöjännite syötetään komparaattorille U2, jonka toiseen sisääntuloon syötetään saha-aaltoa. Komparaattori pitää lähtöjännitettään ylhäällä niin kauan kuin erovahvistimen lähtöjännite on saha-aallon hetkellistä arvoa korkeampi, ja näin pitää kytkintransistoria avattuna. Kun saha-aallon arvo ylittää erovahvistimen lähtöjännitteen, vetää komparaattori lähtönsä maihin sulkien kytkintransistorin. Erovahvistin yrittää pitää molemmat tulonsa samassa potentiaalissa, jolloin jos skaalattu regulaattorin lähtöjännite on liian korkea, laskee erovahvistin omaa lähtöjännitettään alaspäin, kunnes sen molemmat tulot ovat samassa potentiaalissa. Kytkeä toimii käänteisesti, jos regulaattorin lähtöjännite on liian matala.

2.4.2 Virtatakaisinkytkentä

Vaikka hakkuregulaattori toimii pelkällä jännitetakaisinkytkennällä, on virtatakaisinkytkennän lisäämisestä merkittäviä hyötyjä. Näihin hyötyihin lukeutuvat kelavirran maksimiarvon rajoittaminen saturaatorajan alle, ohjaussignaalin ja lähdön välisen siirtofunktion yksinkertaistuminen sekä ohjaussilmukan parantunut transienttivaste [3; 4; 10].



Kuva 17. Virtatakaisinkytkennän periaatekytkentä

Virtatakaisinkytkennässä komparaattorille tuodaan saha-aallon lisäksi myös kelan virtaramppi, tyypillisesti kyttintransistorin ja maan väliltä mitattuna ja sopivaksi jännitteeksi muutettuna. Vastukset R3 ja R4 mitoitetaan niin, että virtaramppi on näistä kahdesta dominoiva, jolloin se keskeyttää tarvittaessa hakkurin normaalin toiminnan [10].

Mikäli virta- ja jännitetakaisinkytkennällisen hakkurin pitää käydä yli 50 %:n pulssisuhteella, täytyy ottaa huomioon systeemin taipumus aliharmoniseen oskillaatioon [12]. Tämä voidaan estää joko virtarampin jyrkennyksellä tai kompensoidulla, ns. tyypin 2, erovahvistimella.

Kuvassa 17 esiintyvän tyypin 2 erovahvistimen yleinen siirtofunktio on esitetty yhtälössä (27) [3].

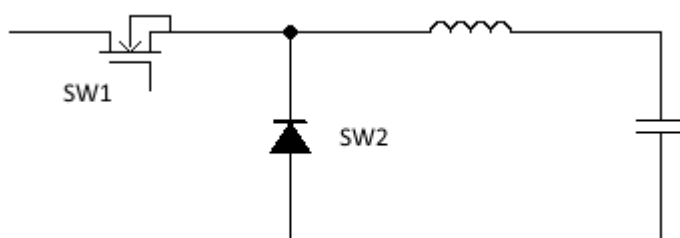
$$T_c(s) = \frac{1}{R_1 C_2} \frac{s + \omega_z}{s(s + \omega_p)} \quad (27)$$

$$\omega_z = \frac{1}{R_2 C_1} \quad (28)$$

$$\omega_p = \frac{C_1 + C_2}{R_2 C_1 C_2} \quad (29)$$

2.5 Synkroniset kytkimet

Tyypillisesti hakkuriregulaattoreiden kytkiminä käytetään transistoria ja diodia. Diodin paikalla olevan kytkimen ei tarvitse olla ohjattavissa, sillä sen tarkoituksena on muodostaa virralle vaihtoehtoinen silmukka, jota pitkin se voi kulkea varsinaisen ohjattavan kytkimen ollessa avoinna.

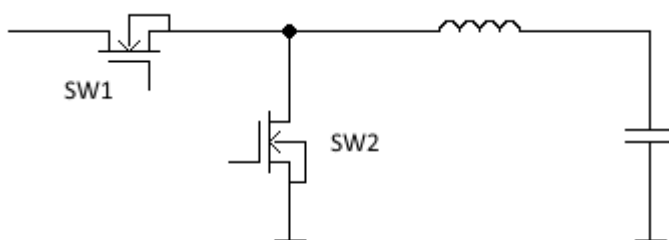


Kuva 18. Transistori + diodi kytkinkonfiguraatio jännitettä laskevalle kytkennälle

Esimerkiksi jännitettä laskeva kytkentä voidaan toteuttaa kuvan 18 mukaisesti.

Diodikytkin on yksinkertaisuutensa vuoksi hyvin paljon käytetty hakkurikytkennöissä, ja monesti diodina käytetään ns. Schottky-diodia, jonka kynnysjännite on normaalia silikonidiodia matalampi. Schottky-diodi on myös piidiodia nopeampi aukeamaan ja sulkeutumaan. Jos kuitenkin tehdään esimerkiksi matalajännitteistä 1,2 V:n regulaattoria, ovat normaalin tasasuuntausdiodin noin 0,7 V:n kynnysjännite, sekä myös Schottkyn-diodin noin 0,3 V:n kynnysjännite prosentuaalisesti hyvin isoja suhteessa haluttuun lähtöjännitteeseen. Tämän takia hyötysuhdekin putoaa huomattavasti. Diodin kynnysjännite on myös riippuvainen sen virrasta, jolloin

suurivirtaisissa hakkurikytkennöissä diodissa syntyy kohtalaisen suuri tehohäviö, joka puolestaan huonontaa myös hyötysuhdetta.



Kuva 19. Kahdella transistorilla toteutettu jännitettä laskeva kytkentä

Yhtenä ratkaisuna näihin ongelmiin on vaihtaa diodi toiseen MOSFET-kytkimeen (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, transistorityyppi), kuten kuvan 19 kytkennässä. Etuna diodikytkimeen nähden MOSFET-kytkimen johtavan kanavan resistanssi on, transistorin mallista riippuen, milliohmien ja satojen milliohmien välillä. Tällöin myös kytkimen yli syntyvä jännite on huomattavasti pienempi kuin vastaavassa diodikytkimessä, jonka takia myöskään kytkimissä ei synny niin suurta tehohäviötä, ja hyötysuhde kasvaa.

Transistorikytkimen käyttö kuitenkin tekee kytkennästä kokonaisuudessaan monimutkaisemman, sillä sen ohjauselektronikan pitää varmistaa, etteivät kytkimet ole koskaan samaan aikaan auki. Käytännön MOSFET-kytkimien päälle kytkeminen on lähes aina nopeampaa kuin niiden pois päältä kytkeminen. Kytkimen päälle- ja poissaamiseen kuluvan ajan vuoksi syntyy niissä myös kytkentähäviöitä. Jotta kytkimen saa johtavaksi tai johtamattomaksi, täytyy sen hilalle tuoda riittävä varaus, tai viedä siltä riittävästi varausta pois. Kytkimen kapasitanssi on verrannollinen hilan fyysiseen pinta-alaan piillä, josta johtuen suurempitehoisien kytkimien kapasitanssi on tyypillisesti pienempitehoisia suurempi, ja kytkinten ohjaimen virtavaatimukset kasvavat. Kytkentäaikojen vuoksi transistorien rinnalle saatetaan kytkeä myös diodi, jolla on tyypillisesti vähemmän kapasitanssia, ja jota ei tarvitse ohjata erikseen. MOSFET-kytkintä käytettäessä voidaan myös hyödyntää sen parasiittista diodia, joka on valmiiksi varsinaisen kytkimen rinnalla. Koska kytkentähäviöt kasvavat kytkentätaajuuden kasvaessa, täytyy hakkuria suunnitellessa valita jokin sopiva kompromissi hyötysuhteen ja komponenttien koon välillä.

Yläkytkimen SW1 ja alakytkimen SW2 johtumis- ja kytkentähäviöitä voidaan laskea, kun tunnetaan kytkinten resistanssi, kytkimen SW2 rinnakkaisdiodin kynnysjännite, kytkimien kapasitanssit sekä kytkinten ohjauskytkennän kytkentävirta [9].

2.6 Piirisuunnittelu ja EMC

Hakkuriregulaattorin asettelua suunnitellessa täytyy kiinnittää erityistä huomiota hyvään maadoitukseen, sekä virtalengkien pinta-alan minimoimiseen.

Koska lähtöjännitteen on tarkoitus pysyä kohtalaisen tarkasti säädetyssä arvossa, täytyy lähtöjännitettä mittaavan kytkennän ja ohjauskytkennän jännitereferenssin maiden välisen impedanssin olla mahdollisimman pieni. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että näiden kahden pisteen tulisi olla fyysisesti mahdollisimman lähellä toisiaan, ja niiden välisen johtimen tulisi olla pinta-alaltaan mahdollisimman suuri. Jotta referenssijännitteeseen ei kytkeytyisi epäsuotuisia vaihtojännitteitä, tulisi sen ja mahdollisimman hiljaisen maapisteen välille sijoittaa kondensaattori, jonka positiivisen pään tulisi olla fyysisesti mahdollisimman lähellä itse referenssijännitettä. Suuria virtoja kuljettavat maareitit tulisi myös mahdollisuuksien mukaan erottaa signaalimaasta, jotta ne eivät häiritsisi takaisinkytkettävien suureiden mittaamista. Käytännön toteutuksessa johtuen osien sijoittelun ja maareittien suunnittelun suhteen tekemään usein kompromisseja koon, lämmitysratkaisujen ja optimaalisen sähköisen suunnittelun välillä. Kytkennän kela, kytkimet, lähtökondensaattorit sekä tulokondensaattorit tulisi myös sijoittaa fyysisesti mahdollisimman lähelle toisiaan suurivirtaisten virtasilmutoiden pinta-alojen minimoimiseksi [7].

Jos virtasilmutukan ympärysmitta on lähelle siinä kiertävän signaalin aallonpituutta, alkaa silmutka resonoimaan ja lähettää signaalia magneettikentässä ulospäin. Tämä taas saattaa häiritä muita lähellä olevia laitteita, jolloin EMC-normit eivät täyty. Antenni toimii myös toiseen suuntaan, jolloin jos laitteen lähellä on jokin häiriölähde, joka säteilee sellaisella taajuudella, jonka aallonpituus vastaa virtasilmutukan ympärysmittaa, kytkeytyy se vahvasti myös laitteeseen haitaten mahdollisesti sen toimintaa. Tämä on myös EMC-normien vastaista. Virtasilmutoiden koon minimointi on tärkeää, koska suuritaajuiset signaalit, jotka kytkeytyisivät herkästi pieneen virtasilmutkaan, vaimenevat ilmassa ja muissa väliaineissa niin nopeasti etäisyyden suhteen, että niiden vaikutus laitteen toimintaan on hyvin minimaalista. Koska hakkuriregulaattoreiden

kytkentätaajuudet ovat usein satojen kilohertsien ja muutaman megahertsin välillä, eivät ne myöskään kytkeydy herkästi kovin pieniin silmukoihin. Ne kytkentätaajuuden harmoniset, jotka ovat lähellä silmukan resonanssitaajuutta, ovat käytännössä amplitudiltaan niin pieniä, ettei niistä silmukan kautta lähetetty energia häiritse muita laitteita.

Käytännön komponenttien parasiittiset impedanssit tulee myös ottaa huomioon hakkurisuunnittelussa. Esimerkiksi lähtökondensaattoreita valittaessa tulee ottaa huomioon niiden resonanssitaajuus. Resonanssitaajuuden tulisi olla riittävän paljon kytkennän toimintataajuuksia korkeammalla, jotta se ei vaikuttaisi piirin toimintaan huomattavasti. Tyypillisesti lähtökondensaattoreiksi valitaan muutamaa eriarvoista ja erilaisissa koteloissa olevaa kondensaattoria, jotta saataisiin säilytettyä lähdön matala impedanssi laajalla taajuusalueella [8]. Koska hakkuriregulaattorin kelan toinen pää on aina joko maassa tai reguloidussa lähtöjännitteessä, tulee sen myös olla aseteltu fyysisesti siten, että kelan pisteellinen pää on samassa pisteessä kytkimen, eli ns. kuuman pään kanssa. Kelojen käämiminen aloitetaan pisteellisestä päästä, jolloin pisteettömän pään käämilanka on fyysisesti päällä. Tämä toimii metallikotelon tavoin ja vaimentaa ympäristöön syntyvää säteilyä.

3 Teholähteiden määrittely

Teholähteen määrittely tehdään Zelteq Oy:n määrittelylomakkeen mukaisesti. Teholähde suunnitellaan antamaan käyttö sähköt automaatin pääprosessorilaudalle, näytölle, näytön taustavalolle sekä moottoreita ohjaavalle prosessorille.

3.1 Sähköiset vaatimukset

3.1.1 Tulojännite

Laitteen tulojännite on kiinteä $24V \pm 10 \%$

Teholähteessä on tulojännitteen valvontapiiri, joka sammuttaa teholähteen kun tulojännite on alle 21 V. Teholähteessä on liittimellä toteutettu polariteettisuoja, joka estää tulojännitteen kytkemisen väärin päin.

Teholähteen piirilevyllä on pintaliitoskomponenteilla toteutettu ylijännitesuojaus nopeita jännitepiikkejä vastaan.

- Tulojännitealue 21,6 V – 26,4 V
- Kokonaistehonkulutus (sis. syöttävän teholähteen häviötehon) ~20 W
- Hyötysuhde ~85 %

3.1.2 Lähtöjännite

Taulukosta 1 nähdään teholähteen lähtöjännitteille asetetut vaatimukset (teholähteen lähdoista mitattuna). Teholähteen kokonaislähtöteho on noin 17,6 W.

