

Toni Miilunpalo

# Induktiokuumentimen suunnittelu ja toteutus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

22.5.2014

Tekijä Otsikko	Toni Miilunpalo Induktiokuumentimen suunnittelu ja toteutus
Sivumäärä Aika	33 sivua 22.5.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Autosähkötekniikka
Ohjaaja	Vesa Linja-aho, Lehtori
<p>Insinööri työ käsittelee autokorjaamokäyttöön soveltuvan induktiokuumentimen suunnittelua ja toteutusta.</p> <p>Työn tarkoituksena on suunnitella ja luoda toimiva sähkölaite sekä antaa kuva siitä, millaista tuotekehitys on ja kuinka paljon asioita yhden tuotteen suunnittelussa ja toteutuksessa tulee ottaa huomioon.</p> <p>Työ koostuu kolmesta osa-alueesta. Ensimmäinen osa-alue käsittelee induktiokuumennusta ja induktiokuumentimia yleisesti. Toinen osa-alue koostuu suunnittelun perusteista, ja siinä käydään vaiheittain läpi induktiokuumentimessä olevat komponentit ja niiden käyttötarkoitus, mikrokontrollerin hyödyntäminen ja kotelon suunnittelu. Kolmannessa osassa esitellään eri jännitteille toteutettuja malleja.</p> <p>Työn tuloksena saatiin aikaan toimiva ja liikuteltava induktiokuumennin, jota voidaan käyttää autokorjaustöissä ja erinäisissä induktiokuumennussovelluksissa.</p>	
Avainsanat	induktiokuumennin, induktiokuumennus, suunnittelu, toteutus

Author Title	Toni Miilunpalo Design and Implementation of Induction Heater
Number of Pages Date	33 pages 22 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Electronics Engineering
Instructor	Vesa Linja-aho, Senior Lecturer
<p>The Bachelor's thesis deals with the design and implementation of an induction heater used in automobile repair shop applications.</p> <p>The purpose of this thesis is to design and manufacture an electronic device and to get an idea of a new product development and discuss what should be taken into account when designing and implementing a new product.</p> <p>The thesis consists of three different parts. The first part gives a general introduction of induction heating and induction heaters. The second part explains the fundamentals of design and it describes step-by-step the components used in induction heater and their purpose. In addition the second part covers the utilization of a microcontroller and case design. The third part of the thesis introduces implemented models for different voltages.</p> <p>The result of this thesis is a fully working and movable induction heater, which can be used for automobile repairing and different induction heating applications.</p>	
Keywords	induction heater, induction heating, design, implementation

## **Alkusanat**

Tämä insinöörityö tehtiin omakustanteisesti pääasiallisesti vuoden 2013 syksyn ja 2014 kevään aikana. Aiheen valinta tapahtui vuoden 2013 lopussa, suunnittelu vuoden 2014 alussa ja toteutus kevään aikana.

Haluan kiittää kaikkia opettajiani Metropolia Ammattikorkeakoulussa, sillä ilman heidän opetustyötään en olisi pystynyt tätä työtä tekemään. Esitän kiitokseni lehtori Vesa Linja-aholle työn ohjaamisesta ja positiivisesta asenteesta työtä kohtaan. Esitän erityiskiitoksen myös projekti-insinööri Joel Kontturille kannustavasta asenteesta ja korvaamattomasta avusta valmistusprosessissa.

Haluan osoittaa myös suuret kiitokset perheenjäsenilleni heidän tuestaan koko opiskeluajan.

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta ja tavoite	1
1.2	Vastuuvapauslause	2
2	Induktiokuumennin	2
3	Suunnittelu	4
3.1	IGBT	4
3.2	Suunnittelun perusteet	6
3.3	Dead-Time Control	10
3.4	Korkeajännitepiiri	11
3.5	Piirin virittäminen ja häviöt	14
3.6	Työkela	16
3.7	Jäähdytysjärjestelmä	17
3.8	KytKentäkaavion ja piirilevyn suunnittelu ja valmistus	17
3.9	PID-säätö	18
3.9.1	PID-säädin	18
3.9.2	Mikrokontrollerin ohjelmointi	19
3.10	Kotelon valmistus ja 3D-malli	21
4	Toteutus	23
4.1	12 V:n malli	23
4.2	230 V:n malli	25
4.3	Kolmivaihemalli	27
5	Yhteenveto	32
	Lähteet	33

## Lyhenteet

DTC	Dead-Time Control, ulostulosignaalin kytkentäviiveen ohjaus
EMC	Electromagnetic compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
I2C	Inter-Integrated Circuit, yksinkertainen kaksisuuntainen tiedonsiirtoväylä
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, eristehilabipolaaritransistori
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, metallioksidipuolijohdekanavatransistori
NTC	Negative Temperature Coefficient thermistor, negatiivisen lämpötilakertoimen omaava vastus
PID	Proportional-integral-derivative-säädin
PWM	Pulse-Width-Modulation, pulssinleveysmodulaatio eli (jännitteen) säätö pulssisuhdetta muuttamalla
SPI	Serial Peripheral Interface, sarjamuotoinen oheislaiteväylä

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn tausta ja tavoite

Autoja korjattaessa tulee ajoittain vastaan tilanne, jossa täytyisi avata liiaksi kiristetty tai kiinni ruostunut mutteri tai pultti. Näissä tilanteissa turvaudutaan yleensä lisäaineiden käyttöön ja/tai isompaan vääntövarteen, mikä ei ole aina paras vaihtoehto. Pultti voi mennä poikki, on liian hankalassa paikassa vääntövarren kasvattamista varten, tai voiman lisääminen ei auta. Tällöin avautumista helpottaa yleensä kohteen lämmittäminen. Hitsauspolttimella lämmittäminen onnistuu, mutta tällöin lämpiävät myös ympäröivät osat, mikä ei ole toivottavaa. Korjaajan tulisi tällöin myös omistaa tulityökortti.

Ratkaisuna ongelmaan autokorjaamoilla käytetään induktiokuumennusta, joka lämmittää vain haluttua kohdetta. Kaupalliset induktiokuumentimet ovat kuitenkin hintavia. Pienitehoiset maksavat noin tuhat euroa ja tehokkaimmat useita tuhansia. Elektroniikasta ja sähkötekniikasta kiinnostuneena päätin suunnitella ja toteuttaa insinööritöyteni oman induktiokuumentimen, jonka ominaisuuksista saan itse päättää.

Tavoitteena on suunnitella mahdollisimman tehokas ja liikuteltava induktiokuumennin autokorjaamokäyttöön. Laitteen virran syötössä käytetään kolmivaihevirtaa suuren tehon aikaansaamiseksi. Suurin ottoteho 230 voltin verkosta 16 A:n sulakkeella on 3680 W, mutta kolmivaihevirtaa ja 16 A:n sulaketta käyttämällä se on kolminkertainen eli 11040 W. Käytettävä taajuus on muutamia kymmeniä kilohertsejä riippuen työkelan ja työkappaleen koosta.

Yksinkertaisesti sanottuna induktiokuumennin on taajuusmuuttaja. Se muuttaa sähköverkon 50 Hz:n vaihtojännitteen kymmenien kilohertsien vaihtojännitteeksi.

## 1.2 Vastuuvapauslause

Tässä insinööriyössä käsitellään korkeita jännitteitä ja virtoja, joten en kehota ketään sähköturvallisuuteen perehtymätöntä kokeilemaan tässä työssä olevia kytkentöjä.

Induktiokuumennin voi luoda ympärilleen epätoivottuja radiokenttiä ja luoda EMC-häiriöitä, joten myös nämä on otettava huomioon. Sydämentahdistimen omistavien henkilöiden ei pitäisi työskennellä induktiokuumentimen lähellä sen mahdollisesti aiheuttamien häiriöiden takia.

Lisäksi kaikki ylimääräiset metalliesineet tulisi poistaa laitetta käytettäessä, kuten kellot ja sormukset. Asiaankuuluvia suojavaarusteita on myös käytettävä.

## 2 Induktiokuumennin

Induktiokuumennin on laite, jota käytetään mm. metallien kuumentamiseen, sulattamiseen ja lämpökäsittelyyn. Se koostuu teholähteestä ja kelasta (työkela), joka ympäröi sähköä johtavaa kuumennettavaa kappaletta (työkappale) ja kuumentaa tätä ilman fyysistä kontaktia. Kuumennin perustuu ensisijaisesti työkappaleessa syntyviin pyörrevirtahäviöihin ja toissijaisesti työkappaleen materiaalin magneettisiin hystereesi-häviöihin. [1.]

Pyörrevirtahäviöt syntyvät sähkömagneettisen induktion eli magneettivuon muutoksen johdosta. Vaihtamalla nopeasti näiden pyörrevirtojen suuntaa sähköä johtava kappale, esimerkiksi rauta tai muu metalli, kuumenee sen resistanssista johtuen. Muuttuva magneettikenttä luodaan syöttämällä vaihtovirtaa työkappaleen ympärillä olevaan työkelaan. Magneettiset häviöt puolestaan syntyvät muuttuvan magneettikentän magnetoidessa työkappaleen materiaalia edestakaisin, mistä aiheutuva kitka lämmittää työkappaletta.



Työkelassa kulkevan sinimuotoisen vaihtovirran taajuus on muutamista kilohertseistä satoihin kilohertzeihin. Mitä suurempi taajuus, sitä enemmän kappaleen ulkopinta kuumenee. Tämä johtuu virranajoilmiöstä. Suuremmalla taajuudella saadaan kuumennettua kappaleen ulkopintaa, koska siellä sähkövirran tiheys on isompi kuin sisäpuolella ja näin myös häviöt ovat isommat. Jos vastaavasti tarvitaan parempaa lämmön tunkeutumista kappaleen sisään, käytetään matalampaa taajuutta. Kuumennusteho on myös matalalla taajuudella parempi, koska silloin virta ehti kasvamaan suuremmaksi ennen suunnan vaihtoa.

Induktiokuumentimesta on olemassa autokorjaamoille useita kaupallisia tuotteita, joiden koko ja teholuokat vaihtelevat suuresti. Kuva 1 havainnollistaa laitteiden kokoa. Autokorjaamoille myytävien kuumentimien lämmitystehot alkavat noin 1 kW:sta ja suurimmat ovat noin 20 kW:n tehoisia. Valmistajia ovat mm. Albatros, Alesco, Atoy, Autorobot, Idtools, Josam ja Telwin. Käyttökohteina korjaamoilla ovat mm. ruostuneiden liitosten ja peltien lämmittäminen, erilaiset oikaisu- ja taivutustyöt sekä liimalasien, listojen, teippien ja tarrojen irrottaminen.



