



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

ELEKTROENERGEETIKA JA MEHHATROONIKA INSTITUUD

# TESLA KÕRGEPIINGEGENERAATORI MODIFITSEERIMINE

Üliõpilane: Aivo Joost

Üliõpilaskood: 142919MAHB

Juhendaja: Lauri Kütt

Tallinn  
2017

# AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....” .....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....” .....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” .....201... a.

..... allkiri

TTÜ inseneriteaduskond

## **BSc LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

2017. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Aivo Joost142919

Õppekava: MAHB02/13

Eriala: Mehhatroonika

Juhendaja: professor, Lauri Kütt

Konsultandid:

### **LÕPUTÖÖ TEEMA:**

Tesla kõrgepingegeneraatori modifitseerimine

Modification of Tesla high voltage generator

**Töös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

| Nr | Ülesande kirjeldus   | Täitmise tähtaeg |
|----|--|------------------|
| 1. | Kirjanduse läbitöötamine   | Märts. 2017      |
| 2. | Loogikaskeemi ning PCB skeemi välja töötamine, simuleerimine         | Aprill. 2017     |
| 3. | Trükkplaadi tootmine, komponentide peale ühendamine                  | Mai. 2017        |
| 4. | Lõputöö kirjutamine  | Mai. 2017        |
| 5. | Lõputöö juhendajale läbilugemiseks saatmine, paranduste sisseviimine | 25.Mai. 2017     |

### **Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:**

Kuidas võiks konstrueerida ning optimeerida kõrgesageduse muunduri.

### **Täiendavad märkused ja nõuded:**

**Töö keel:** Eesti keel

Kaitsmistaoetus esitada hiljemalt

**Töö esitamise tähtaeg:** 25.05.2017

**Üliõpilane** Aivo Joost /alkiri/ .....

Kuupäev .....

**Juhendaja** Lauri Kütt /alkiri/ .....

Kuupäev .....

# SISUKORD

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.    | SISSEJUHATUS.....  | 8  |
| 1.1   | Nikola Tesla .....                                       | 9  |
| 2.    | TEOORIA.....   | 10 |
| 2.1   | Kõrgepinge.....  | 10 |
| 2.2   | Tesla kõrgepingegeneraator .....                         | 10 |
| 2.2.1 | Erinevus teistest transformaatoritest .....              | 10 |
| 2.2.2 | Lihtustatud tööpõhimõte .....                            | 11 |
| 2.3   | TTÜ Tesla kõrgepingegeneraator .....                     | 12 |
| 2.3.1 | Generaatori spetsifikatsioonid .....                     | 12 |
| 2.3.2 | Veatekke põhjused .....                                  | 13 |
| 3.    | INFOTEHNOLOOGIA.....                                     | 15 |
| 3.1   | Veatuvastus- ja veakindlusalgoritm .....                 | 15 |
| 3.2   | Falstad simulatsioonskeem.....                           | 16 |
| 3.3   | Veatuvastuse testimine .....                             | 16 |
| 4.    | ELEKTROONIKA.....  | 18 |
| 4.1   | Diptrace elektroonikaskeem.....                          | 18 |
| 4.1.1 | Toiteskeem .....   | 18 |
| 4.1.2 | H-silla skeem .....                                      | 20 |
| 4.1.3 | Loogikaskeem.....  | 21 |
| 4.2   | IGBT transistor .....                                    | 22 |
| 4.3   | FOD8333 Draiver .....                                    | 23 |
| 4.4   | PCB skeem .....  | 23 |
| 5.    | MEHAANIKA.....   | 25 |
| 5.1   | Trükkplaadi jahutus .....                                | 25 |
| 5.2   | Uuendatud jahutusradiaator.....                          | 26 |
| 6.    | Süsteemi testimine .....                                 | 29 |
| 6.1   | Süsteemi toitelülituste töö kontroll .....               | 29 |
| 6.2   | Individaalne IGBT lülitustransistoride katsetamine ..... | 30 |
| 6.3   | Juht- ja ohtusloogika kontroll .....                     | 31 |
| 6.4   | Terve süsteemi kontroll.....                             | 32 |
| 6.5   | Koormustest.....   | 32 |

|  |    |
|--|----|
| KOKKUVÕTE .....  | 33 |
| SUMMARY .....  | 34 |
| KASUTATUD KIRJANDUS .....                                  | 35 |
| LISAD .....  | 37 |
| Lisa 1. Falstad simulatsiooniskeem kahe konvertoriga ..... | 37 |
| Lisa 2. Marco Denicolai elektroonikaskeem .....            | 38 |
| Lisa 3. DipTrace elektroonikaskeem .....                   | 39 |
| Lisa 4. DipTrace PCB skeem .....                           | 41 |
| Lisa 5. Mektorys välja freesitud trükkplaat .....          | 42 |