Taulukko 1. Teholähteen eri lähtöjännitealueiden määrittelyt

Nimi	Lähtöjännite		Lähtö- virta	Lähtö- teho	Rippelijännite (Pk-Pk)	Tark- kuus	Huom
	Min	Max	Max	Max	<20 MHz	(%)	
	(V)	(V)	(A)	(W)			
+3,3 V	3	5,25	2000 mA	6,6	100 mV	±4,0 %	
+5 V	4,85	5,15	1000 mA	5	40 mV	±3,0 %	
+12 V	10,8	13,2	500 mA	6	50 mV	±10,0 %	

Teholähteen pääprosessorilaudalle syötettävän 3,3 V:n jännitteen tulee olla ylhäällä ensimmäisenä, jonka jälkeen tästä jännitteestä virtansa saava ohjainlauta antaa luvan emolevyn laitteille kytkeytyä päälle. 3,3 V:n jännitteen nousuajan pitää olla välillä 0,1...20 ms.

3.2 Teholähteen toimintaympäristö

- Ympäristölämpötila-alue 0 °C ... +70 °C
- Suhteellinen ilmankosteus < 90 %

Teholähteelle ei ole tiiviysluokkavaatimuksia.

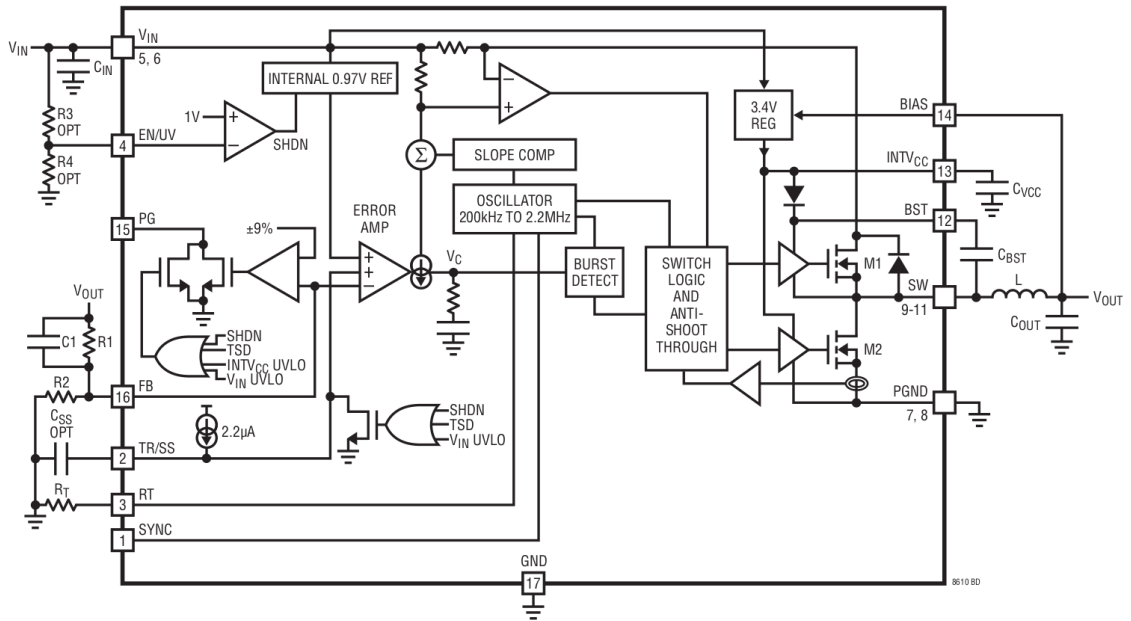
Teholähde jäädytetään tarvittaessa riittävän pienellä lämpöresistanssilla laitteen alumiiniseen runkoon. Laitteen sisällä ei ole mainittavaa ilmankiertoa teholähdettä jäähdyttämässä.

4 Hakkurikytkentöjen mitoitus ja suunnittelu

Koska kaikki tarvittavat käyttöjännitteet ovat tulojännitettä matalampia ja niillä ohjataan laitteen muissa osissa 24 V:n jänniteellä toimivia laitteita, täytyy kaikkien kolmen hakkuriregulaattorin olla jännitettä laskevia buck regulaattoreita. Laitteen galvaaninen erotus tehdään syöttävässä teholähteessä.

4.1 Ohjainpiiri

Topologiavalinnan jälkeen seuraava vaihe suunnittelussa on sopivan ohjainpiirin valinta. Kaikilla ohjainpiirejä valmistavilla puolijohdevalmistajilla on myytävänä suuri valikoima hieman eri tarkoituksiin optimoituja ohjainpiirejä, joista parhaan valitseminen saattaa joskus olla haastavaa. Tyypillisesti ohjainpiiriä valittaessa puntaroidaan sen hintaa, saatavuutta, helppokäyttöisyyttä, mahdollisia aikaisempia käyttökokemuksia sekä käyttötaajuutta. Näillä kriteereillä ohjainpiiriksi valikoitui Linear Technologiesin LT8610 synkroninen jännitettä laskeva DC/DC-muunninpiiri. Se on kohtalaisen uusi tuote, jolloin se on hyvällä todennäköisyydellä saatavilla riittävän pitkään tulevaisuudessa. Siinä on sisäänrakennettuna virtatakaisinkytkentä sekä kytkimet, jolloin ulkoisten komponenttien määrä vähenee ja käyttö helpottuu. Kyseisestä piiristä oli myös hyvin positiivisia aikaisempia kokemuksia yrityksessä. Piiriä voidaan myös käyttää kohtalaisen korkealla 2 MHz:n taajuudella, jolloin reaktiiviset komponentit voidaan pitää reaktanssiltaan, ja näin myös fyysiseltä kooltaan, pieninä. Negatiivisena puolena piiri on kohtalaisen kallis, joskin korkea integrointiaste laskee hieman lopullista hintaa verrattuna useamman diskreetin komponentin ratkaisuun.



Kuva 20. LT8610 hakkuripiirin lohkokaaavio [11]

Kuvasta 20 nähdään pääpiirteittäin, miten LT8610-hakkuripiiri toimii. Vastukset R1 ja R2 ovat jännitetakaisinkytkennän skaalausvastukset, joiden lähtöä verrataan sisäiseen 0,97 V:n referenssiin tai TR/SS-pinnin jännitteeseen. TR/SS-pinniin syötetään vakiovirtageneraattorilta 2,2 μA :n virta, jolla ladataan kondensaattoria C_{SS} . Virtatakaisinkytkentä on toteutettu mittaamalla kytkimen M2 läpi kulkevaa virtaa. Vastuksilla R3 ja R4 valitaan jänniteraja piirin käynnistymiselle ja sammumiselle. C_{VCC} on piirin sisäisen toimintajännitteen luovan regulaattorin ohituskondensaattori ja C_{BST} mahdollistaa kytkimen M1 päällekytkemisen lähtöjännitteen ollessa yli 3,4 V.

4.2 Komponenttien mitoitus

Komponenttien mitoitus aloitettiin luomalla Open Office Calc -taulukkolaskentaohjelmaan työkirja kelan valinnalle relevanteista yhtälöistä (30), (31), (32) ja (33) [11].

$$R_T = \frac{46,5}{f_{sw}} - 5,2 \quad (30)$$

$$L = \frac{U_o + U_{SW(BOT)}}{f_{sw}} \quad (31)$$

$$I_{L(PEAK)} = I_{LOAD(MAX)} + \frac{1}{2} \Delta I_L \quad (32)$$

$$\Delta I_L = \frac{U_{OUT}}{L * f_{SW}} * \left(1 - \frac{U_{OUT}}{U_{IN(MAX)}} \right) \quad (33)$$

R_T on ajoitusvastus kilo – ohmeina

f_{SW} on kytkentätaajuus megahertseinä

L on kelan induktanssi mikrohenreinä

$U_{SW(BOT)}$ on alemman kytkimen yli jäävä jännite (~0,15 V)

$I_{LOAD(MAX)}$ on regulaattorista otettavan kuormavirran maksimiarvo

$U_{IN(MAX)}$ on tulojännitteen maksimiarvo

Tuotantolaitteeseen komponenttien arvoja valitessa on kustannus- ja saatavuussyistä valittava kytkentätaajuus niin, että ajoitusvastuksessa ja kelassa voidaan käyttää jotakin standardiarvoa, esimerkiksi vastuksissa jotain E24-sarjan arvoa. Kelan induktanssi ei myöskään saisi olla liian suuri, sillä silloin joko sen fyysinen koko kasvaa, tai saturaatiovirta laskee. Kolmantena valintakriteerinä on kytkinten kytkentähäviöt, jotka kasvavat taajuuden kasvaessa [9; 11]. Näiden kolmen kriteerin kesken tyydyttäväksi kompromissiksi valittiin kytkentätaajuudeksi noin 1,05 MHz, jolloin kelan parametreista tuli taulukon 2 mukaiset.

Taulukko 2. Kelan parametrit

U_{out}	f_{sw}	R_t	L	$U_{IN(MAX)}$	$I_{Load(MAX)}$	ΔI_L	$I_{L(PEAK)}$	$I_{OUT(MAX)}$
4,995 V	1,05 MHz	39,086 Ω	4,9 μH	26,4 V	1 A	0,787 A	1,394 A	2,106 A
3,305 V	1,05 MHz	39,086 Ω	3,29 μH	26,4 V	2 A	0,837 A	2,418 A	2,081 A
12,0964 V	1,05 MHz	39,086 Ω	11,66 μH	26,4 V	0,5 A	0,535 A	0,768 A	2,232 A

Näistä lähimmät standardiarvot olisivat 39 k Ω :a ajoitusvastukselle ja 4,7 μH :ä, 3,3 μH :ä sekä 10 μH :ä keloille. 3,3 μH :n ja 10 μH :n kelojen sijaan valittiin 3,3 V:n ja 10 V:n regulaattorien kelojen arvoksi 4,7 μH :ä erilaisten komponenttien lukumäärän minimoimiseksi. Käytännön kokeiluissa kytkennät toimivat näin lähes yhtä hyvin kuin laskennallisillakin arvoilla. Lähtöjännitteiden arvoina käytettiin nimellisjännitteitä lähinnä olleita laskennallisia arvoja. Takaisinkytkentävastusten arvot voidaan laskea kuvan 20 kytkennästä, jännitteenjaon yhtälöä hieman uudelleen järjestäen [11].

$$R_1 = R_2 \left(\frac{U_{OUT}}{0,970V} - 1 \right) \quad (34)$$

Yhtälön (34) 0,970 V:n jännite on LT8610-hakkuripiirin sisäinen referenssijännite U_{ref} . Vastuksen R_1 arvoksi kaikissa kolmessa tapauksessa valittiin 390 Ω , ja vastus R_2 jaettiin kahteen sarjassa olevaan vastukseen tarkemman lopputuloksen saavuttamiseksi. Kaikkien vastusten toleranssi on 1 % ja referenssijännitteen $\sim 0,6$ % [11].

Taulukko 3. Jännitetakaisinkytkentävastusten valinta

$U_{out(target)}$	R_1	R_{21}	R_{22}	$U_{out(nominal)}$	$U_{out(max)}$	$U_{out(min)}$
3,3 V	$390\Omega \pm 3,9 \Omega$	$150\Omega \pm 1,5 \Omega$	$12\Omega \pm 0,12 \Omega$	3,305 V	3,373 V	3,239 V
5 V	$390\Omega \pm 3,9 \Omega$	$82\Omega \pm 0,82 \Omega$	$12\Omega \pm 0,12 \Omega$	4,994 V	5,106 V	4,885 V
12 V	$390\Omega \pm 3,9 \Omega$	$33\Omega \pm 0,33 \Omega$	$1\Omega \pm 0,01 \Omega$	12,096 V	12,397 V	11,802 V

Taulukon 3 vastusarvot valittiin iteroimalla yhtälöä (34) E24-sarjan standardiarvoilla. Jännitteenmittauskytkennän tehohäviöiden vähentämiseksi jokainen taulukon 3 vastusarvo kerrottiin tuhannella. Minimi- ja maksimiarvot lähtöjännitteille on laskettu minimoimalla ja maksimoimalla yhtälö (34). Koska kaikkien regulaattoreiden jännitteet ovat varsin pieniä, valittiin kaikkien takaisinkytkentävastusten kotelotyyppiä 0603.

Teholähteiden käynnistysrajaa ja alijännitesammutusta varten ohjainpiirillä on oma EN-pinni (enable), jota tarkkailemalla ohjainpiiri osaa sammuttaa itsensä, kun pinnin jännite putoaa 0,96 voltin alapuolelle ja käynnistää sen pinnin jännitteen noustessa noin volttiin. Koska ominaisuus on toteutettu komparaattorikytkennällä, mitoitetaan vastukset sitä varten jännitteenjaolla yhtälön (35) mukaisesti [11].

$$U_{IN(EN)} = \left(\frac{R_3}{R_4} + 1 \right) * 1,0 V \quad (35)$$

Vastukset R_3 ja R_4 mitoitetaan siten, että $U_{IN(EN)}$ on jännite, jolla hakkurin halutaan käynnistyvän. Vastus R_4 jaettiin kahteen sarjassa olevaan vastukseen tarkemman lopputuloksen saavuttamiseksi. Kaikkien vastusten toleranssi on 1 % ja 1,0 V:n referenssijännitteen toleranssi on 6 %.

Taulukko 4. Alijännitesammutuspiirin mittavastusten valinta

$U_{IN(EN)}$	R_3	R_{41}	R_{42}	$U_{IN(EN, MAX)}$	$U_{IN(EN, MIN)}$
21 V	$6800\Omega \pm 68 \Omega$	$330\Omega \pm 3,3 \Omega$	$10\Omega \pm 0,1 \Omega$	22,688 V	19,368 V

Taulukon 4 vastusarvot valittiin iteroimalla yhtälöä (35) E24-sarjan standardiarvoja käyttäen. Jänniterajaksi tuli näillä vastusarvoilla tasan 21 voltia. Käynnistysjännitteen minimi- ja maksimiarvot on laskettu minimoimalla ja maksimoimalla yhtälöä (35).