Kuva 1. Erikoisia induktiokuumentimia Auto & Korjaamo -messuilla

### 3 Suunnittelu

#### 3.1 IGBT

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) eli eristehilabipolaaritransistori on transistori, joka kehitettiin 1980-luvulla, mutta on vasta kunnolla yleistynyt 2000-luvulla. Se yhdistää perinteisen bipolaaritransistorin ja MOSFET-transistorin hyvät ominaisuudet eli jännitteellä ohjaamisen ja matalat häviöt. Näin ollen se on hyvä komponentti kohtalaisia jännitteitä ja virtoja käsiteltäessä. IGBT:n huonoja puolia ovat sopimattomuus lineaariseen signaalinkäsittelyyn ja toiminta vain pienillä taajuuksilla. Näissä olosuhteissa MOSFET on toistaiseksi paras komponentti. [2, s. 285.]

IGBT on ideaalinen komponentti induktiokuumentimeen, jossa hallitaan kohtalaisia virtoja ja jännitteitä, mutta taajuudet eivät ole isoja. Lämpöhäviöitä kuitenkin esiintyy, ja jatkuvan tilan häviöiden laskeminen jäähdtyystä pohdittaessa tapahtuu Joulen lain avulla seuraavasti:

$$P = U * I$$

$P$  on komponentin lämpöhäviö  
 $U$  on komponentin yli oleva jännite  
 $I$  on komponentin läpi kulkeva virta

Saturaatiojännite eli  $U$  ei juuri kasva virran kasvaessa, joten kun se tiedetään, voidaan läpikulkevan virran eli  $I$  avulla laskea IGBT:n yli tehohäviöt. Työssä käytetyn IGBT:n saturaatiojännite on 2,5 V (25 °C) [3].

Tehohäviö 16 ampeerin virralla ja datalehden antamalla saturaatiojännitteellä saadaan seuraavasti:

$$P = 2,5 \text{ V} * 16 \text{ A} = 40 \text{ W}$$

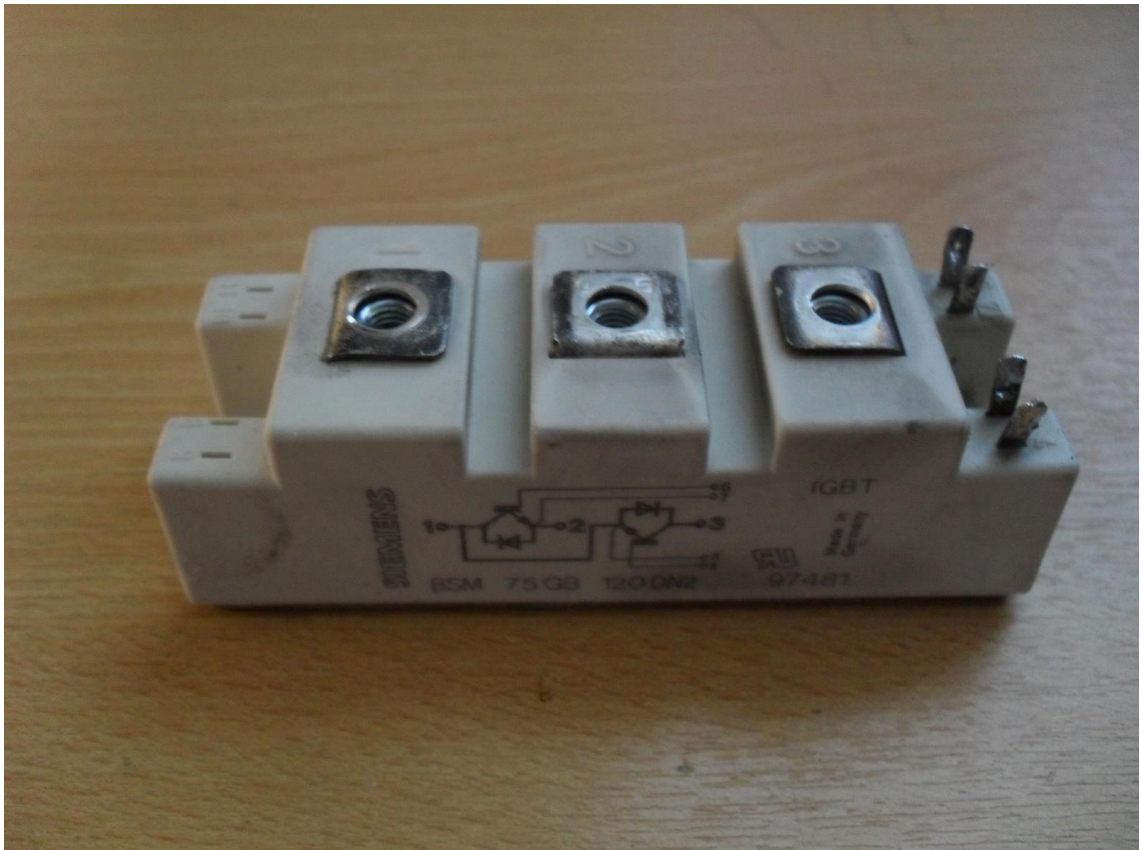
Todellisuudessa yksi IGBT on auki puolet ajasta eli lämpöhäviöt ovat noin puolet lasketusta.

IGBT:n lämpötilan noustessa (125 °C) myös saturaatiojännite nousee hieman, 3,1 volttiin [3].

Tämä vaikuttaa lämpöhäviöihin kasvattavasti:

$$P = 3,1 \text{ V} * 16 \text{ A} = 49,6 \text{ W}$$

Työssä käytettävien IGBT-moduulien Turn-On-viive, nousuaika, Turn-Off-viive ja laskuaika yhteenlaskettuna on alle mikrosekunti. Näin ollen edes 100 kHz:n taajuudella IGBT-moduulien viiveet eivät tule aiheuttamaan ongelmia. Kuva 2 on otettu käytetystä IGBT-moduulista.



Kuva 2. Työssä käytetty IGBT-moduuli

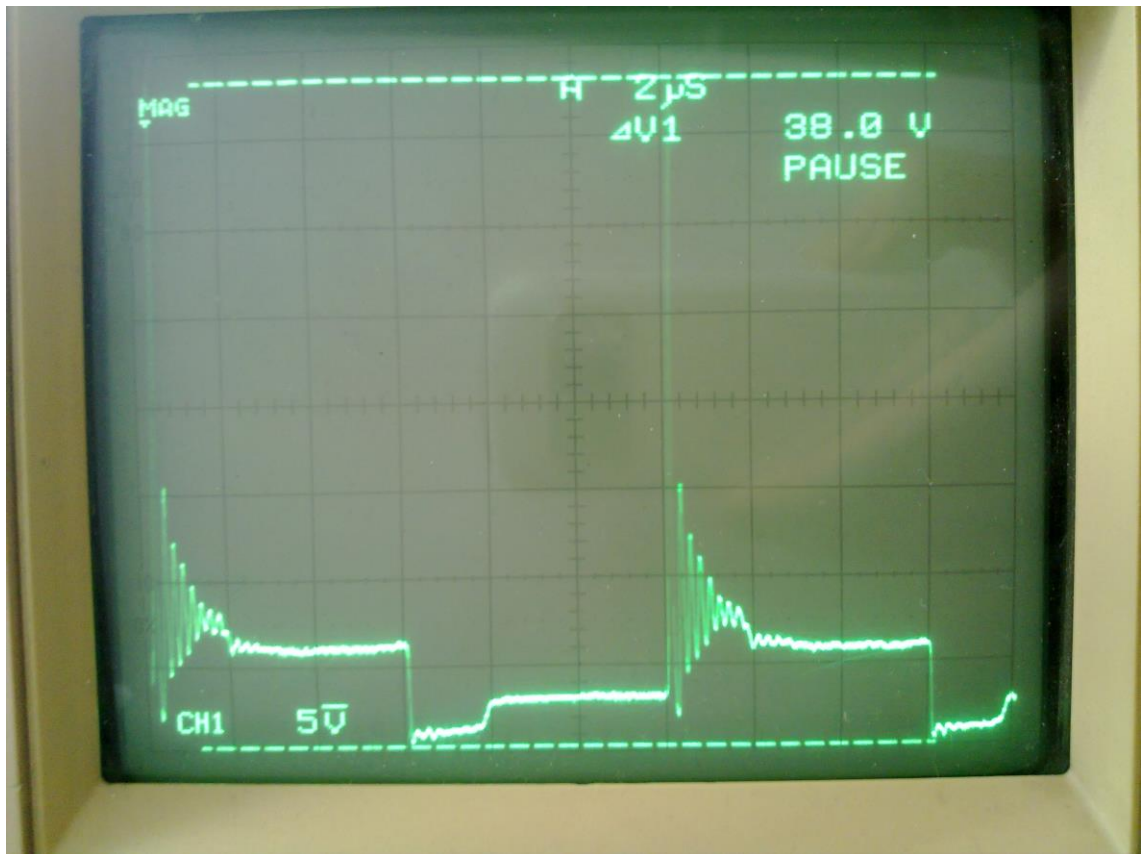
### 3.2 Suunnittelun perusteet

Suunnittelu aloitettiin luomalla vaihtuvan magneettikentän perusedellytykset. Tämä toteuttamiseksi käytettiin yleisesti käytössä olevaa TL494-oskillaattoriipiiriä luomaan IGBT-moduuleille kanttiaaltoa, joka lopulta työkelassa muuttuu siniaalloksi. TL494-piiri pystyy syöttämään ulos vain 200 mA:n huippuvirran [4].