## Lühendite ja tähiste loetelu

VDC – Alalisvool; i.k. *Voltage Direct Current*

VAC – Vahelduvvool; i.k. *Voltage Alternating Current*

LED – Valgusdiod; i.k. *Light Emitting Diode*

PCB – Trükkplaat; i.k. *Printed Circuit Board*

IGBT – Isoleeritud paviduga bipolaartransistor; i.k. *Isolated-Gate Bipolar Transistor*

BJT – Bipolaartransistor; i.k. *Bipolar Junction Transistor*

TFT LCD – aktiivmaatrikskuvar; i.k. *Thin-film-transistor liquid-crystal display*.

CAD – raalprojekteeritud; i.k. *Computer aided design*

TTÜ – Tallinna Tehnikaülikool

## EESSÕNA

Lõputöö teemal „Tesla kõrgepinge generaatori modifitseerimine“ sündis vajadusest parandada Tallinna Tehnikaülikoolile kuuluv riknenud Tesla kõrgepinge generaator.

Eesmärgiks on panna töötama masin, millega saab läbi viia demonstratsioone kõrgepinge töötamisest ning olemusest. See omakorda kutsub noori tulevikus õppima elektrotehnikaga seotud õppealasi.

Konsultatsioonide ja nõustamise eest soovib lõputöö autor tänada enda juhendajat professor Lauri Kütti.

# 1. SISSEJUHATUS

Tesla kõrgepingegeneraator on masin millega on võimalus luua erakordseid efekte. Genereerides kõrgepinge pulsse mitme megavoldise amplituudiga emiteerub väljavool mis võib olla mitme meetri pikkune, enda olemuselt meenutab see naturaalselt äikest [4].

Tesla kõrgepingegeneraator on teadlastele tuntud juba veidi üle sajandi ning see on kasutusel tänapäevani.

Käesoleva töö eesmärk luua Tallinna Tehnikaülikoolis olevale generaatorile prototüüplahendus koos vajalike muudatuste ning modifikatsioonidega, et viia antud masin tööolukorda.

Töö teeb vajalikuks fakt, et lõputöö teostamise hetkel puudus TTÜ-l töötav Tesla trafo millega saab noortes tekitada huvi elektrotehnika vastu näidates neile demonstratsioone kõrgepinge olemusest.

Töö eesmärgi saavutamiseks püstitati järgmised ülesanded:

- 1) Leida Tesla trafo rikke oleku põhjus
- 2) Teostada optimaalne lahendus leitud probleemile, et vältida selle kordumist tulevikus.
- 3) Valida õiged parameetrid, elemendid ning teha elektroonikaskeem.
- 4) Viia leitud optimaalne lahendus füüsilisse vormi prototüübina.
- 5) Testida prototüüplahendust.

Töö on jaotatud viieks peatükiks. Esimeses peatükis kirjeldatakse 2001 aastal konstrueeritud Tesla trafo parameetreid, üldist teooriat ning rikke põhjust. Teises peatükis pakutakse välja infotehnoloogia põhine probleemi lahendus mis koosneb algoritmis, loogikasimulatsioonist ning mikrokontrolleriga testimise kirjeldusest. Kolmandas peatükis käsitletakse antud töö elektroonilist poolt, see koosneb erinevate skeemide koostamisest ning põhiliste komponentide kirjeldusest. Neljas osa on pühendatud antud lõputöö mehaanilisele lahendusele, mehaaniliste parameetrite kirjeldusele ning arvutustest. Viimases osas kirjeldatakse valmistatud süsteemi testimist ning testi edukaks läbimiseks vajaminevaid parameetreid.