Ohjainpiirillä on käynnistykseen yhteydessä syntyviä virtapiikkejä varten ns. soft-start-pinni, jonka jännite toimii ohjaimen jännitereferenssinä sen ollessa varsinaista sisäistä referenssijännitettä matalampi. Ohjainpiirin sisäinen 2,2 μ A:n tasavirtalähde syöttää virtaa pinnille. Jos soft-start-pinnin ja kytkennän maan väliin laittaa kondensaattorin, jonka jännite on piirin käynnistyessä 0 ja nousuajaksi valitaan noin 10 ms, saadaan kondensaattorin arvo yhtälö (8) ratkaisemalla.

$$C = \frac{I_{pu}}{U_{ss}} * t_{ss} \quad (36)$$

I_{pu} on pinnille syötettävä virta

U_{ss} on pinnin tavoitejännite eli 0,97 V

t_{ss} on aika jonka jännitteenousu kestää

Kondensaattorin laskennalliseksi arvoksi tulee näillä alkuarvoilla noin 22,68 nF:a, ja lopulliseksi arvoksi valitaan lähin standardiarvo, eli 22 nF:a.

4.3 Piirilevyn suunnittelu

Piirilevyn suunnittelu aloitettiin 3,3 V:n regulaattorin, syöttösuodattimen ja jännitepiikkisuojauskytkentäkaavioiden piirtämisellä PADS Logic -ohjelmalla (liite 1). Tämän jälkeen suunniteltiin niiden komponenttiasettelut PADS Layout -ohjelmalla. Komponenttien sijoittelussa kiinnitettiin erityisesti huomiota virtasilmukoiden koon pienenä pitämiseen. Komponenttisijoittelun jälkeen regulaattorikytkennälle piirrettiin ne kuparit, jotka ovat samanlaiset kaikilla kolmella hakurilla. Tämän jälkeen hakurikytkentä kopioitiin kahteen kertaan PADS:n Make Reuse -työkalulla. Kaikki komponentit lähtöliittimen ohituskondensaattoreita lukuunottamatta sijoitettiin piirilevyn

yläpuolelle turhien läpivientien välttämiseksi. Koko kytkentä on tähtimaadoitettu tuloliittimen läheisyydestä. Tähtimaadoitusta on käytetty siksi, että se estää arvaamattomia virtojen paluureittejä paikoissa, jossa paluuvirrat saattaisivat häiritä muita kytkennän osia. Valmis piirilevy on mitoiltaan 55 mm x 58 mm.

Liitteen 2 kuvassa 1 on koko piirilevyn yläpuoli komponentteineen ja kupareineen. Vedot ja komponenttien juotostäplät ovat selkeyden vuoksi eri värisiä kuin kuparialueet. Kuparialueille on tehty vetoja johtuen siitä, että PADS ei muuten tunnista eri komponenttien olevan sähköisesti kytkettynä toisiinsa. Ohjainpiirien ali menevä maa-alue on tehty tarvittavaa suuremmaksi lämmönsiirron parantamiseksi. Harmaat viivat ovat piirilevyn reunat.

Liitteen 2 kuvassa 2 näkyy maakerroksena käytetyn välikerroksen kuparialueet sekä tähtimaadoituksen toteutustapa.

Liitteen 2 kuvassa 2 näkyy toisen välikerroksen kuparit. Kerros on käytössä lähtöjännitteitä ja niiden mittaamista varten.

Liitteen 2 kuvassa 4 näkyy piirilevyn alapuoli. Alakerroksen iso kuparialue on kytketty koko kytkennän maahan, jolloin se suojaa muuta kytkentää sen suunnasta tulevilta häiriöiltä. Alapuolen tinaa hylkivään pinnoitteeseen on myös tehty ohjainpiirien kohdalle avaus, joka näkyy liitteen 3 toisessa kuvassa.

Molemmille liittimille on myös tuotu kuparialue vähintään yhdellä reunakerroksella, jotta juotoksen muodostama kontakti voidaan silmämääräisesti todeta hyväksi tai huonoksi. Jos kuparialueet olisivat vain sisäkerroksissa, olisi huonon juotoskontaktin toteaminen vaikeaa.

Kytkenästä tehtiin prototyypipiirilevy, joka ladottiin käsin mittauksia varten. Liitteen 3 kuva 1 on ladotun prototyypilevyn yläpuolelta, ja kuva 2 prototyypilevyn alapuolelta.

5 Regulaattorikytkentöjen mittaukset

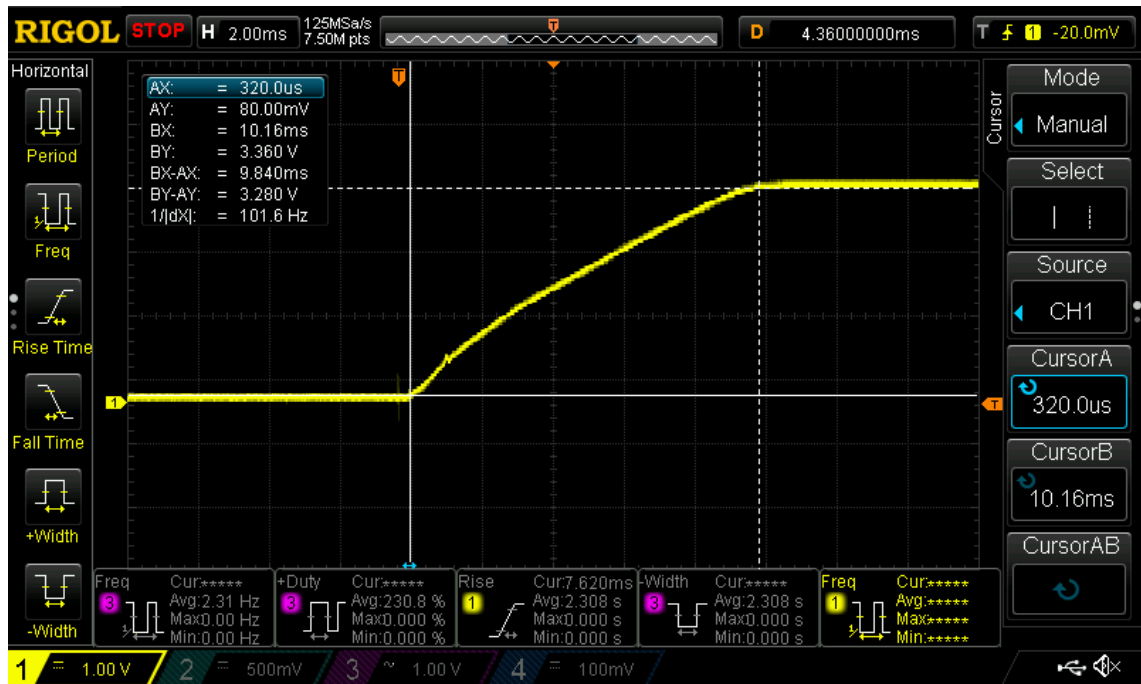
5.1 Mittausjärjestelyt

Mittauksissa käytettiin teholähteenä säädettävää PS25025T-laboratorioteholähdettä. Kuormana oli IL Powerin ÈLO-200. Laitteen tulon jännitettä ja virtaa mitattiin HP:n 34401A pöytämallisella yleismittarilla. Lähdön virtaa ja jännitettä mitattiin Agilentin 34401A pöytämallisella yleismittarilla. Aaltomuotoja mitattiin Rigolin DS1154Z-oskilloskoopilla.

Oskilloskoopilla mitattaessa tulee muistaa oskilloskoopin mittapään ja erityisesti maajohdon toimivan antennin tavoin. Jos mitattavassa kytkennässä esiintyy suurtaajuisia signaaleja, kuten kytkentätransientteja, tulee mittauksissa mahdollisesti näkyvään suurtaajuiseen häiriösignaaliin suhtautua varauksella. Oskilloskoopilla kannattaakin mahdollisuuksien mukaan tehdä mittaukset ilman häiriöherkkää maajohtoa koaksiaalisesti jousitetun maapiikin kanssa.

5.2 Nousuaika

Nousuajalle lasketun arvon tarkistamiseksi oskilloskooppi asetettiin DC-kytkettyyn tilaan, ja liipaisukohta asetettiin noin 300 mV:iin. Vertikaali- ja horisontaaliakselit skaalattiin niin, että oletettu aaltomuoto näkyisi ruudulla selvästi. Oskilloskooppi laitettiin single shot-tilaan ja piiriin kytkettiin käyttöjännite. Nousuajan aaltomuoto näkyy kuvassa 21.

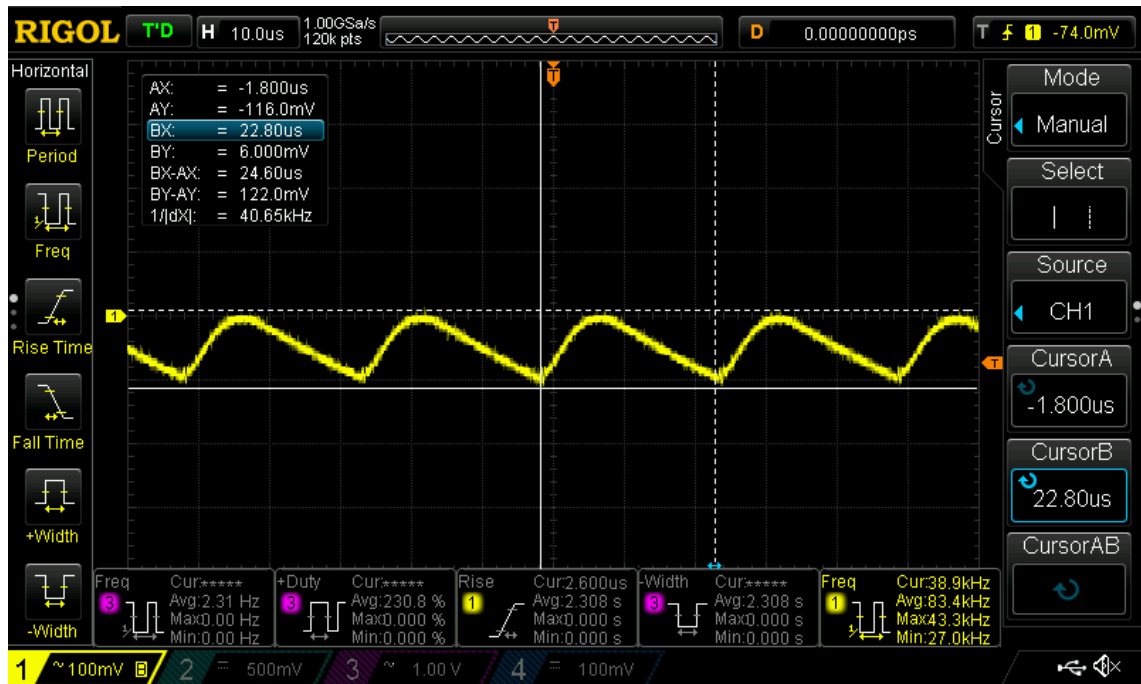


Kuva 21. Nousuaika

Kuvasta 26 nousuajaksi saadaan välille 0 ... 3,36 V noin 9,84 ms. Nousuaika täsmää lasketun arvon kanssa, kun komponenttien toleranssit otetaan huomioon.

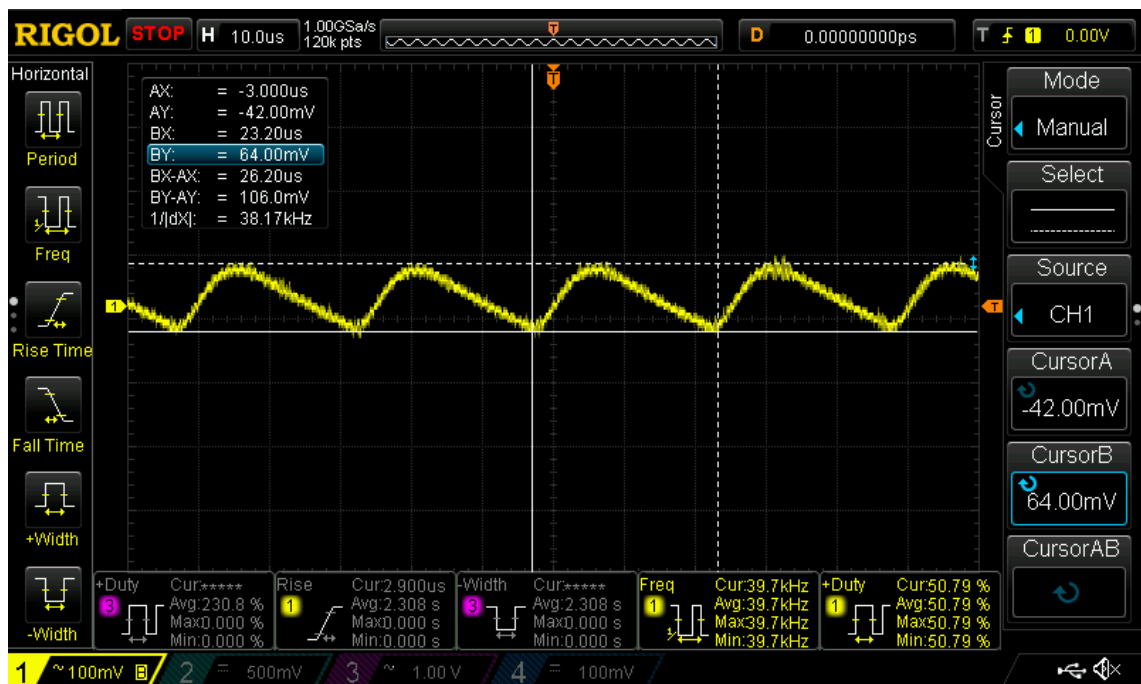
5.3 Rippelijännitteet

Rippelivirtojen mittaamiseksi käytettiin koaksiaalista mittatapaa. Maajohdon kanssa rippelijännitettä mitattaessa näkyville saatiin lähinnä kytkin MOSFET:ien ohjauspulssi. Oskilloskooppi asetettiin AC-kytkettyyn tilaan, ja vertikaali- ja horisontaaliakselit skaalattiin siten, että rippelijännite mahtui selvästi kuvaan.