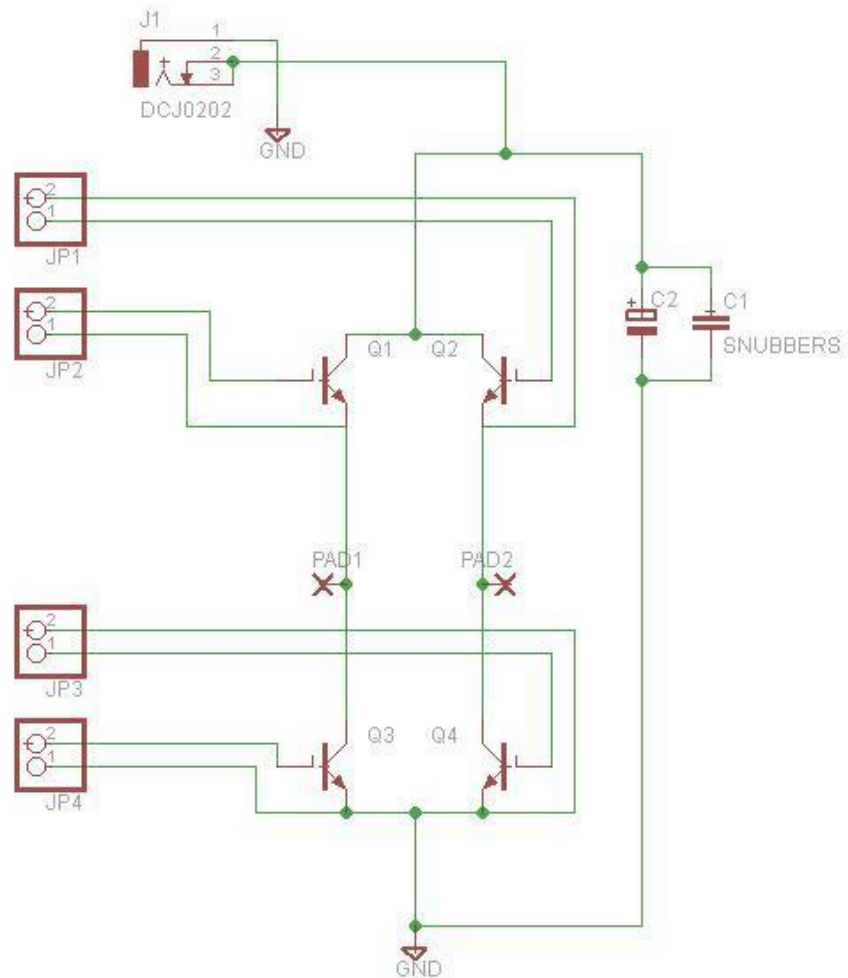
Tällä virralla ja kymmenien kilohertsien taajuudella IGBT ei kuitenkaan kerkeä avautumaan tarpeeksi nopeasti sen sisääntulokapasitanssin johdosta, minkä takia IGBT:iden ohjausvirtaa pitää kasvattaa. Kanttiaalto syötetään MOSFET:ien ohjaamiseen tarkoitetuille ajureille TC4420, jotka voivat syöttää IGBT-moduuleille piikkivirran kuusi ampeeria [5].

Virta rajoitetaan vastuksella ja tasavirran kulku estetään sarjakondensaattorilla. Ajurien antamalla virralla pystytään ohjaamaan IGBT-moduuleita kymmenien kilohertsien taajuudella.

Myöhemmin testeissä selvisi, ettei MOSFET-ajurien kuuden ampeerin huippuvirta riittänyt avaamaan IGBT-moduuleita tarpeeksi häiriöttömästi. Kävi myös ilmi, että IGBT-moduulien avautuessa hilan ja emitterin välillä ilmeni haitallinen jännitepiikki, joka näkyy kuvassa 3. Jännitepiikin suuruus oli ohjauspiirin 16 voltin syöttöjännitteellä noin 38 voltin suuruinen. Tämä jännitepiikki syntyi luultavasti ohjauselektroniikan eristävän toroidimuuntajan vaikutuksesta. Jännitepiikin poistamiseksi ja avautumisen parantamiseksi suunniteltiin MOSFET-ajurien ja IGBT-moduulien väliin neljästä HGTG30N60B3D IGBT:stä rakentuva H-silta. Näin IGBT-moduulit saivat paremmin virtaa avautuakseen ja edellä esitetyt ongelmat saatiin poistettua. Kuvassa 4 näkyy lisätyn H-sillan kytkentäkaavio.



Kuva 3. Jännite hilan ja emitterin väliltä mitattuna



Kuva 4. Lisätyn H-sillan kytkentäkaavio

Työssä IGBT-moduuleiden ja ohjauspiirin (TL494, MOSFET-ajurit ja H-silta) välille toteutettiin galvaaninen erotus, jolloin sähkövirta ei pääse kulkemaan johtumalla vaan ohjaussignaali siirtyy magneettikentän välityksellä. Erotuksella on suuri merkitys sähköturvallisuuden kannalta. Näin ohjauspiiri saadaan eristettyä korkeajännitteestä ja varmistettua ettei korkeajännite pääse vaikuttamaan siihen. Työssä erotus toteutettiin 1:1-suhteen toroidimuuntajalla. Koska muuntajassa käytettyjen johdinten eristeen jännitteenkestosta ei ollut täyttä varmuutta, vahvistettiin muuntajan jännitteenkestoa vielä eristysteipillä.

TL494-piirin sisältämän oskillaattorin taajuutta voidaan säätää portaattomasti. Tätä tarvitaan, kun viritetään työkelasta ja kompensointikondensaattorista koostuva virityspiiri resonanssitaajuudelle, jolloin mahdollisimman suuri virta kulkee työkelalla. Oskillaattoritaajuutta ei voida asettaa vakioksi, koska sitä pitää pystyä säätämään tilanteessa, jossa työkelaan viedään kuumennettava kappale ja työkelan induktanssi muuttuu. Jotta virityspiiri saadaan uudelleen viritettyä ja saavutetaan taas mahdollisimman suuri virta työkelalle, pitää taajuus saada säädettyä piirin resonanssitaajuudelle.

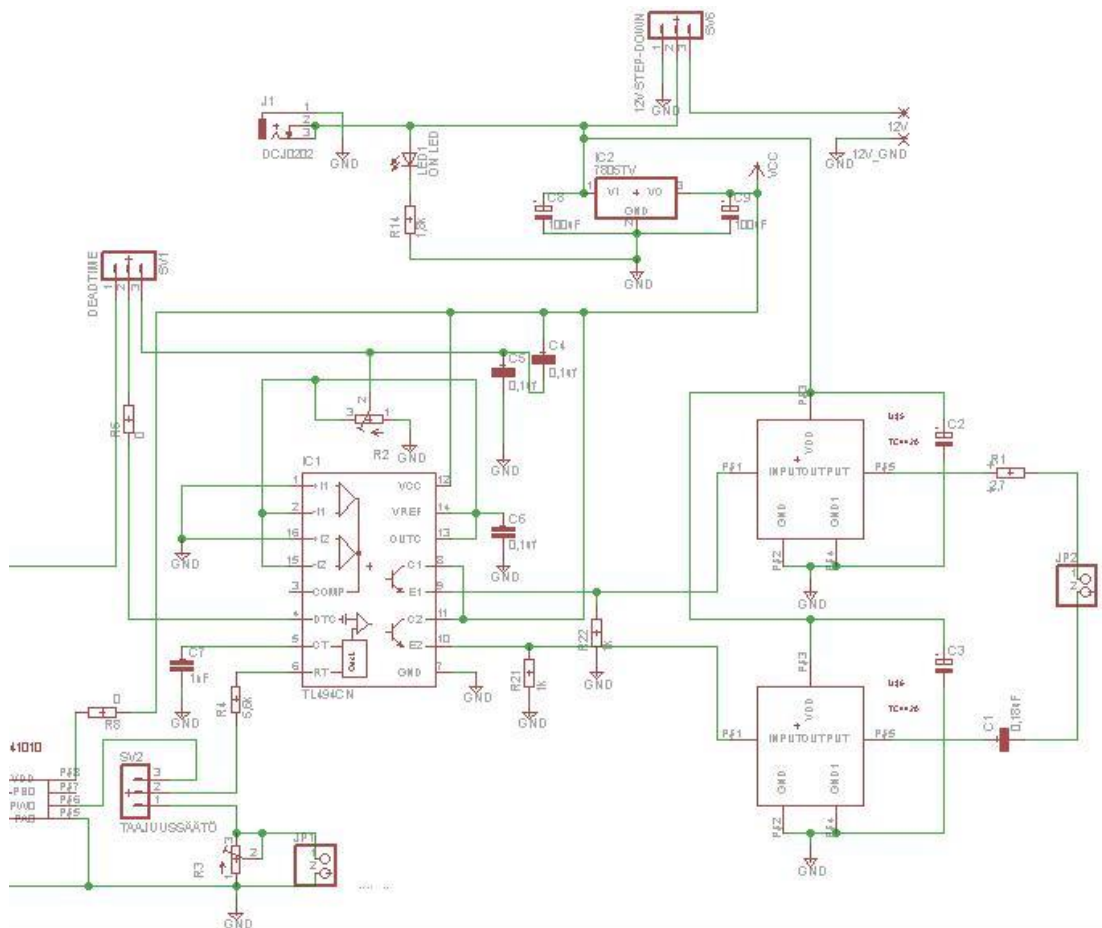
Taajuuden säätö tapahtuu muuttamalla TL494-piirin CT-pinnin kapasitanssia ja RT-pinnin resistanssia. Tässä työssä CT-pinnin kapasitanssi asetettiin vakioksi arvoon 1 nF ja RT-pinniin kytkettiin sarjaan yhden kilo-ohmin vastus ja 20 kilo-ohmin potentiometri. Näin taajuutta voidaan säätää portaattomasti.

Myöhemmin potentiometri korvattiin digitaalisella potentiometrillä MCP41010, jonka resistanssia voidaan säätää alueella 0–10 kilo-ohmia 256 askeleen välein [6].

Näin taajuutta pystytään säätämään digitaalisesti mikrokontrollerin avulla. Sarjassa oleva vastus vaihdettiin 5,6 kilo-ohmin suuruiseksi, jottei ylitettäisi potentiometrin sallimaa huippuvirtaa, joka on  $\pm 1$  mA. Tällä vastuksella ja potentiometrin säätyvällä resistanssilla saadaan laskettua taajuusalue TL494:n datalehtestä löytyvää yhtälöä käyttäen. Vaihteluväli on 32–89 kHz. [7, s. 7.]

Kuva 5 esittää TL494-piirin avulla rakennettua oskillaattoripiiriä. Piirin virtalähteenä käytettiin vanhan kannettavan tietokoneen virtalähdettä, joka toimii 16 V jännitteellä.