Tööl on viis lisa kuhu lisati autori poolt koostatud loogika simulatsiooniskeem, elektroonikaskeem, PCB skeem, varasema töö autori poolt tehtud elektroonikaskeem ning pilte välja freesitud trükkplaadist.

Mehaanilised 3D detailide modelleerimiseks kasutati CAD SolidWorks 2017 tarkvara. Elektroonikaskeemide ja PCB skeemide tegemisel kasutas autor DipTrace tarkvara. DipTrace tarkvaras konverteeriti PCB skeem .dxf formaati ning freesiti antud skeem välja TTÜ Mektorys kasutades LPKF S63 prototüüpide masinat.



Mikrokontrollerina kasutati MEGA Atmega 2560 arendusplaati millel on sisseehitatud Atmel ATmega2560 mikrokontroller ning USB-UART liidesega mikrokiip CH340G. Mikrokontrolleri liidesena kasutati puutetundliku TFT LCD 2.8" ekraani.

## 1.1 Nikola Tesla

Nikola Tesla oli serbia päritolu leiutaja, elektri- ja mehaanikainsener ning füüsik, kes töötas Ameerika Ühendriikides[1].

Teslat peetakse üheks tähtsamaks panustajaks elektri kasutuselevõttu ärilisel eesmärgil. Samuti on märkimisväärsed paljud tema edasiarendused elektromagnetismi vallas 19. sajandi lõpus ja 20. sajandi alguses. Tesla patendid ja teoreetiline töö on aluseks nüüdisaegsetele vahelduvvoolu elektrienergia süsteemidele, mille hulka kuuluvad ka mitmefaasiline elektrijaotuse süsteem ja vahelduvvoolu elektrimootor [2].

Mehe üheks tuntuimaks leiutiseks oli Tesla trafo ehk Tesla kõrgepingegeneraator. Originaal nimega „Apparatus for transmitting electrical energy“ tema 1914 aasta patendis [Tes 14] oli loodud elektrilise energia juhtmevabaks üleminekuks. See masin lõi aluse juhtmevabale tehnoloogiale. Tänapäeval kasutatakse Tesla trafot raadioside tehnoloogias[4].

## 2. TEOORIA

### 2.1 Kõrgepinge

Termin kõrgepinge on mitmesti mõistetav. Tavaliselt mõeldakse selle all elektripinget mis on võimeline vigastama elusorganismi. Kuna sellisel definitsioonil puudub numbriline spetsifikatsioon tuleb kasutusele võtta veel üks termin. Kõrgepinge on pingepiirkond, mille korral pinge on normaaltalitusel vahelduvpinge puhul suurem kui 1000 volti ja alalispinge puhul suurem kui 1500 volti. Kõrgepinget tähistatakse tähisega HV ingliskeelse termini *high voltage* järgi [17].

Kõrgetel pingetel muutub ka meid ümbritsev atmosfäär elektrit juhtivaks. Õhu dielektrilise läbilöögipinge tugevus kahe kera kujulise elektroodi vahel on umbes 33kV/cm. See võib muutuda vastavalt elektroodi suurusele ning kujule [16].

### 2.2 Tesla kõrgepingegeneraator

#### 2.2.1 Erinevus teistest transformaatoritest

Tesla transformaator töötab traditsioonilisest transformaatorist teisiti. Tavalises transformaatoris on juhtmekeerud väga tihedalt üksteisega seotud ja pinge muundumine sõltub keerdude arvust. See moodus toimib madalatel pingetel, kuid kõrgetel pingetel kahe keerukomplekti isolatsioon katkeb. See omakorda ei lase rauatuumalistel transformaatoritel töötada kõrgetel pingetel kahju tekitamata[4].