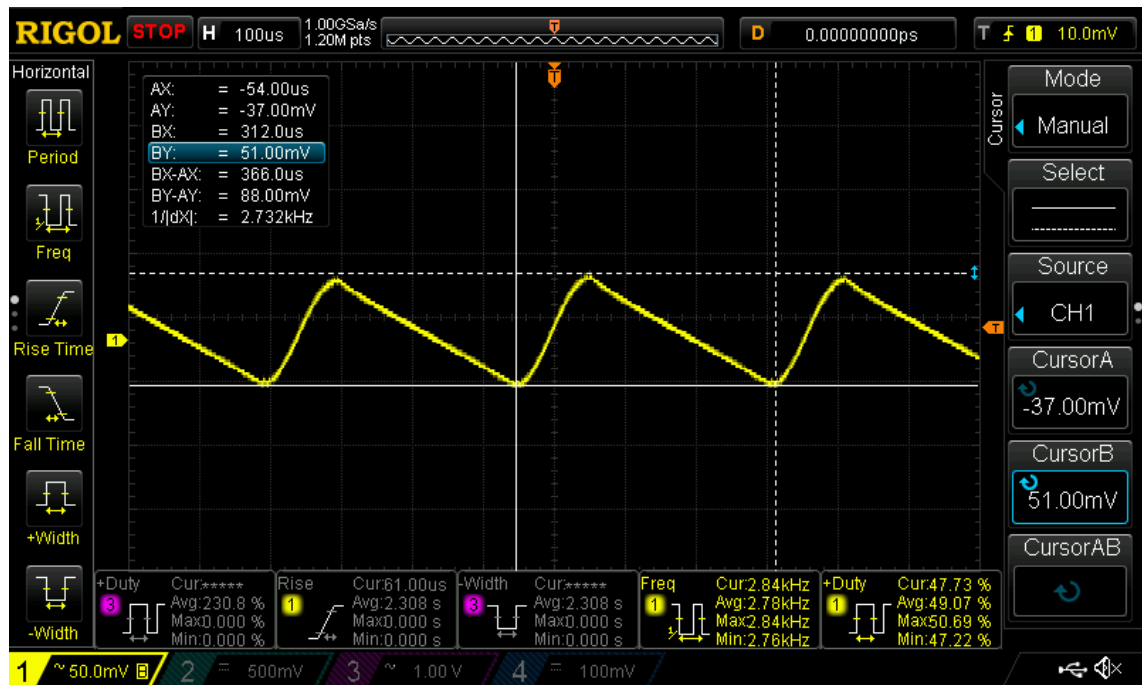
Kuva 22. 3,3 V:n hakkurin rippelijännite

Kuvassa 22 näkyy 3,3 V:n hakkurikytkennän rippelijännite lähtökondensaattoreilta mitattuna. Jännitteen huipusta huippuun -arvo on noin 6 mV:a, joka on reilusti määritellyn rippelijännitteen maksimin alle.



Kuva 23. 12 V: hakkurin rippelijännite

Kuvassa 23 puolestaan näkyy 12 V:n hakkurikytkennän rippelijännite, myös lähtökondensaattoreilta mitattuna. Rippelijännitteen huipusta huippuun -arvo on noin 64 mV:a. Tämä on hieman yli määritellyn rippelijännitteen maksimiarvon.



Kuva 24. 5 V:n hakkurin rippelijännite

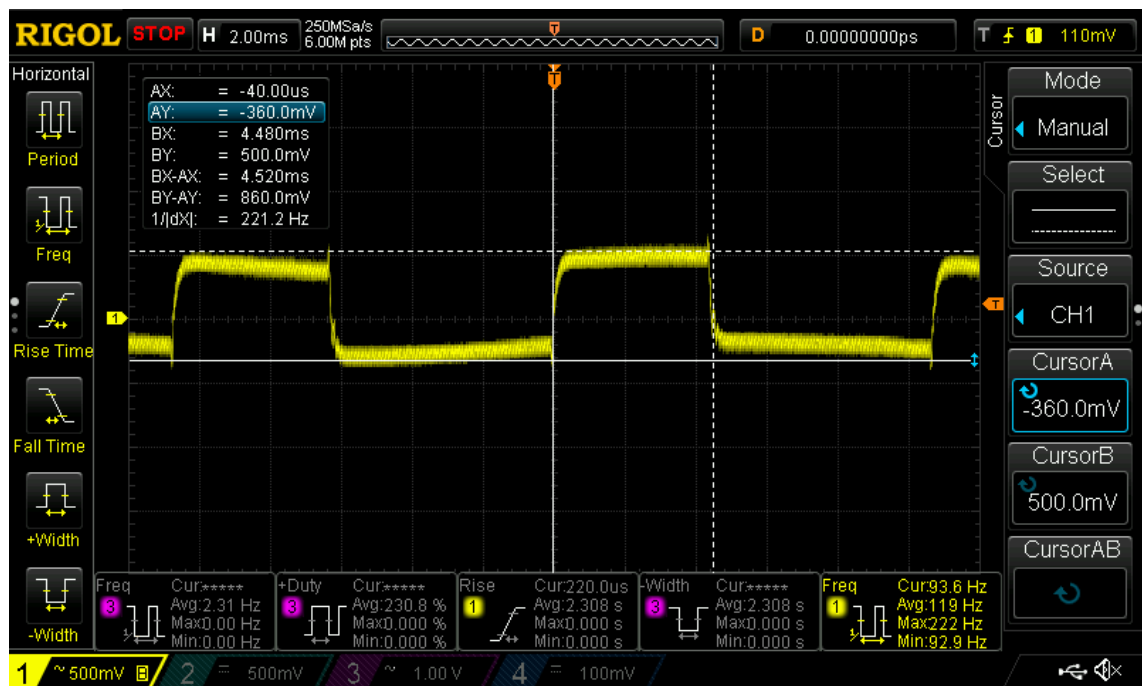
Kuvassa 24 näkyy 5 v:n hakkurikytkennän rippelijännite lähtökondensaattoreilta mitattuna. Rippelijännitteen huipusta huippuun -arvo on noin 51 mV:a. Tämä on myös hieman yli määritellyn rippelijännitteen maksimiarvon.

5.4 Pulssitettu kuorma

Pulssitetulla kuormalla lähtöjännitteen mittaaminen kertoo hakkurikytkennän vasteesta nopeisiin kuormamuutoksiin. Nopeasti muuttuvia kuormia ovat esimerkiksi mikroprosessorit ja muut logiikkakytkennät.

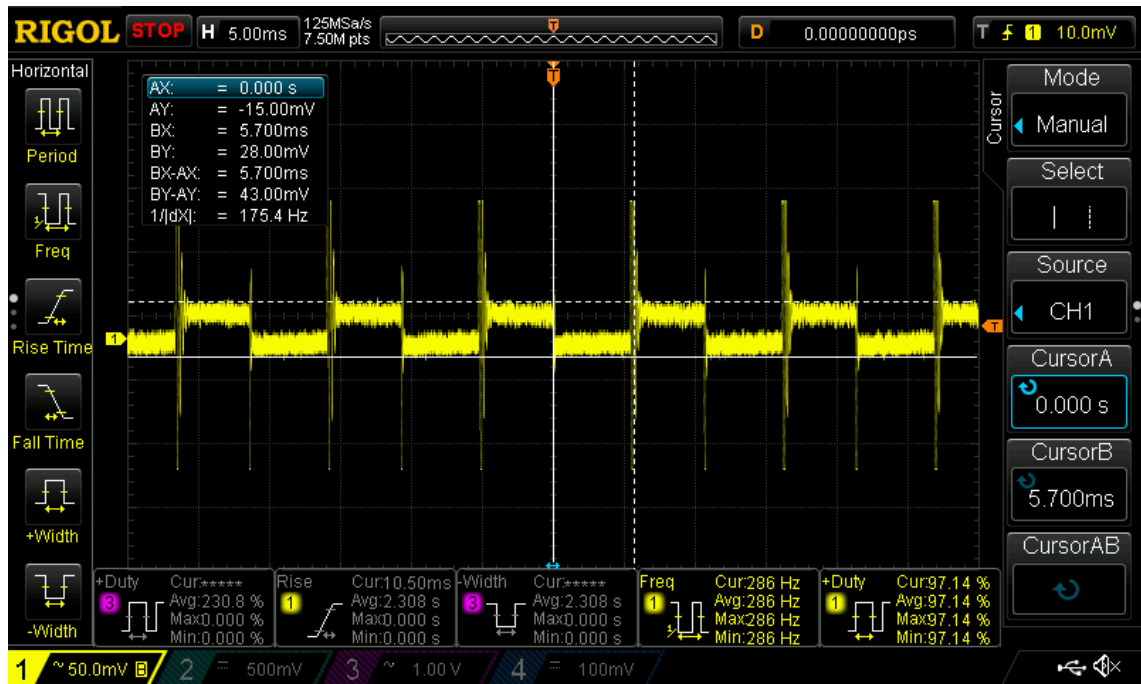
Pulssitetun kuorman mittaamiseksi sähköinen kuorma säädettiin vaihtelevaan virtaansa kahden eri arvon välillä. Mittaus tehtiin maajohdon kanssa, ja oskilloskooppi

oli AC-kytketyssä tilassa. Vertikaali- ja horisontaaliakselit skaalattiin siten, että aaltomuoto mahtuu havainnollisesti kuvaan. Mittaukset tehtiin maajohdon kanssa.



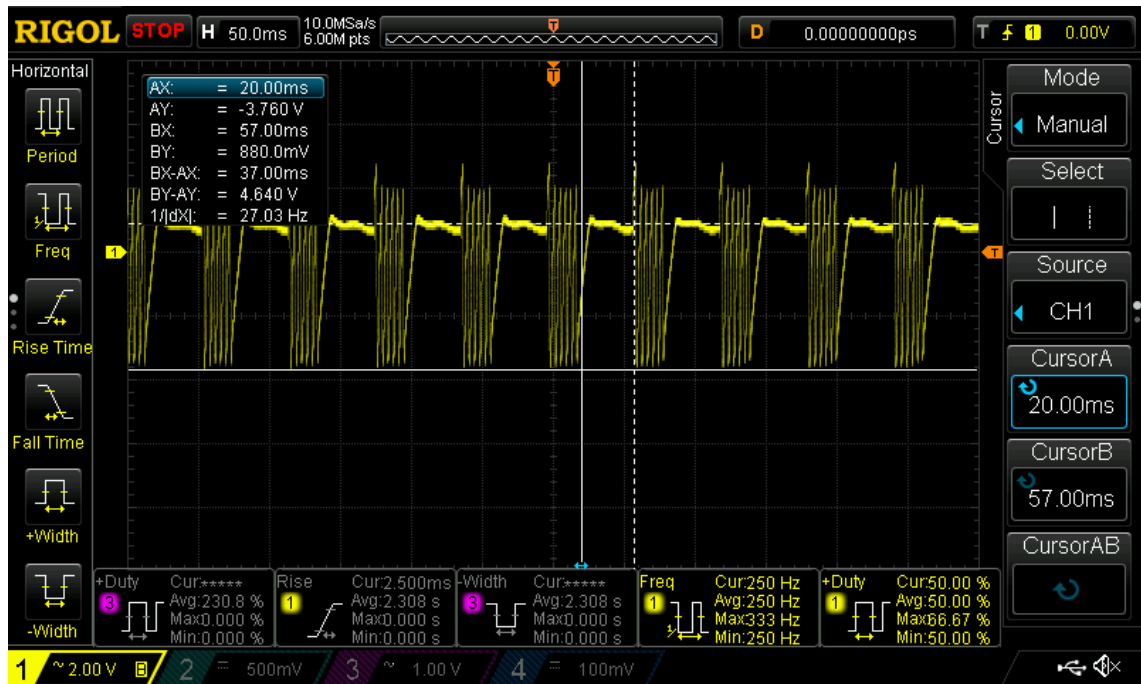
Kuva 25. 3,3 V:n hakkurin lähtöjännite pulssitetulla kuormalla

3,3 V:n hakkurin pulssitetun kuorman pienemmäksi virraksi valittiin 100 mA:a, ja suuremmaksi virraksi 1A. Kuvassa 25 pulssin yläreuna on lähtöjännite 100 mA:n virralla, ja alareuna lähtöjännite 1 A:n virralla. Lähtöjännitteen pudotus on noin 860 mV:a.



Kuva 26. 12 V:n hakkurin lähtöjännite pulssitetulla kuormalla

12 V:n hakkurin pulssitetun kuorman pienemmäksi virraksi valittiin 100 mA:a, ja suuremmaksi virraksi 500 mA:a. Kuvassa 26 pulssin yläreuna on lähtöjännite 100 mA:n virralla, ja alareuna lähtöjännite 500 mA:n virralla. Lähtöjännitteen pudotus on noin 43 mV:a. Korkeat kytkentäpiikit kytkeytyvät todennäköisesti mittapähän tai maajohtoon sähkökentän kautta muualta piiristä.