Kuva 5. Oskillaattori

### 3.3 Dead-Time Control

TL494-piirissä olevalla Dead-Time Control eli DTC-pinnillä voidaan toteuttaa ulostulosignaalin sallinta. Kun TL494-piirin ulostuloista halutaan ohjaussignaali, asetetaan DTC-pinnin jännitteeksi 0 voltia. Pinnin jännitteen ollessa yli 3,3 voltia ulos ei tule lainkaan ohjaussignaalia. Pinnin ohjaus on toteutettu transistorilla, jolla halutaan estää virtoja päälle kytkettäessä ohjaussignaalin pääsy IGBT-moduuleille eli DTC-pinnin jännite on tällöin oltava yli 3,3 voltia. [7, s. 8.]

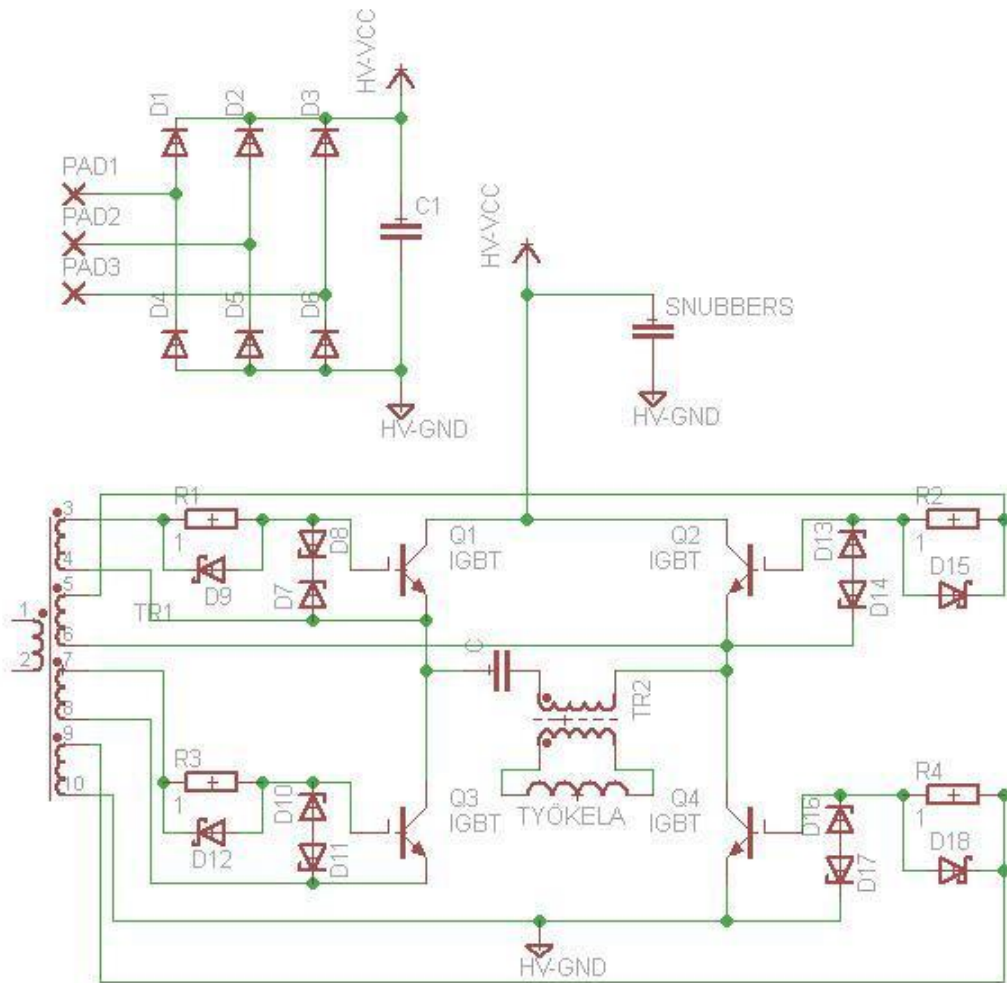


Pinniä voitaisiin ohjata myös suoraan mikrokontrollerilla, mutta virtoja päälle kytkettäessä mikrokontrollerin herääminen kestää jokin aikaa eikä ulostuloa ei saada heti jännitteiseksi, jolloin ohjaussignaali pääsisi IGBT-moduuleille. Mikrokontrollerin ohjaamana DTC-pinniin ei myöskään koskaan saataisi haluttua 0 voltia, koska maahan kytkettyjen mikrokontrollerin pinnien yli jää pieni jännite sisäisestä transistorista johtuen.

Mikrokontrollerin voi jatkossa koodata myös ohjaamaan DTC-pinniä PWM:llä, jolloin saadaan toteutettua parempi virran säätö.

### 3.4 Korkeajännitepiiri

Korkeajännitepiiri koostuu diodisillasta, kuparisista virtakiskoista, kondensaattoreista, IGBT-moduuleista ja toroidimuuntajasta. Korkeajännitepiirin komponentit näkyvät kuvassa 6. Diodisillan tehtävä on tasasuunnata laitteeseen syötettävää kolmivaihevirtaa. Tämä tasasuunnattu vaihtojännite tasataan elektrolyyttikondensaattoreilla, joiden yhteenlaskettu kapasitanssi on 250 mikrofaria. Tasasuunnatun kolmivaihevirran johdosta virtakiskoissa tulee olemaan noin 560 voltin jännite, joten jännitekeston takia työssä käytettiin viittä rinnan olevaa kondensaattoriparia. Jokaisessa parissa oli sarjassa kaksi 100 mikrofardin ja 450 voltin jännitekestoaltaan olevaa elektrolyyttikondensaattoria. Esilatauspiiriä ei työssä käytetty.



Kuva 6. Korkeajännitepiiri

Tasasuunnatusta jännitteestä H-siltaan kytketyt IGBT-moduulit syöttävät virtaa ohjauspiiristä tulevalla oskillaattoritaajuudella toroidimuuntajaan, joka muuntaa ison jännitteen ja pienen virran pieneksi jännitteeksi ja suureksi virraksi. Taajuus pysyy kuitenkin samana. Muuntosuhde ideaaliselle muuntajalle voidaan laskea seuraavasti:

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$n$  on muuntosuhde

$N_1$  on ensiöpuolen johdinkierrosmäärä

$N_2$  on toisiopuolen johdinkierrosmäärä

$U_1$  on ensiöpuolen jännite

$U_2$  on toisiopuolen jännite

$I_1$  on ensiöpuolen virta

$I_2$  on toisiopuolen virta

Työssä käytettyjen toroidimuuntajan toroidien mitat ovat 102 mm x 65 mm x 20 mm ja niitä käytettiin kolme kappaletta. Ensiöpuolella johdinkierrosmäärä on 17 ja toisiopuolella yksi. Näillä johdinkierrosmäärillä, 16 ampeerin ensiövirralla voidaan laskea toisiovirta seuraavasti:

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} * I_1 = \frac{17}{1} * 16 \text{ A} = 272 \text{ A}$$

Tämä toisiovirta on huomioitava suunniteltaessa toisiopuolen johtimia ja niiden jäähdytystä.

Ferriitistä valmistettua toroidimuuntajaa käytetään tässä työssä perinteisen e-sydänpakkarautamuuntajan sijasta, koska toroidin magneettikenttä sijoittuu toroidin ytimen sisään eli syntynyt hajakenttä on pienempi ja hyötysuhde parempi. Toroidimuuntaja luo myös vähemmän häiriöitä perinteiseen e-sydänmuuntajaan verrattuna. Koska taajuus on useita kymmeniä kilohertsejä, on sydänmateriaalina käytettävä ferriittiä: pakkautasydän toimii vain hyvin matalilla taajuuksilla pyörrevirtahäviöiden ja hystereesihäviöiden takia.

Muuntaja lisäksi erottaa työkelan galvaanisesti korkeajännitepiiristä lisäten sähköturvallisuutta. Galvaanisesta erotuksesta huolimatta työkelalle kuitenkin syntyy kohtalainen jännite resonanssista johtuen, mikä on tiedostettava.

Toroidimuuntajan muuntama virta syötetään lopuksi työkelaan, joka luo oskillaattoritaajuudella muuttuvan magneettikentän kuumennettavan kappaleen ympärille aiheuttaen kappaleeseen pyörrevirtoja ja magneettisia häviöitä, jolloin kappale kuumenee.

Koska IGBT-moduulit kytkevät virtaa nopeasti, aiheuttavat ne haitallisia transienttijännitteitä IGBT-moduulien yli. Näiden jännitteiden vähentämiseksi IGBT-moduulien kohdalle virtakiskoihin kiinnitettiin neljä kappaletta Snubber-kondensaattoreita, joiden yhteenlaskettu kapasitanssi on 18,8  $\mu\text{F}$ . Nämä kondensaattorit vähentävät kyseisiä transienttijännitehäiriöitä siedettävälle tasolle.

Lisäksi IGBT-moduulien hiloille suunniteltiin Zener-diodeista ja vastuksista ylijännitesuojaus. Koska hila-emitteri jännite ei saa ylittää arvoa  $\pm 20$  V, käytettiin kahta vastakkain kytkettyä 16 voltin Zener-diodia. Näin jännite saadaan hilalla aina rajoitettua 16,7 volttiin. Yhden ohmin vastuksen rinnalle kytkettiin vielä Schottky-diodi, jolla hilan varaus saadaan tyhjennettyä nopeasti.

### 3.5 Piirin virittäminen ja häviöt

Toroidimuuntajan jälkeen tulevat työkela ja kompensointikondensaattori. Ne muodostavat sarjaresonanssipiirin, joka tulee virittää oikealle resonanssitaajuudelle, jotta työkelalla kulkeva virta olisi mahdollisimman suuri. Viritetyssä resonanssipiirissä impedanssin imaginääriosaa eli reaktanssi on nolla ja piirissä kulkevaa virtaa vastustaa vain impedanssin reaaliosa eli resistanssi. [8, s. 246 – 247.]

Induktanssin luoma positiivinen reaktanssi ja kapasitanssin luoma negatiivinen reaktanssi kumoavat toisensa seuraavasti:

$$Z = R + j(X_L - X_C)$$

$Z$  on impedanssi

$R$  on resistanssi

$j$  on imaginääriyksikkö

$X_L$  on induktiivinen reaktanssi

$X_C$  on kapasitiivinen reaktanssi

Kuten yhtälöstä voidaan päätellä viritetyssä piirissä virtaa vastustaa vain resistanssi, jota esiintyy mm. johtimien, liittimien ja työkelassa olevan kuparin johdosta.