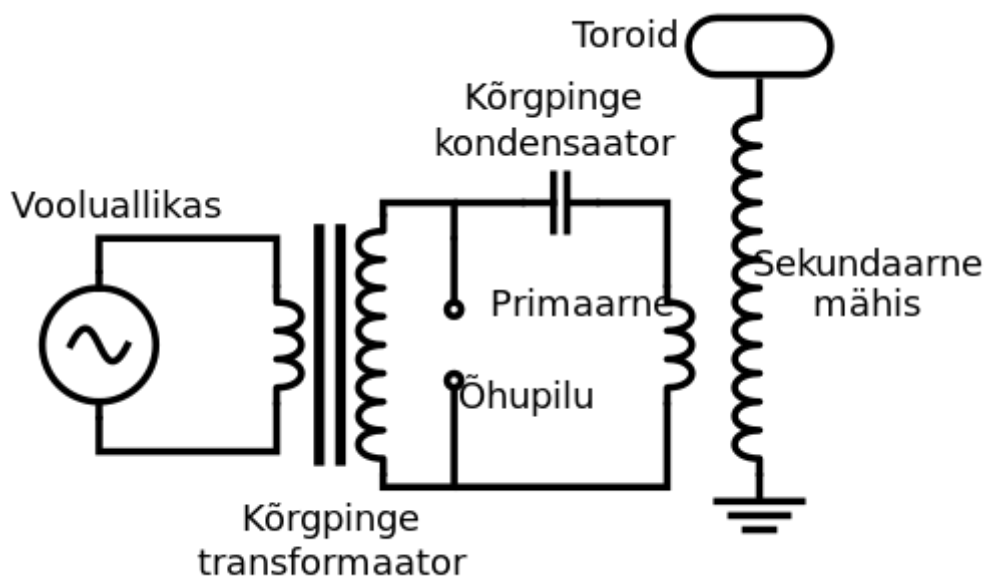
Erinevalt tavapärastest transformaatoritest on Tesla trafo keerud nõrgalt seotud. Nende vahel on suur õhuvahe, seega primaar- ja sekundaarmähis jagavad ainult 10–20% üksteise magnetväljadest. Tiheda siduvuse asemel kandub energia üle ühelt resonants vooluringilt teisele üle mitme raadiosagedustsükli. Üldiselt on primaarmähise ümber 5 kuni 20 paksust vasejuhtmest koosnevat keerdu tekitades väga väikese takistuse[4].

## 2.2.2 Lihtustatud tööpõhimõte

Tesla transformaatorit on võimalik ehitada kasutades vaid mõningaid põhikomponente. Trafo mis genereerib seinavoolust kõrge pinge, tavaliselt 5kV kuni 30kV, laeb kõrgepinge kondensaatorit läbi primaarse mähise [4]. Kui kõrgepinge kondensaator on laetud täis, muutub õhupilu potentsiaal piisavalt suureks, et hakata läbi laskma voolu. Samal ajal kui pilu voolu läbi laseb, on kondensaator paralleelselt ühendatud primaarsesse mähisesse kus tekib mahalaeng. Kondensaator ning mähis tekitavad parralleelse resonants vooluringi, mille resonantssageduse määravad kondensaatori ja induktsooni väärtused.

Primaarse mähise poolt tekitatud magnetväli kandub osaliselt edasi sekundaarsesse mähisesse. Sekundaarne mähis on moodustatud umbes 1000 õhukesest vasejuhtme keerust mille otsa on ühendatud toroidi kujuline terminaal, mille mahtuvus on üldiselt 15 kuni 30 pF. Sekundaarne mähis ja toroid moodustavad resonants vooluringi. Kui moodustatud vooluringi resonantssagedus on lähedane primaases mähises olevale vooluringile, siis tekib toroidi väga kõrge potentsiaal.

Kuna see potentsiaal võib lihtsalt ulatuda 100kV kuni mitme MV, siis see tavaliselt on piisav, et murda õhu dielektriline läbitavus väljastades juhtuva elektrinoole. Kui kõrgepinge kondensaator on ennast tühjaks laadinud, lõpetab õhupilu voolu läbilaskmise ning algab protsess uuesti [12].



Sele 2.2.2.1 Tesla kõrgepingegeneraatori põhiline skemaatiline diagramm.