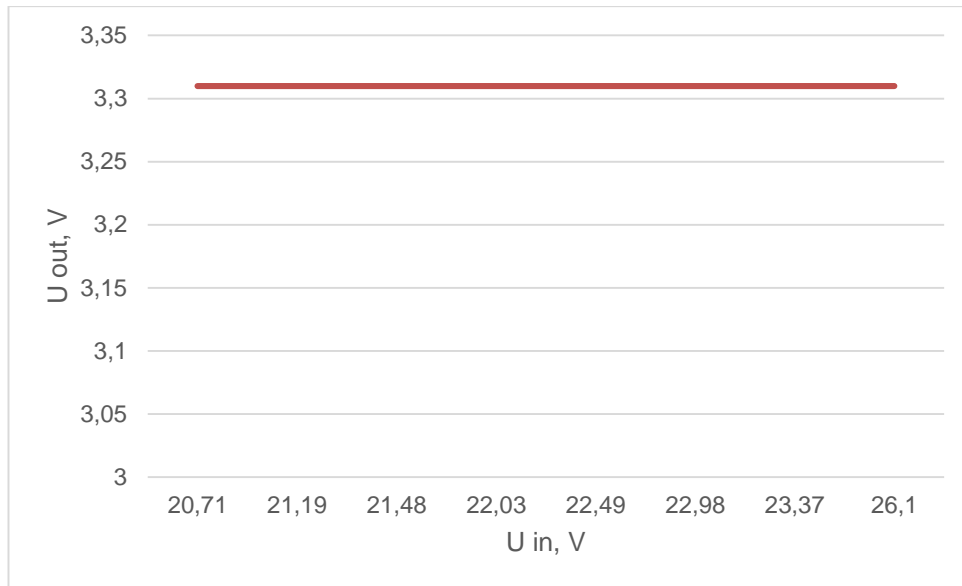


Kuva 27. 5 V:n hakkurin lähtöjännite pulssitetulla kuormalla

5 V:n hakkurin pulssitetun kuorman pienemmäksi virraksi valittiin 100 mA:a, ja suuremmaksi virraksi 670 mA:a. Kuvassa 27 pulssin yläreuna on lähtöjännite 100 mA:n virralla, ja alareuna lähtöjännite 670 mA:n virralla. Lähtöjännitteen pudotus on noin 4,6 V:a.

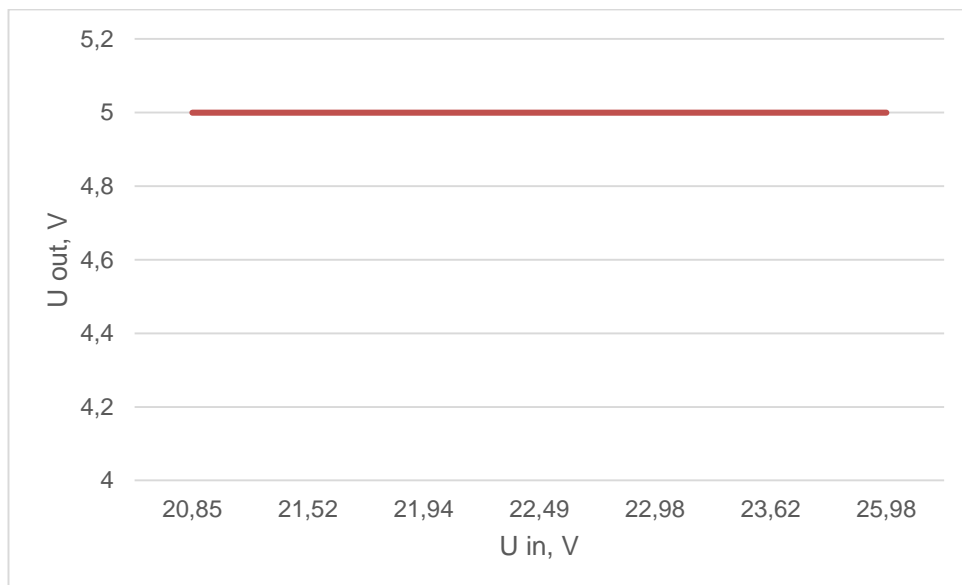
5.5 Linjaregulaatio

Linjaregulaation mittaamista varten tulojännitettä muutettiin noin 0,5 V askelin käynnistysrajasta noin 26 V:iin asti. Linjaregulaatio lasketaan yhtälön (1) mukaan. Mittadata on liitteessä 4.



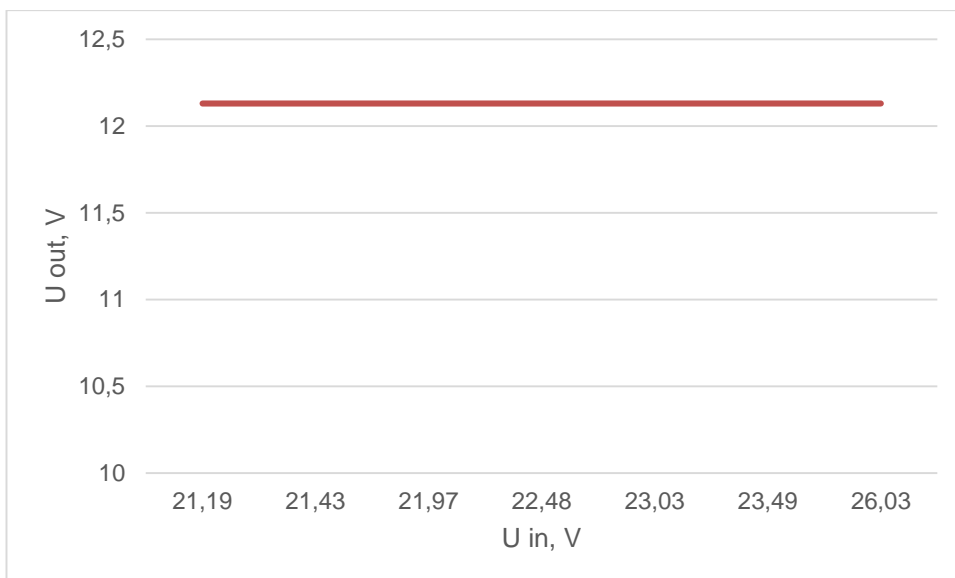
Kuva 28. 3,3 V:n hakkurin linjaregulaatio

Linjaregulaatioksi 3,3 V:n hakkurille saadaan kuvan 28 mukaan 100 %.



Kuva 29. 5 V:n hakkurin linjaregulaatio

Linjaregulaatioksi 5 V:n hakkurille saadaan kuvan 29 mukaan 100 %.

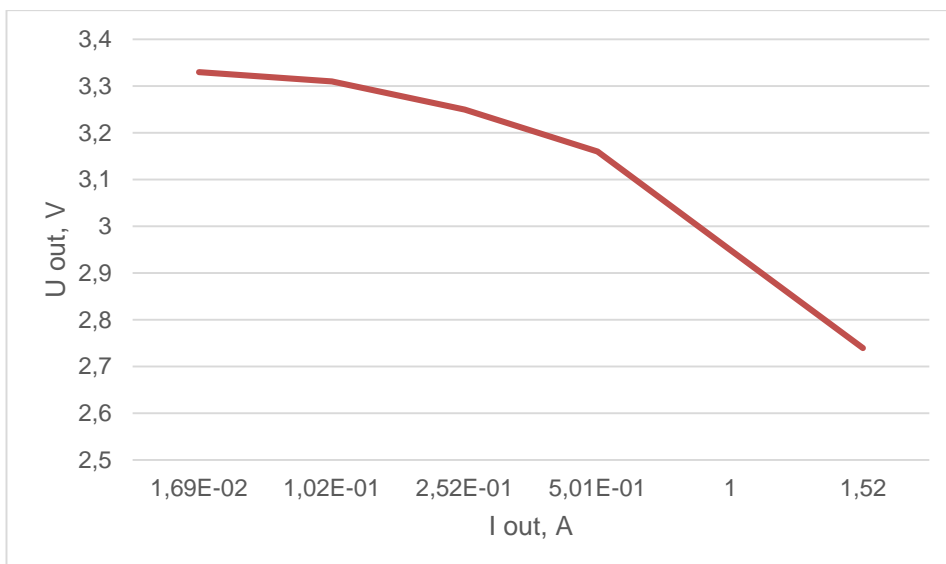


Kuva 30. 12 V:n hakkurin linjaregulaatio

Linjaregulaatioksi 12 V:n hakkurille saadaan kuvan 30 mukaan myös 100 %.

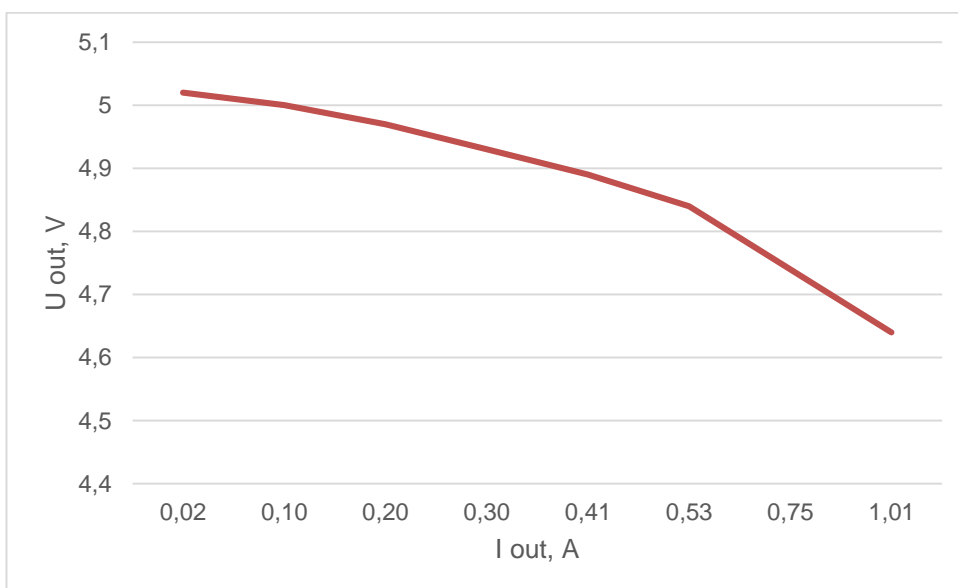
5.6 Kuormaregulaatio

Kuormaregulaatiota mitattaessa minimikuormana oli sähköisen kuorman minimivirta, eli noin 16 mA:a. Kuormaregulaatio laskettiin mittatuloksista yhtälön (3) mukaan. Mittadata on liitteessä 4.



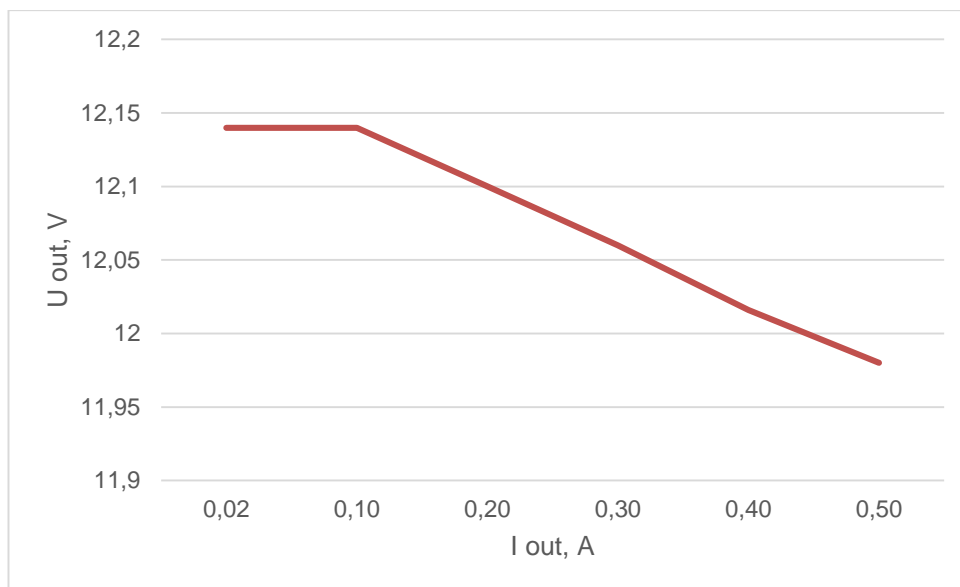
Kuva 31. 3,3 V:n hakkurin kuormaregulaatio

Kuormaregulaatioksi saadaan 3,3 V:n hakkurille kuvan 31 arvoista laskettuna 21,5 %. Arvo on yllättävän huono hakkuriregulaattorille. Kuvaajasta nähdään, ettei regulaattori pysty määriteltyyn 2 A:n kuormavirtaan.



Kuva 32. 5 V:n hakkurin kuormaregulaatio

Kuormaregulaatioksi saadaan 5 V:n hakkurille kuvan 32 mukaan 8,2 %. Kuvaajasta nähdään, että myös 5 V:n regulaattorin jännite alkaa laskea huomattavasti kuormavirran noustessa.

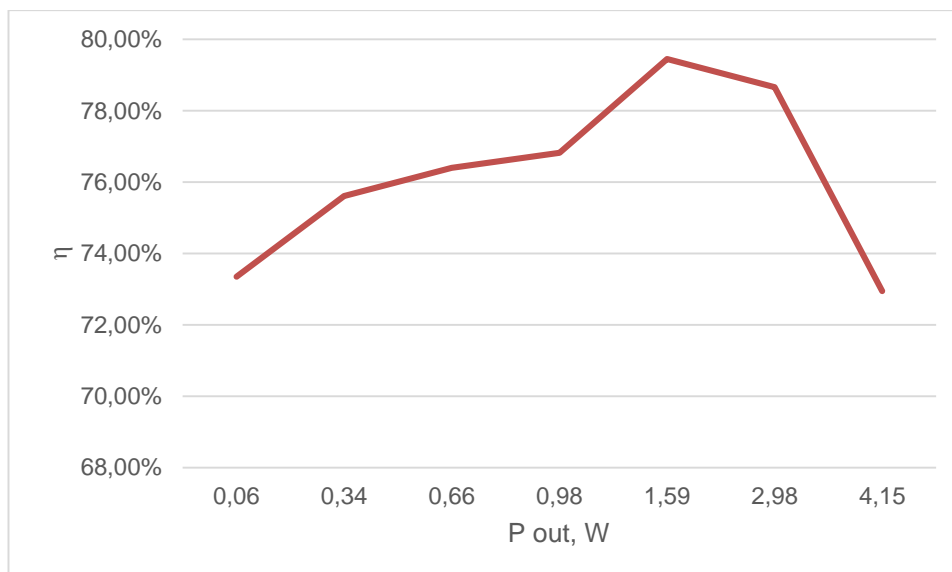


Kuva 33. 12 V:n hakkurin kuormaregulaatio

Kuormaregulaatioksi saadaan 12 V:n hakkurille kuvan 33 mukaan 1,4 %. Kuvaajasta nähdään, että 12 V:n regulaattorin lähtöjännite alkaa myös laskea kuormavirran noustessa. Tässä tapauksessa muutos on kuormavirran maksimiarvolla kohtalaisen mitätön.