Piirin viritystä varten tarvitaan työkelan induktanssin ja kompensointikondensaattorin kapasitanssi. Työkelan induktanssi voidaan laskea yhtälöllä:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

$L$  on kelan induktanssi

$\mu$  on permeabiliteetti

$N$  on kierrosten lukumäärä

$A$  on kelan pinta-ala

$l$  on kelan pituus

Tyhjän työkelan permeabiliteettina voidaan käyttää tyhjiön permeabiliteettia eli  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m.

Kompensointikondensaattorina työssä käytettiin WIMA FKP 1, jonka jännitekesto on vaihtovirralla 600 V ja kapasitanssi 0,22  $\mu$ F. Kondensaattori asetettiin toroidimuuntajan ensiöpuolelle ja valittiin niin, että resonanssitaajuus olisi arvioidun työkelan induktanssin kanssa muutama kymmenen kilohertsiä. Kun sekä induktanssi että kapasitanssi tunnetaan, voidaan laskea piirin resonanssitaajuus seuraavasti:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$f$  on resonanssitaajuus

$L$  on kelan induktanssi

$C$  on kondensaattorin kapasitanssi

Kun lasketulla resonanssitaajuudella syötetään virtaa työkelaan, ainoastaan resistanssi vastustaa virran kulkua ja reaktanssin vaikutus saadaan eliminoitua. Tällöin piirissä saadaan kulkemaan suurin mahdollinen virta, muodostuu suurin mahdollinen magneettikenttä ja saadaan aikaan suurin mahdollinen kuumennusteho kappaleeseen.

Piirin kapasitanssi pysyy lähes samana, mutta induktanssi muuttuu, kun työkappale tuodaan työkelan sisälle. Näin tapahtuu koska työkappaleella on eri permeabiliteetti kuin tyhjiöllä. Tällöin resonanssitaajuutta pitäisi pystyä säätämään, jotta työkelassa kulkeva virta ei laskisi muuttuvan reaktanssin johdosta. Tämän takia tarvitaan ohjauselektroniikkaa säätämään resonanssitaajuus kohdalleen.

Koska kondensaattorin läpi tulisi kulkemaan parhaalla mahdollisella teholla satoja ampeereita, se ei kestäisi sille kohdistuvaa lämpörasitusta. Tämän takia kondensaattori asetettiin toroidimuuntajan ensiö- eli korkeajännitepuolelle. Tällöin ei tarvita suurta virrankestoja vaan jännitekestoja. Tällaisia kondensaattoreita on helposti saatavilla. Kun kondensaattori siirretään ensiöpuolelle, pitää ottaa tietysti huomioon toroidimuuntajan muuntosuhteen vaikutus resonanssipiirin kapasitanssiin. Häviöt voivat myös olla suuremmat, johtuen toroidimuuntajan yli hyppivästä työkelan ja kondensaattorin välillä värähtelevästä loistehosta.

### 3.6 Työkela

Helpon saatavuuden, muokattavuuden ja jäähdytyksen toteuttamisen takia työkela valmistettiin halkaisijaltaan 4,75 mm:n kuparisesta jarruputkesta. Kelan päälle asetettiin lasikuidusta valmistettu suojasukka, jonka tarkoitus on estää työkappaletta oikosulkemasta kela ja toteuttaa kosketussuojaus.

Koska työkela on valmistettu kuparista, on sillä ominaisresistanssia ja läpi kulkeva virta aiheuttaa siinä tehohäviöitä. Nämä häviöt ilmenevät lämpönä ja voidaan laskea soveltamalla Joulen lakia ja ominaisvastuksen yhtälöä:

$$P = UI = RI^2$$

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

$P$  on teho

$U$  on jännite

$I$  on virta

$R$  on resistanssi

$\rho$  on ominaisvastus eli  $0,0168 \cdot 10^{-6} \Omega \text{m}$

$l$  on johtimen pituus

$A$  on johtimen poikkipinta-ala

Edellä mainitun kupariputken seinämänpaksuus on 1,2 mm, eli sen poikkipinta-ala on noin  $13,4 \text{ mm}^2$ . Kupariputkea käytettiin noin puoli metriä, joten siinä aiheutuvat lämpöhäviöt lasketaan edellä lasketun virran avulla seuraavasti:

$$P = \frac{I^2 \rho l}{A} = \frac{(272 \text{ A})^2 * 0,0168 \cdot 10^{-6} \Omega \text{m} * 0,5 \text{ m}}{13,4 \text{ mm}^2} \approx 46 \text{ W}$$

### 3.7 Jäähdytysjärjestelmä

Lämpöhäviöiden takia työkelaa tulee jäähdyttää, mikä toteutettiin työkelan sisällä virtaavalla vesikierrolla. Työkelan voi myös tarvittaessa vaihtaa, mikä onnistuu laitteen ulkopuolelle olevilla liitoksilla. Näin laitteeseen voidaan tarvittaessa kytkeä jatkokaapeli, jolloin laite soveltuu hyvin autokorjaamokäyttöön. Kaapelin häviöt tulee ottaa huomioon, ja ne lasketaan edellä olevien yhtälöiden avulla. Jatkokaapelia käytettäessä myös ulostuhotehoon tulee kiinnittää huomiota, jotta vältetään kaapelin liialliselta kuumenemiselta.

Jäähdytys toteutettiin myös IGBT-moduuleille, joiden alla käytettiin vesikierrolla jäähdytettyjä alumiinielementtejä. IGBT-moduuleissa lämmöksi muuttunut teho voidaan laskea aikaisemmin esitetyllä yhtälöllä.

Sekä IGBT-moduuleille että työkelalle suunniteltiin erilliset jäähdytyspiirit omilla pumpuilla. Näin huomioidaan piirien erilainen virtausvastus ja jäähdytys saadaan tehokkaammaksi. Järjestelmässä virtaava tislattu vesi pumpataan vesisäiliöstä laitteen takana olevalle jäähdytyskennolle ja IGBT-moduulien alla oleville jäähdytysselementeille ja työkelalle. Ilmaa jäähdytyskennon läpi puhaltaa kolme 120 mm:n suuruista tuuletinta.

### 3.8 Kytkentäkaavion ja piirilevyn suunnittelu ja valmistus

EAGLE-piirilevynsuunnitteluohjelmistoa käyttämällä suunniteltiin induktiokuumentimen kytkentäkaavio ja toteutettiin piirilevyn suunnittelu. EAGLEn CAM PROSESSORilla luotiin piirilevystä Excellon- ja Gerber-tiedostot, joiden avulla piirilevy jyrsittiin tarkoituksen mukaisella LPKF Protomat S62 -piirilevyjyrsimellä. Kuvassa 7 näkyy jyrsitty ohjauselektronikan ja H-sillan piirilevy.



Kuva 7. Ohjauselektroniikan ja H-sillan piirilevyt

### 3.9 PID-säätö

#### 3.9.1 PID-säädin

PID-säädin on säätötekniikassa käytettävä perussäädin. Se sisältää suoran ohjauksen P (Proportional), integroinnin I ja derivoinnin D, joista myös säätimen nimi tulee. [2, s. 68.]

Säädin toimii takaisinkytkennän periaatteella, eli se ottaa näytteitä säädettävästä arvosta. Näitä näytteitä verrataan haluttuun arvoon ja lasketaan niiden erotus eli virhe. Tämä virhe pyritään saamaan nollaan ohjaamalla säädettävään arvoon vaikuttavia arvoja edellä mainittujen kolmen ohjaustavan mukaan. Kun virhe on nolla, säädettävä arvo vastaa haluttua arvoa.



### 3.9.2 Mikrokontrollerin ohjelmointi

PID-säädön toteutus ja kuumentimen ohjauselektronikan hallinta toteutettiin AVR:n valmistamalla ATMEGA8 mikrokontrollerilla, jonka ohjelmoinnissa käytettiin WinAVR-ohjelmointiympäristöä. Koodi sisältää myös lämpötilan, tehon ja virran tulostuksen LCD-näytölle (kuva 8), jota ohjataan I2C-väylän kautta säästäten mikrokontrollerin I/O-pinnejä.



Kuva 8. LCD-näyttö

Mikrokontrollerin on tarkoitus estää TL494-piiriltä lähtevä signaalin kulku IGBT-moduuleille, jos etupaneelissa tai jatkokaapelissa oleva kytkintä ei paineta. Kun kytkintä pidetään painettuna, pääsee ohjaussignaali kulkemaan IGBT-moduuleille ja näin työkelassa alkaa kulkea vaihtovirtaa.

Mikrokontrolleri havaitsee IGBT-moduuleille menevässä virtakiskossa oleva Hall-anturin ACS758-LCB-050B avulla läpi kulkevan virran ja PID-säädön avulla korjaa taajuutta niin että läpikulkeva virta on mahdollisimman suuri tai säädetyn tehon mukainen. Mikrokontrolleri suorittaa kyseisen korjauksen lähettämällä SPI-väylän kautta viestin digitaaliselle potentiometrille MCP41010, joka on yhteydessä TL494-piirin RT-pinniin ja voi näin vaikuttaa käytettävään taajuuteen.