## 2.3 TTÜ Tesla kõrgepingegeneraator

### 2.3.1 Generaatori spetsifikatsioonid

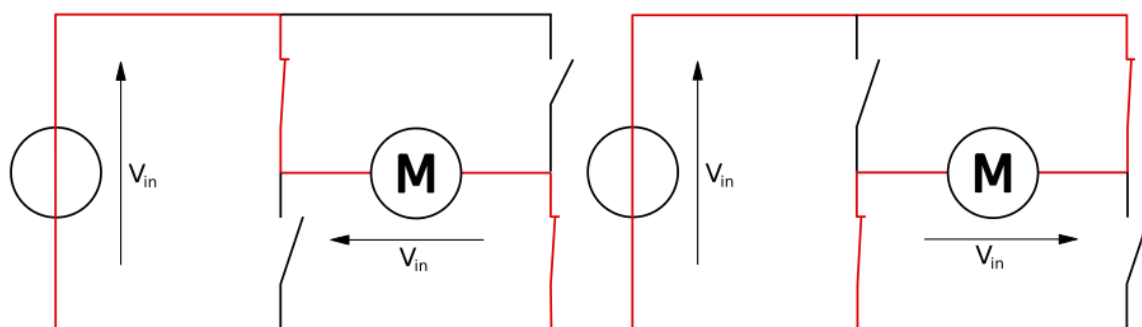
Tallinna Tehnikaülikool soetas endale Tesla transformaatori, mille ehituse on põhjalikult üles dokumenteerinud Helsinki Tehnikaülikooli professor Marco Denicolai.

Ehitatud sai keskmise suurusega Tesla trafo kasutades ligikaudseid ja empiirilisi disaini valemeid. Aparaat valmis 3 meetri kõrgusena ning ruutmeetri suuruse alustoeaga. Pärast kokupanekut mõõdeti ning kalkuleeriti iga komponendi väärtused [4].

Saadud väärtustega võis jääda rahule. Kõige suurem viga esines sekundaarses resonantssageduse arvutamisel, selleks oli 11%, samal ajal kui primaarse mähise induktsioon erines 4% oodatud väärtusest [4].

Primaarse kondensaatori laadimiseks loodi tavalise transformaatori asemel eraldi 20kV pinget, 5kW võimsusega ning 500 Hz pulsisagedusega kõrgsagedusmuundur [4]. Jadamisi ühendatud resonantsahel on efektiivne 0,1 uF mahtuvusega primaarse kondensaatori laadimisel tänu oma sisemisele lühiste tolerantsile. Muunduri loomise peamiseks põhimõtteks oli ruumi ning kokkuhoid, tahti luua võimalikult kompaktset süsteemi [4].

Kõrgsagedusmuundur töötab elektroonikas tuntud H-silla elektroonikalülituse printsiibi põhimõttel. H-sild võimaldab rakendada seadmele või koormisele pinget mõlemas suunas. Üldiselt kasutatakse selliseid lülitusi alalisvoolumootorite mõlemas suunas käima panemiseks [13].



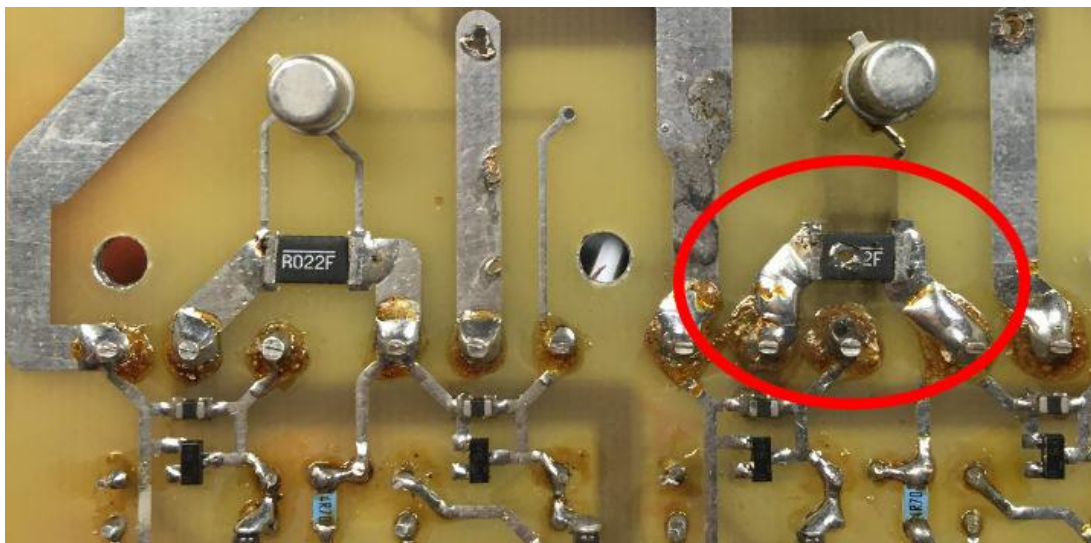
Sele. 2.3.1.1 Kaks tavalist H-silla olekut.