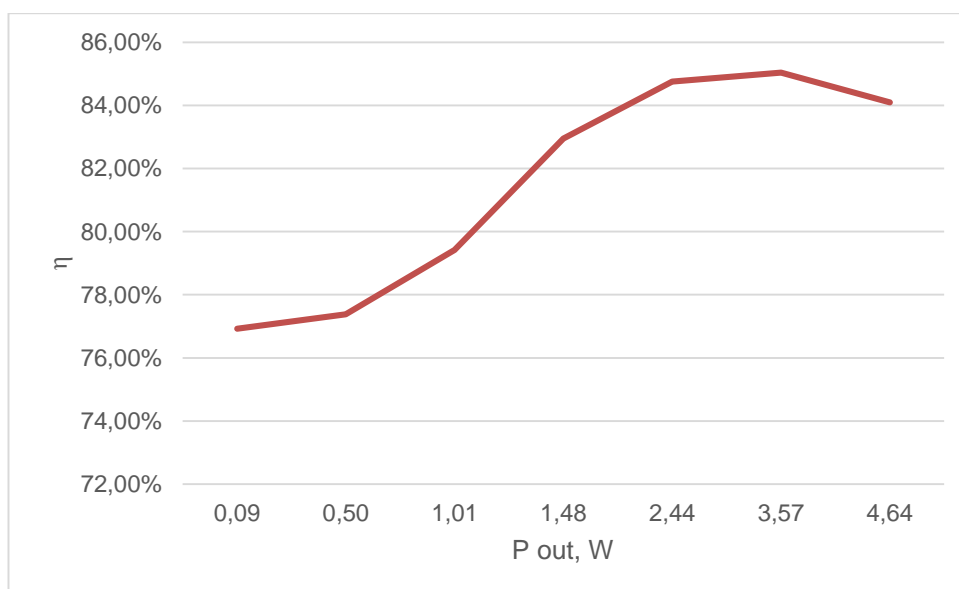
5.7 Hyötysuhde

Hyötysuhdetta mitattaessa mitattiin virta ja jännite sekä tulosta että lähdöstä, jonka jälkeen niistä laskettiin tulo- ja lähtöteho Joulen lain mukaisesti. Hyötysuhde laskettiin jakamalla lähtöteho tuloteholla. Kuvissa 34 - 36 on esitetty eri hakkurikytkentöjen hyötysuhteet lähtötehon funktiona. Mittadata on liitteessä 4.



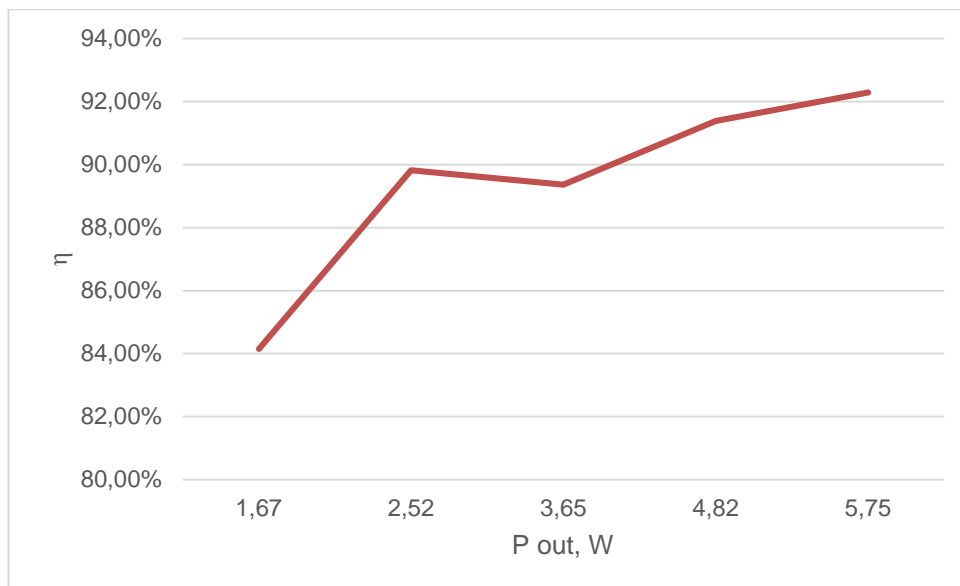
Kuva 34. 3,3 V:n hakkurin hyötysuhde lähtötehon funktiona

Kuvasta 34 nähdään hyötysuhteen olevan hyvin pienillä tehoilla kohtalaisen huono. Tämä johtuu pitkälti hakkuripiirin toimintaa varten ottamasta tehosta. Hyötysuhde nousee noin 80 %:iin lähtötehon ollessa noin 2,6 W:a, ja laskee sen jälkeen jyrkästi.



Kuva 35. 5 V:n hakkurin hyötysuhde lähtötehon funktiona

Kuvasta 35 nähdään sama matala hyötysuhde pienillä lähtötehoilla. Myös 5 V:n regulaattorissa hyötysuhde kasvaa lähtötehon kasvaessa, ja tietyn pisteen jälkeen kääntyy, tällä kertaa hieman loivempaan, laskuun. Hyötysuhde on parhaimmillaan noin 85 %.



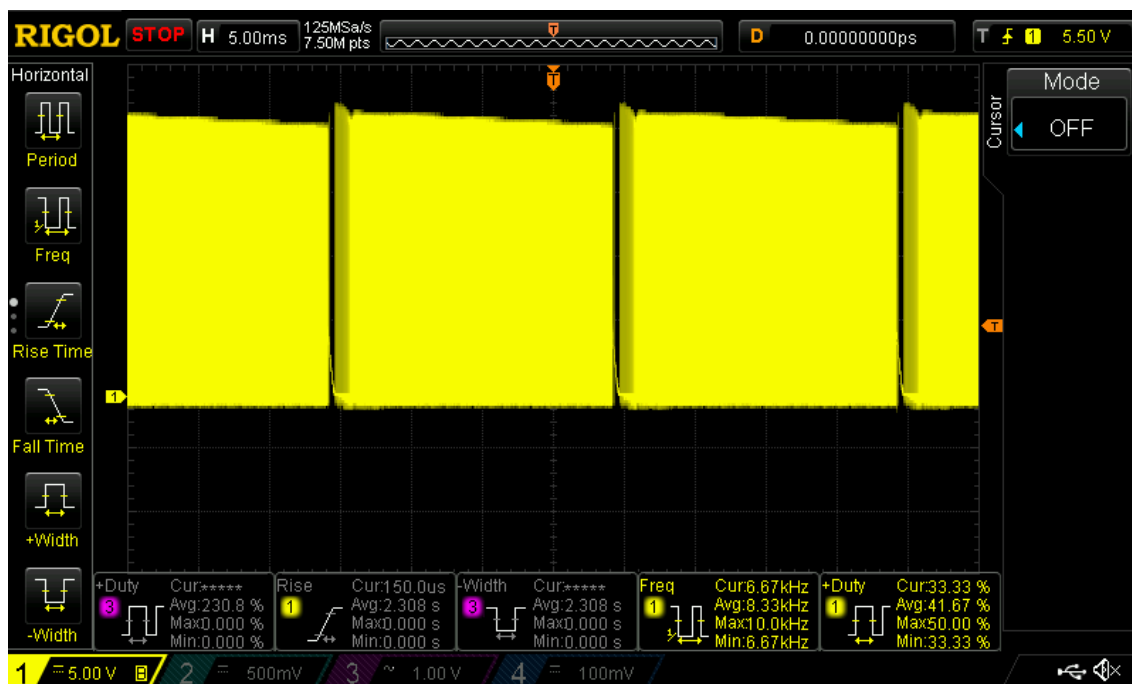
Kuva 36. 12 V:n hakkurin hyötysuhde lähtötehon funktiona

12 V:n lähtöjännitteen hakkuri pääsee kuvan 36 mukaan yli 92 %:n hyötysuhteisiin. Kuvasta nähdään myös sama ilmiö matalilla lähtötehoilla kuin muissakin hakkureissa.

5.8 Mittaustulosten arviointi

Koska yleismittareita ei ole kalibroitu muutamaan vuoteen, saattaa mittaustuloksissa olla jonkin verran systemaattista virhettä. Oskilloskooppi on vain muutaman kuukauden ikäinen, joten sen tehdaskalibraation voi olettaa olevan vielä luotettava.

Kuormaregulaatio- ja hyötysuhdemittauksista nähdään, ettei prototyypilaitte toimi halutulla tavalla. Hakkuripiiri rajoittaa lähtövirtaa reilusti jo noin 0,5 A:n virralla, vaikka datalehden perusteella virtarajan pitäisi tulla vastaan vasta noin 2,5 A:n virralla. Asiaa tutkimalla selvisi myös, että noin 0,5 A:n virralla piiri alkaa myös kytkeä itseään ajoittain pois päältä kuvan 37 esittämällä tavalla. Kuvan mittatulos on huippuarvoltaan kymmenkertainen todelliseen arvoon nähtynä oskilloskoopin asetusten johdosta.



Kuva 37. 3,3 V:n regulaattorin sammuminen

Tämä voisi selittää osaltaan kuvassa 27 näkyvän suurempitaajuisen häiriösignaalin pulssin ollessa alhaalla. Myös hyötysuhteen äkinäinen heikentyminen tietyn lähtötehon jälkeen voisi selittyä tällä.

5 V:n ja 12 V:n regulaattoreiden rippelijännitteet ovat myös hieman haluttua suuremmat. Tämän merkitys on todennäköisesti hyvin vähäinen, mutta halutessa niitä voisi laskea hieman lisäämällä lähtösuotimen induktanssia ja kapasitanssia. Käytännössä tämä voisi tarkoittaa lähtökelan muuttamista seuraavaan standardiarvoon.

Pulssitetun kuorman tapauksessa 3,3 V:n ja 5 V:n regulaattoreiden huono regulaatio pulssikuormalla johtuu suurella todennäköisyydellä hakkuripiirin sammumisesta liian suuren kuormavirran johdosta. 12 V:n hakkurilla taas pulssitetun kuorman regulaatio on kiitettävän hyvä.

Linjaregulaatio on kaikilla kolmella regulaattorikytkennällä erinomainen.

6 Yhteenveto

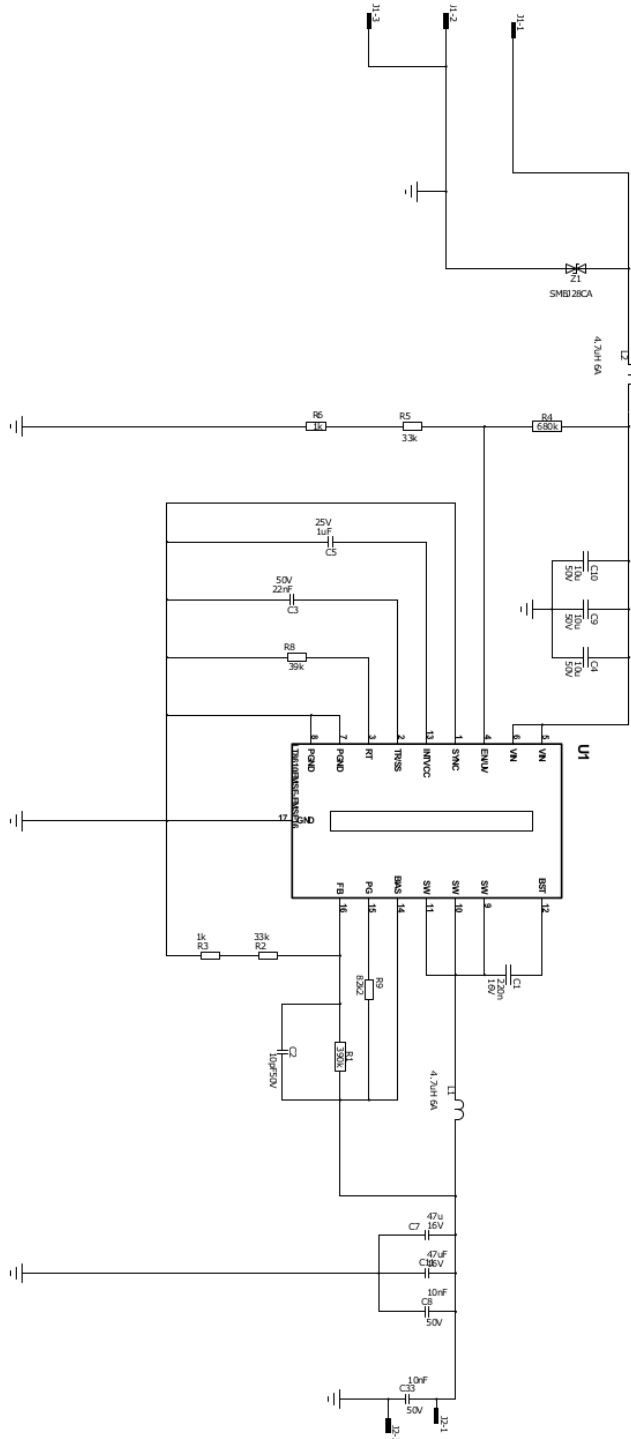
Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella kolme hakkuriregulaattoria yleisöautomaatin ohjauselektroniikkaa varten. Lisäksi suunnitellut regulaattorit tuli mitata niiden toiminnan selvittämiseksi. Tätä varten regulaattorikytkennöistä tehtiin prototyypilevy.

Regulaattorien määrittely, suunnittelu ja mittaukset onnistuivat pääosin hyvin, ja työn tuloksena saatiin suunniteltua kolme regulaattoria. Mittauksissa hakkuriregulaattoreista löydettiin ongelma, joka vaatii lisäselvittelyä. Tätä ongelmaa lukuunottamatta regulaattorit toimivat halutulla tavalla. Kun ongelma saadaan paikannettua ja korjattua, voidaan regulaattoreita käyttää lopullisessa laitteessa.