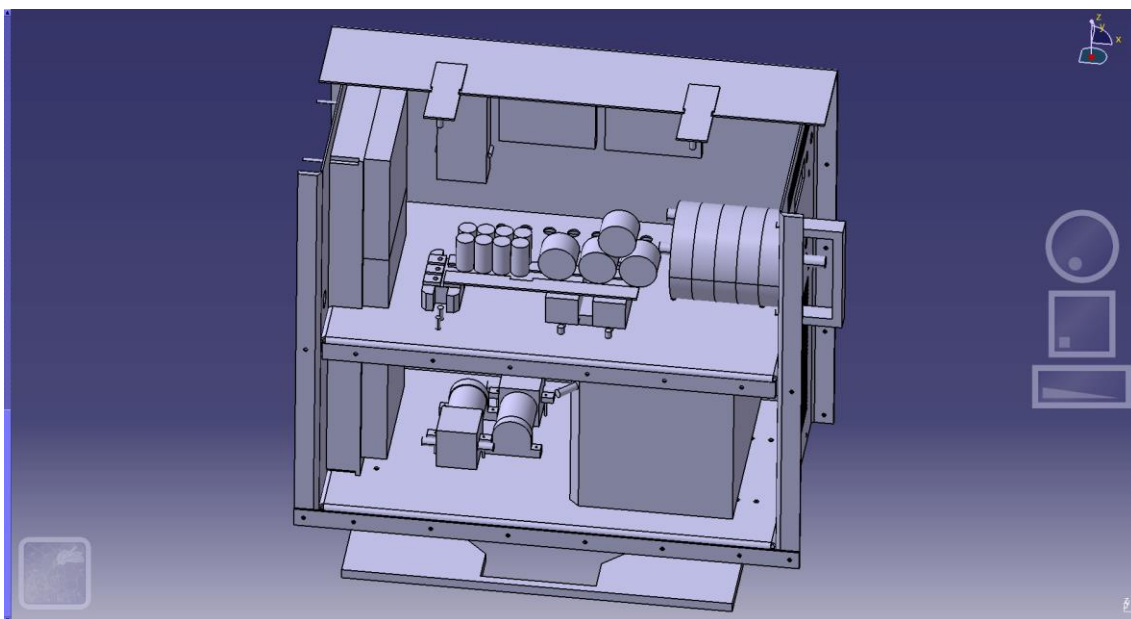
Tämä säätö toistuu kokoajan, joten kun työkelaan tuodaan lämmitettävä kappale, säätyy taajuus automaattisesti ja saavutetaan suurin mahdollinen tai säädetyn tehon mukainen virta sekä haluttu kuumennusteho.



### 3.10 Kotelon valmistus ja 3D-malli

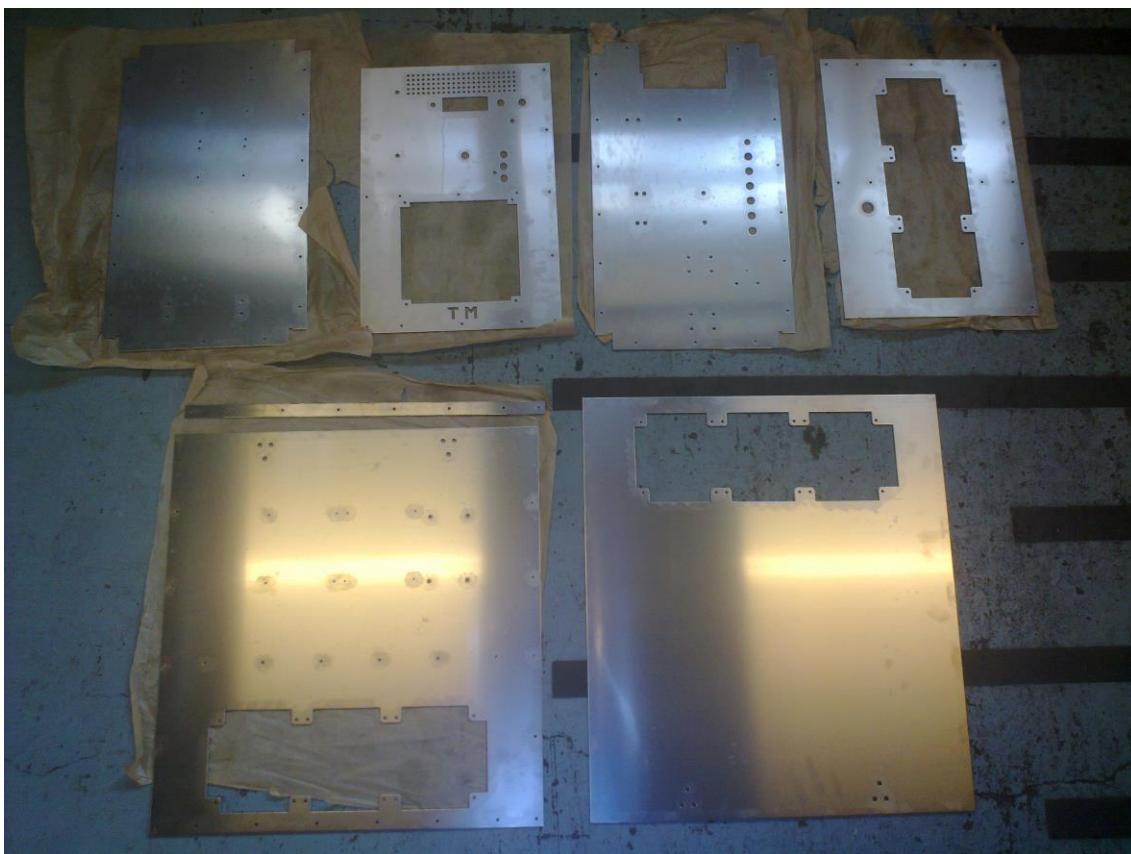
Kotelon valmistus aloitettiin luomalla kotelosta 3D-malli CATIA-mallinnusohjelman avulla. Ensin mallinnettiin toimintojen kannalta kriittiset komponentit, kuten IGBT-moduulit, jännitekiskot ja diodisilta. Tämän jälkeen luotiin kokoonpano ja alettiin mallintaa ohutlevyistä kotelo komponenttien ympärille. Kun kotelo oli koottu ohutlevyistä, mallinnettiin halutut lisäkomponentit, joille tarvittiin kiinnityspisteet kuten ohjauselektronikan osat, jäähdytysjärjestelmät osat ja työkelapiiri.

Mallin avulla saatiin hyvä käsitys tarvittavan kotelon koosta ja siitä kuinka komponentit kannattaa sijoittaa koteloon järkevästi. Myös kotelon mittojen suunnitteleminen ja muokkaaminen ennen valmistusta on yksinkertaista. Malli antaa hyvää tietoa valmiista laitteesta, sen viemästä tilasta ja komponenttien tilankäytöstä. Lisäksi voidaan mallintaa tarvittavat poraukset ja leikkaukset esimerkiksi jäähdytyslinjoille ja sähköjohdoille. Kuva 10 esittää 3D-mallia.



Kuva 10. 3D-malli

Kotelon osista voidaan helposti luoda työpiirustukset, joiden avulla osat pystytään valmistamaan. Työn osat valmistettiin levykeskuksessa lävistämällä (kuva 11), minkä jälkeen ne särmättiin muotoonsa. Osat ruiskumaalattiin pintapuolelta epoksipohjamaalilla ja punaisella ja mustalla akryylipintamaalilla.



Kuva 11. Levytyökeskuksessa valmistetut osat

Kotelo ennen ja jälkeen maalauksen näkyy kuvassa 12. Kotelon mitoituksi tulivat pituus 524 mm, leveys 268 mm ja korkeus 445 mm. Kotelon tuuletusaukot oli ensin tarkoitus toteuttaa 4 mm reikien avulla, jotka ovat 5 mm päässä toisistaan. Tällaisia osia ei kuitenkaan onnistuttu työstämään levytyökeskuksessa, koska osat eivät pysyneet enää tasaisina. Lopulta päädyttiin käyttämään tuulettimien ritilöitä reikien korvikkeina.



Kuva 12. Kotelo ennen ja jälkeen maalauksen



## 4 Toteutus

### 4.1 12 V:n malli

Ennen kolmivaihemallin toteutusta rakennettiin ja testattiin suunniteltua piiriä pienellä jännitteellä eli noin 12 - 30 voltilla. Näin voitiin todeta piirin ja teorian toimivuus turvallisesti. Tässä piirissä käytettiin neljää HGTC30N60B3D IGBT:tä, joita jäähdytettiin passiivisilla jäähdytysraudoilla. IGBT:t muodostavat H-sillan, jota ohjataan MOSFET-ajureilla ja TL494-piirin tuottamalla signaalilla. Piirin oskillaattoritaajuutta säädetään potentiometrin avulla. Kuvasta 13 nähdään valmis 12 V:n mallin toteutus.



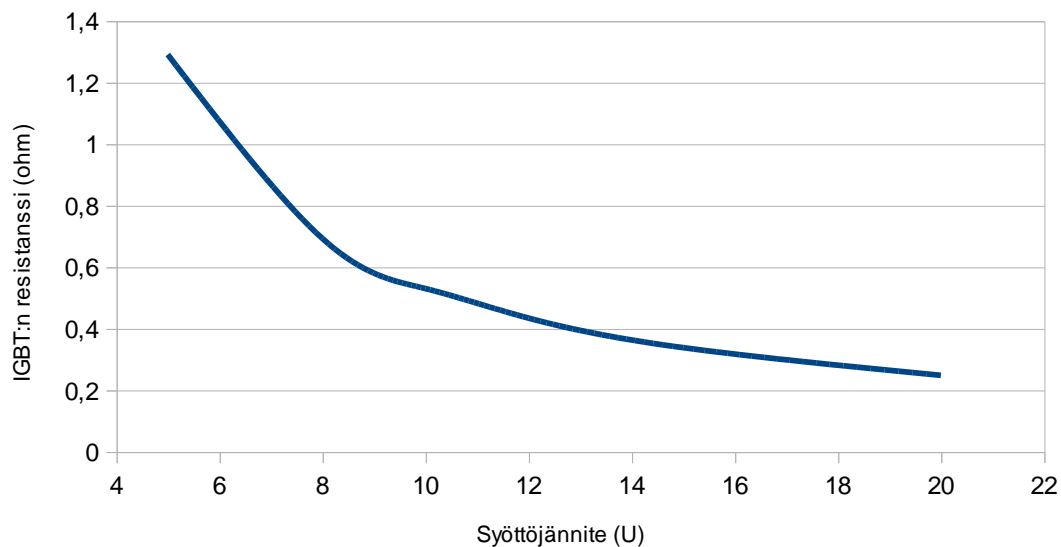
Kuva 13. 12 V:n mallin toteutus

12 V:n mallilla saatiin aikaan hyviä tuloksia ja voitiin todeta piirin ja teorian toimivuus. Toroidimuuntajan muuntosuhteella 7:1 saatiin parhaat tulokset. Mallilla onnistuttiin mm. kuumennettua ruuvi punahehkuseksi, mikä näkyy kuvassa 14.