Lähteet

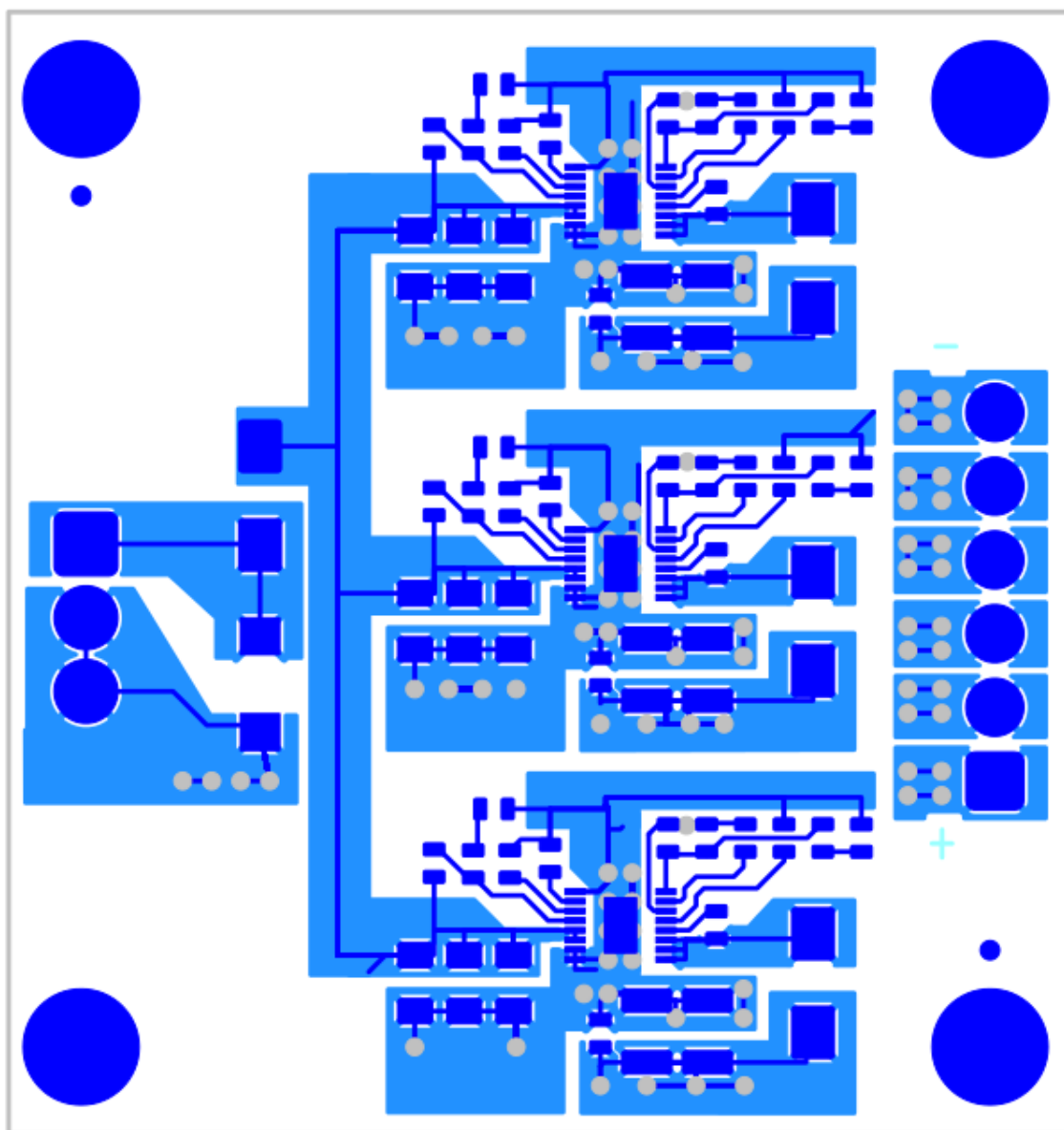
- 1 Floyd, Thomas L. 2012. Electronic Devices. Conventional Current Version. New Jersey: Prentice Hall.
- 2 Hurley, W.G. & Wölfle, W.H. 2013. Transformers and Inductors for Power Electronics. Theory, Design and Applications. West Sussex: Wiley.
- 3 Mohan, Undeland & Robbins. 2003. Power Electronics. Converters, Applications and Design. Hoboken: Wiley.
- 4 Kassakian, John G., Schlecht, Martin F. & Verghese, George C. 2014. Principles of Power Electronics. Cambridge: Pearson.
- 5 Voipio, Erkki. 1976. Virtapiirit ja verkot. Helsinki: Otatieto.
- 6 Erickson, Robert W. Maksimovic, Dragan. 2001. Fundamentals of Power Electronics. Norwell: Kluwer Academic Publishers.
- 7 Basic Switching Regulator Layout Techniques. 2004. Verkkodokumentti. Maxim Integrated. <<http://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/2997>>. Luettu 23.4.2015.
- 8 O'Hara, Martin. 1997. EMC at Component and PCB Level. Burlington: Newnes.
- 9 Klein, John. 2014. AN-6005 Synchronous buck MOSFET loss calculations. Application Note. Fairchild Semiconductor.
- 10 Schimel, Paul. 2011. Peak Current Mode Control Will Never Die!?. Verkkodokumentti. <<http://electronicdesign.com/power/peak-current-mode-control-will-never-die>>. Luettu 25.4.2015
- 11 LT8610. 2012. Datalehti. Linear Technology.
- 12 Modelling, Analysis and Compensation of the Current-Mode Converter. 1999. Application Note. Unitrode.