Kuva 14. Kuumennettu ruuvi

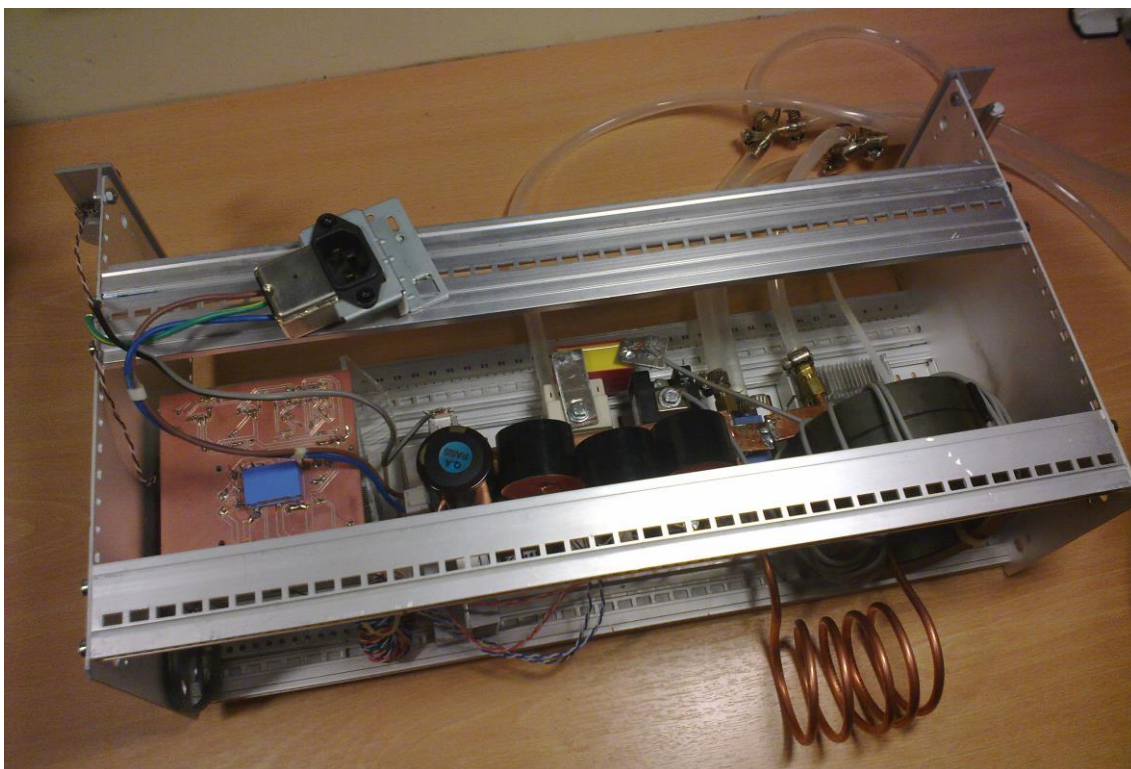
Pienellä jännitteellä piirissä käytettyjen IGBT:iden sisäiset resistanssit kuitenkin rajoittavat niiden läpi kulkevaa virtaa, mikä näkyy taulukosta 1. IGBT:n kollektorin ja emitterin välinen saturaatiojännite on lisäksi suurehko verrattuna käyttöjännitteeseen, mikä rajoittaa maksimitehoa. Ratkaisu tähän ongelmaan on jännitteen nostaminen. Resistanssin johdosta työkelalle ei saada tarpeeksi virtaa isojen kappaleiden kuumentamiseen ja malli vaatii ison muuntajan. Näistä syistä malli ei ole kovinkaan käyttökelpoinen autokorjaamokäyttöön.



Taulukko 1. IGBT:n resistanssi jännitteen funktiona

#### 4.2 230 V:n malli

230 V:n malli eli 1-vaihemalli (kuva 15) toteutettiin 12 V:n mallin ohjauselektroniikkaa käyttämällä, mutta syöttövirta otettiin sähköverkosta. Tässä vaiheessa sähkötyöturvallisuus tulee jo huomioida mitatessa ja laitteeseen ei koskettu, kun jännitteet olivat päällä. Laitteen jännitteellisyyttä valvottiin kokoajan mittaamalla korkeajännitepiirin jännitettä.



Kuva 15. 230 V:n malli

1-vaihevirta tasasuunnattiin passiivisesti jäähdetyllä diodisillalla ja tasattiin 450  $\mu\text{F}$ :n suuruisella elektrolyyttikondensaattorilla, jolloin jännite virtakiskoissa on noin 300 V. Lopulta syöttövirta ohjattiin kuparikiskoilla IGBT-moduuleille, jotka syöttivät virran toroidimuuntajalle. Toroidimuuntajan muuntosuhteen käytettiin 17:1. Mallissa IGBT-moduulien ja työkelan jäähditys toteutettiin vesijäähdytyksellä.

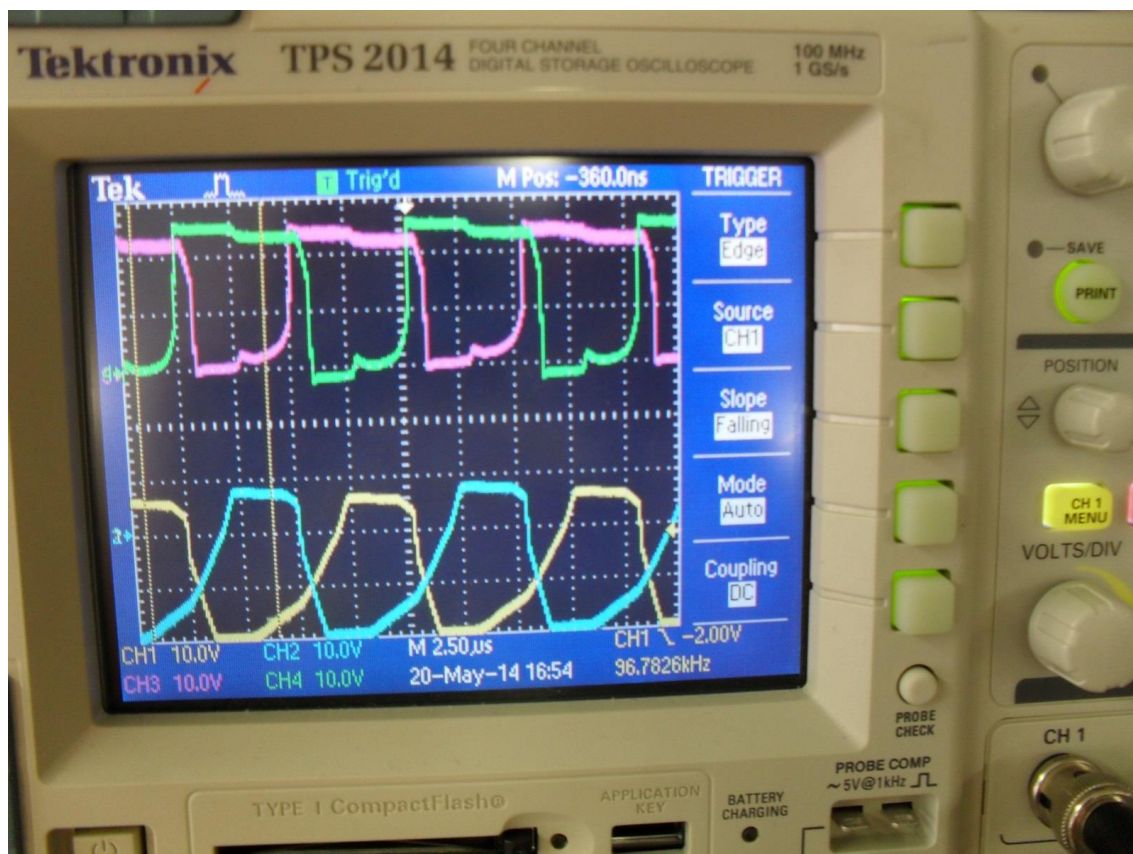
230 V:n mallilla saatiin 12 V:n malliin verrattuna enemmän virtaa työkelalle, mikä oli tavoitteena. Myöhemmissä testeissä mallin ottovirtaa vielä kasvatettiin taajuutta säätämällä. Tehon kasvattamisen seurauksena yksi IGBT-moduuleista kuitenkin aiheutti oikosulun korkeajännitepiiriin. Syy oikosulkuun oli luultavasti H-sillan IGBT:iden auki olemisen samaan aikaan, mikä sai liian suuren virran kulkemaan IGBT-moduulin läpi rikkoen sen.

Ongelman ratkaisemiseksi hiloilla olevien vastuksien resistanssia tulisi kasvattaa, jolloin IGBT:t aukeavat hitaammin. Oskilloskoopilla ja säätövastuksilla pystytään määrittämään sopivat resistanssit hiloille mittaamalla IGBT:iden auki olemista käytettävissä olevalla taajuusalueella. Säätövastukset tulee korvata lopulta kiinteillä vastuksilla tehon keston takia.