Hakkurikytkennän piirikaavio

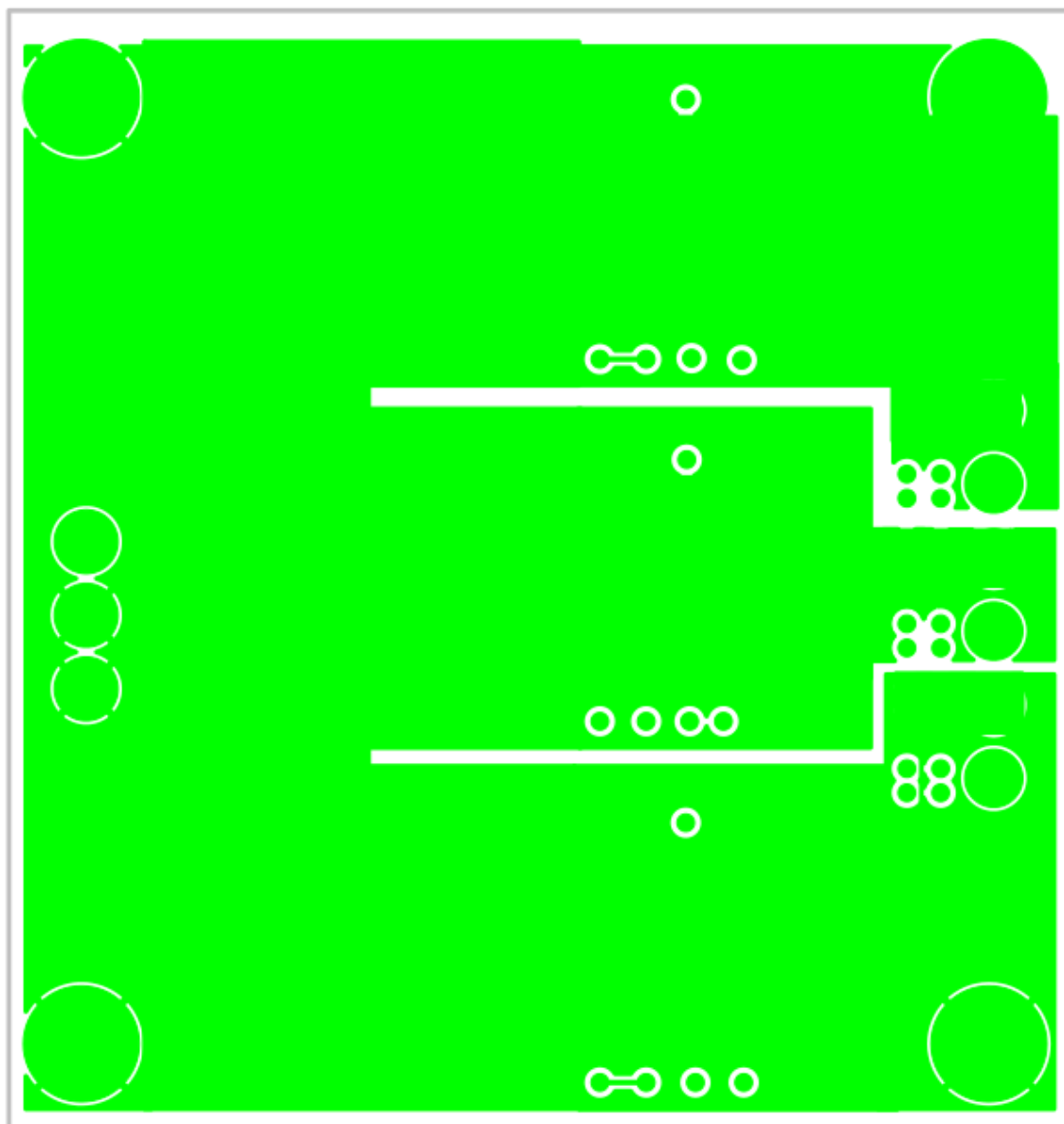


Kuva 1. 3,3 V:n hakkurikytkennän kytkentäkaavio

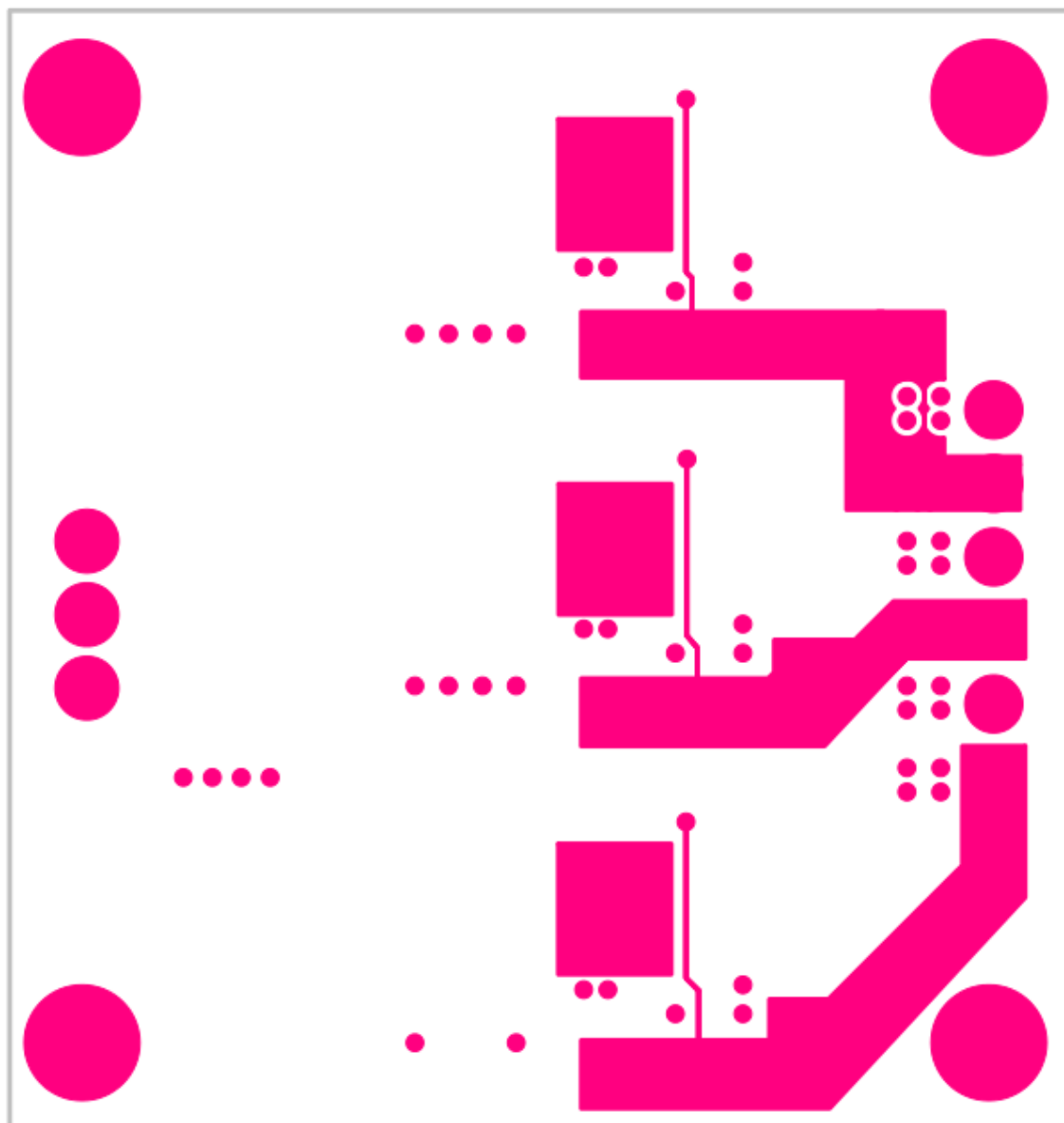
Kuvat piirilevyn asettelusta



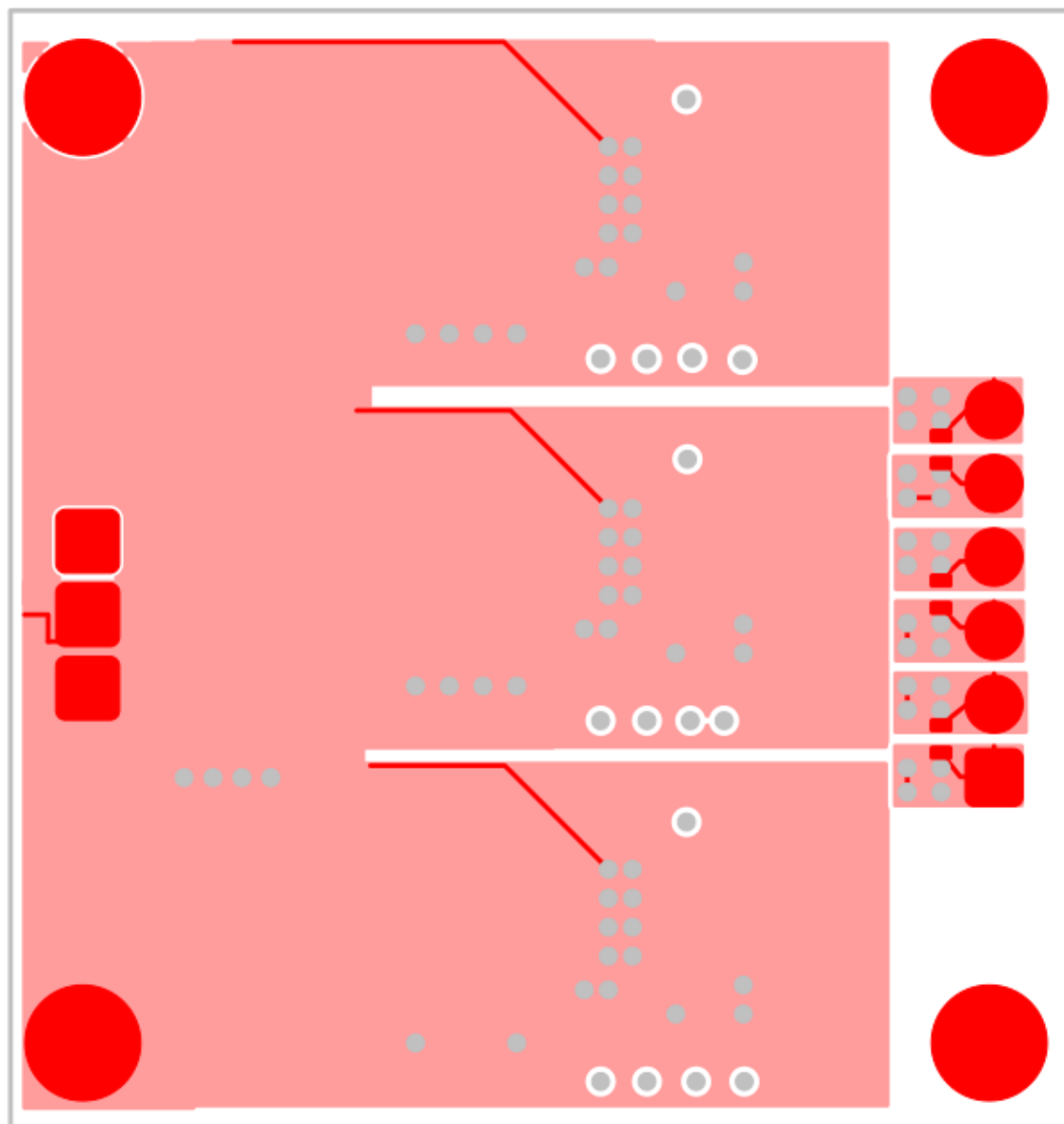
Kuva 1. Piirilevyn yläkerroksen asettelu ja kuparoinnit



Kuva 2. Piirilevyn maakerroksen kuparoinnit

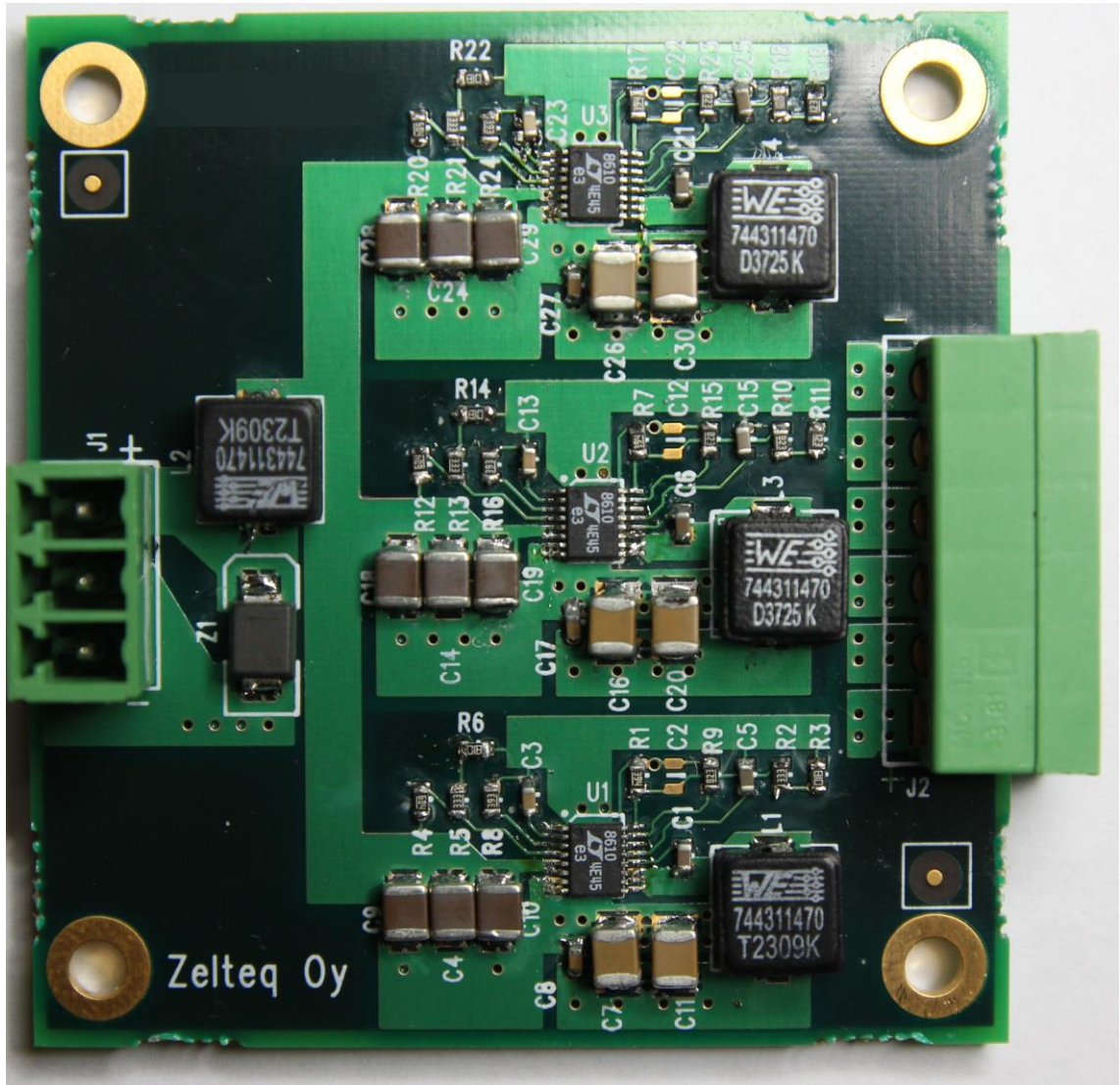


Kuva 3. Piirilevyn toisen sisäkerroksen kuparoinnit

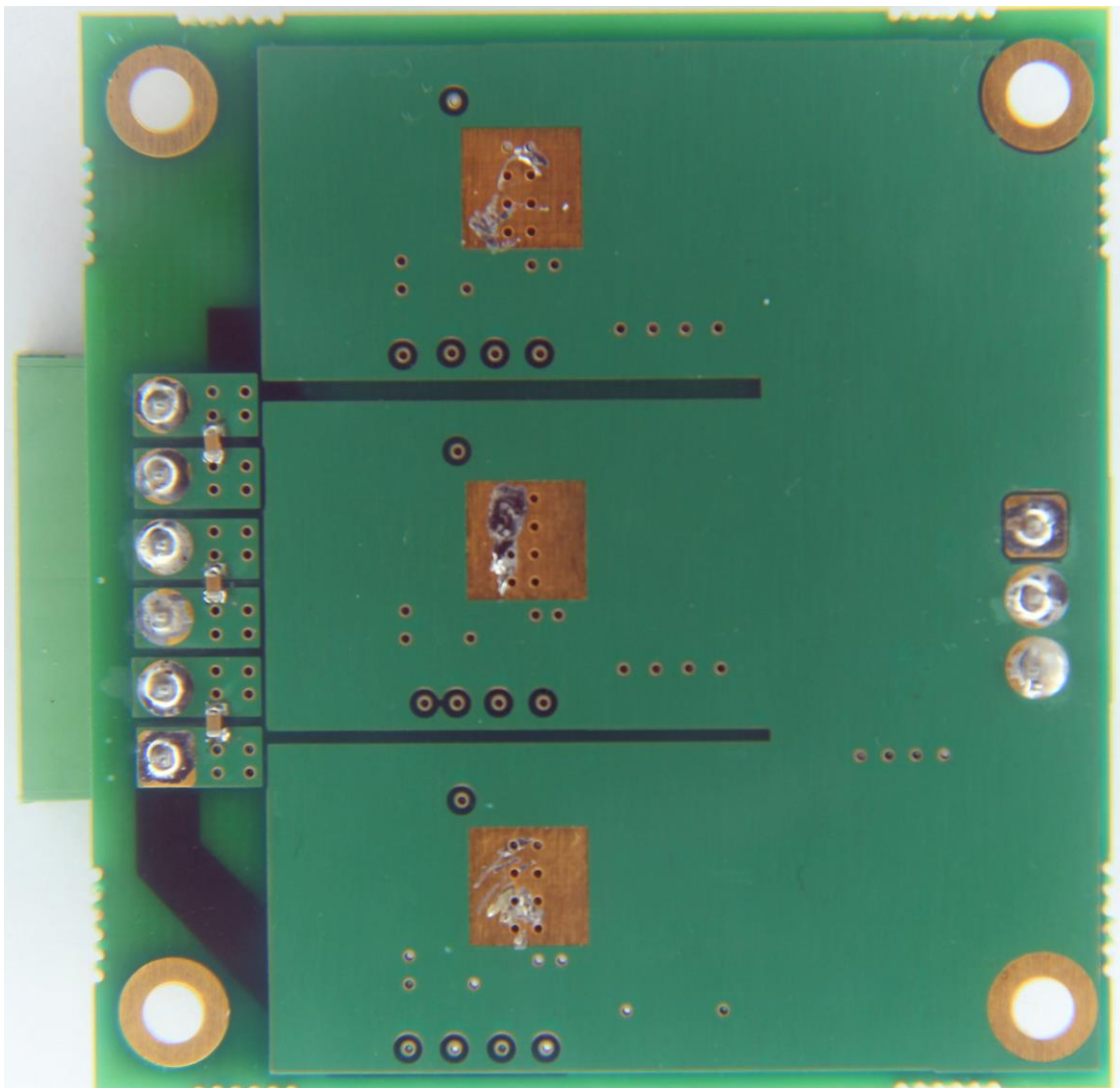


Kuva 4. Piirilevyn alapuolen asettelu ja kuparoinnit

Kuvat piirilevystä



Kuva 1. Prototyypilevyn yläpuoli



Kuva 2. Prototyypilevyn alapuoli

Mittatulokset

Taulukko 1. Mittadata

3,3V kuorma		3,3V linja		3,3V hyöty			
Iload, A	Vout, V	Vin, V	Vout, V	Vin, V	lin, A	Vout, V	Iout, A
1,69E-02	3,33	20,71	3,31	22,9	3,36E-03	3,33	1,70E-02
1,02E-01	3,31	21,19	3,31	22,9	1,95E-02	3,31	1,02E-01
2,52E-01	3,25	21,48	3,31	22,9	3,77E-02	3,28	2,01E-01
5,01E-01	3,16	22,03	3,31	22,9	5,59E-02	3,24	3,04E-01
1	2,95	22,49	3,31	22,9	8,73E-02	3,16	5,03E-01
1,52	2,74	22,98	3,31	22,9	1,65E-01	2,95	1,01
		23,37	3,31	22,9	2,48E-01	2,73	1,52
		26,1	3,31				
5V kuorma		5V linja		5V hyöty			
Iload, A	Vout, V	Vin, V	Vout, V	Vin, V	lin, A	Vout, V	Iout, A
1,74E-02	5,02	20,85	5	22,98	4,97E-03	5,02	1,75E-02
9,97E-02	5	21,52	5	22,97	2,83E-02	5	1,01E-01
2,03E-01	4,97	21,94	5	22,97	5,52E-02	4,99	2,02E-01
3,02E-01	4,93	22,49	5	22,97	7,78E-02	4,93	3,01E-01
4,13E-01	4,89	22,98	5	22,96	1,25E-01	4,85	5,02E-01
5,26E-01	4,84	23,62	5	22,96	1,83E-01	4,74	7,52E-01
7,50E-01	4,74	25,98	5	22,95	2,40E-01	4,64	1
1,01	4,64						
12V kuorma		12V linja		12V hyöty			
Iload, A	Vout, V	Vin, V	Vout, V	Vin, V	lin, A	Vout, V	Iout, A
1,64E-02	12,14	21,19	12,13	23	8,62E-02	12,13	1,38E-01
1,00E-01	12,14	21,43	12,13	22,97	1,22E-01	12,1	2,08E-01
2,02E-01	12,1	21,97	12,13	22,97	1,78E-01	12,06	3,02E-01
3,02E-01	12,06	22,48	12,13	22,96	2,30E-01	12,02	4,01E-01
4,00E-01	12,016	23,03	12,13	22,48	2,77E-01	11,98	4,80E-01
5,02E-01	11,98	23,49	12,13				
		26,03	12,13				