### 4.3 Kolmivaihemalli

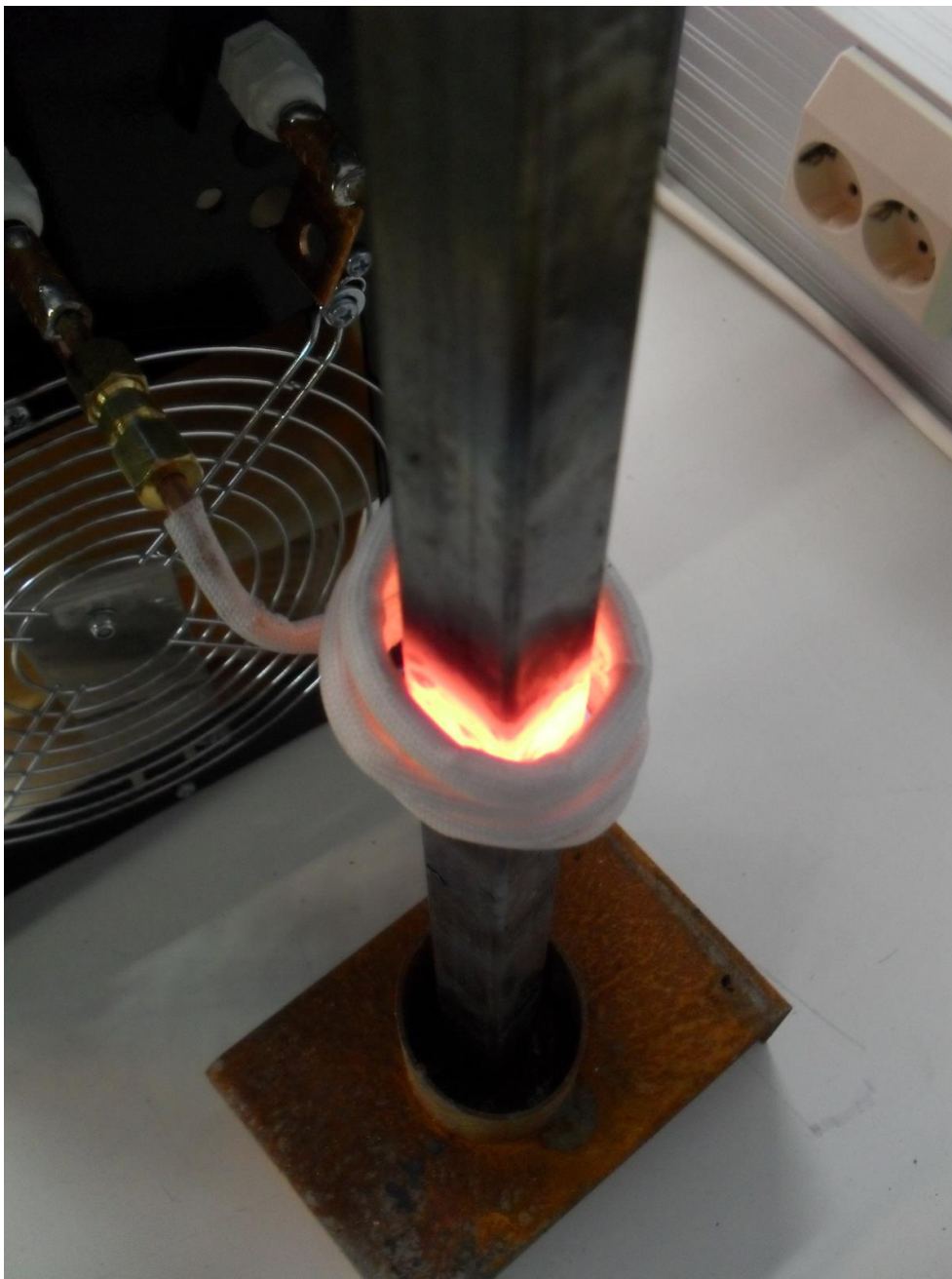
230 V:n mallin kanssa kohdatut ongelmat korjattiin asettamalla H-sillan ylempien IGBT:iden hiloille 100 ohmin vastukset. Näin IGBT:t saatiin avautumaan hitaammin ja ne eivät olleet päällä samanaikaisesti käytettävällä taajuualueella. Kuva 16 havainnollistaa IGBT:iden avautumista ja sulkeutumista pienellä jännitteellä. Kuvassa IGBT on auki, kun kollektori-emitterijännite on noin nolla voltia.



Kuva 16. Kollektori-emitterijännitteet vaaleanpunaisella ja vihreällä, hila-emitterijännitteet sinisellä ja keltaisella

Vastusten asettamisen jälkeen korkeajännitepiirin kytkennät tarkastettiin silmämääräisesti ja mittaamalla oikosulkujen varalta. Tämän jälkeen laite kytkettiin kolmivaihevirtaan. Laitteen jännitteellisyyden toteamisen jälkeen taajuutta säätämällä laitteen ottovirtaa pystyttiin lisäämään ilman oikosulkua.

Ulostulotehon määrittämiseksi mitattiin toroidimuuntajan yli olevaa jännitettä ja sen läpi kulkevaa virtaa oskilloskooppiin kytketyillä jännite- ja virta-antureilla. Jännitteestä ja virrasta saatiin laskettua ulostuloteho. Laitteen toimintaa kokeiltiin hetkellisesti 9 kW:n huipputeholla. Tällä teholla saatiin kuumennettua ontto terästanko helposti alle puolessa minuutissa punahehkuiseksi, mikä näkyy kuvasta 17.



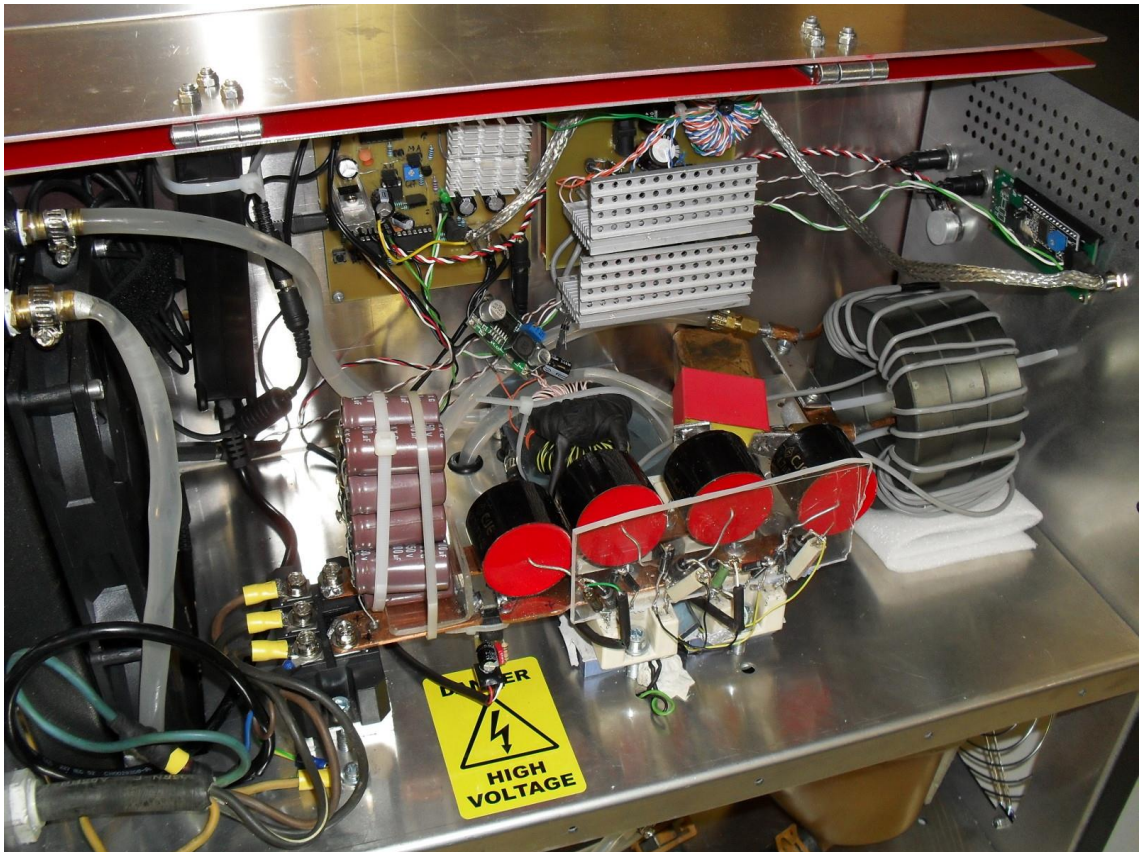
Kuva 17. Kuumennettu terästanko

IGBT-moduulien kuumeneminen oli pienempää kuin 230 V:n mallissa. Moduulien kuumenemista valvottiin lämpökameralla, mikä näkyy kuvasta 18. Lämpökameralla voidaan helposti määrittää suurin mahdollinen jatkuva teho varmistamalla etteivät käytetyt komponentit kuumene liikaa. Myös työkelan, kompensointikondensaattorin ja toroidimuuntajan kuumeneminen oli vähäistä. Kuvat 19 ja 20 esittävät valmista kolmivaihemallia.



Kuva 18. IGBT-moduulien kuumeneminen (Punainen rasti osoittaa korkeimman lämpötilan kuvaan rajatulla keskialueella.)





Kuva 19. Kolmivaihemallin komponentit



Kuva 20. Valmis kolmivaihemalli

## 5 Yhteenveto

Insinööriyössä esiteltiin induktiokuumentimen toiminta, toteuttamiseksi tarvittavat komponentit ja niistä suunnitellut kytkennät. Näitä hyödyntämällä kokeiltiin teoriaa käytännössä valmistamalla toimivia malleja, joilla teoria voitiin havainnollistaa.

Työn tuloksena saatiin toimiva sähkölaite, jonka avulla voidaan kuumentaa ja jopa sulattaa metalleja ilman fyysistä kontaktia. Toteutettu laite sopii hyvin autokorjaamokäyttöön jatkokaapelin avulla. Laitetta voidaan myös muokata muuhun käyttöön sopivia työkeloja valmistamalla. Ulostulon huipputehoksi mitattiin 9 kW, mutta laite kestää hieman suurempiakin tehoja. Mitatulla teholla komponentit eivät ylikuumeneet vesijäähdytyksen ansiosta.

Työssä opittiin paljon tehoelektroniikasta, säätötekniikasta ja ohutlevytöistä. Erityisesti työskentely suurten taajuuksien ja suurten virtojen kanssa oli uutta. Myös sähkölaitteen tuotekehitys tuli tutuksi ja se, kuinka kaikki ei aina mene suunnitellusti. Silti sekä suunnittelu että toteutus olivat mielekkäitä ja työ tarjosi haluttua haasteellisuutta.

## Lähteet

- 1 Induktiolämmitys – Wikipedia. Verkkodokumentti.  
<<http://fi.wikipedia.org/wiki/Induktiolämmitys>>. Luettu 19.3.2014.
- 2 Silvonen Kimmo 2009. Elektroniikka ja puolijohdekomponentit. Helsinki: OTATieto.
- 3 IGBT BSM 75 GB 120 DN2, IGBT Power Module. Verkkodokumentti. Siemens.  
<<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/siemens/BSM75GB120DN2.pdf>>. Luettu 5.5.2014.
- 4 TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits. Verkkodokumentti. Texas Instruments. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf>>. Luettu 24.3.2014.
- 5 TC4420 TC4429, 6A HIGH-SPEED MOSFET DRIVERS. Verkkodokumentti. Microchip. <<http://www.learn-c.com/tc4429.pdf>>. Luettu 24.3.2014.
- 6 MCP41XXX/42XXX, Single/Dual Digital Potentiometer with SPI™ Interface. Verkkodokumentti. Microchip.  
<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/11195c.pdf>>. Luettu 24.3.2014.
- 7 Designing Switching Voltage Regulators With the TL494. Verkkodokumentti. Texas Instruments. <<http://www.ti.com/lit/an/slva001e/slva001e.pdf>>. Luettu 9.5.2014.
- 8 Silvonen Kimmo 2009. Sähkötekniikka ja piiriteoria. Helsinki: OTATieto.