Muunduri puhul on mootori asemel transformaator ning lülititena kasutatakse transistore. Sellisel viisil luuakse tehnikul viisil alalisvoolust uue sagedusega vahelduvvool. Kuna selline muundurloob vahelduvvoolu sisendpingest 400V väljundpinge 5kV, on vaja ühendada muundureid jadamisi 4 tükki, et saavutada kogupinge 20kV [4].

## 2.3.2 Veatekke põhjused

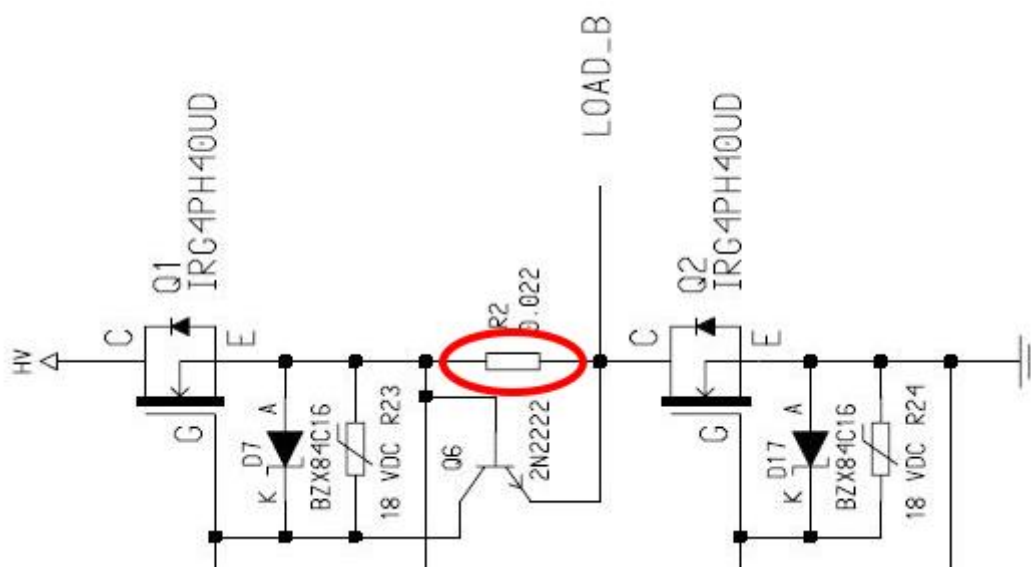
Tallinna Tehnikaülikooli saabunud Tesla kõrgepingegeneraator oli lõpetanud töötamise. Esimeseks ülesandeks oli autoril leida sellele põhjus.

Pärast mõningat inspekteerimist sai ilmseks, et viga esines primaarse kondensaatori laadimiseks loodud kõrgepinge muunduris. Võttes välja ühe muunduri trükkplaadi oli näha läbipõlemisjälgi (Sele 2.3.2.1).



Sele 2.3.2.1 Lämpõlenud trükkplaat.

Pildilt on näha, et läbipõlenud element kannab nime „R022F“. Vaadates M.Denicolai poolt tehtud elektroonikaskeemi, leiti, et läbipõlenud element on takisti 0.0022Ω takistusega.



Sele 2.3.2.2 Lämpõlenud takisti M.Denicolai elektroonikaskeemis.

Kõrgete pingeresonantside puhul tuleb tihtipeale ette eriolukordi, kus võib pinge muutuda ettenägematult kõrgeks. Sellisteks olukordadeks oli Soome inseneri tehtud elektroonikaskeemis valmistatud vaid osaliselt. Mees on lisanud transistori mis liigse IGBT emitteri pinge puhul avaneb ning vooluringi läbi IGBT katkestab. Sellise lahenduse nõrkadeks külgedeks on:

- 1) Kuna M.Denicolai poolt lisatud transistor avaneb alles pärast emitterilt tulnud liigset voolu, siis vähemalt üks kõrgepinge impulss läbib IGBT ning ülejäänud komponendid.
- 2) Sellises lahenduses puudub kaitse pidevalt võnkuvale emitterist tulevale liigsele kõrgepingele. Kui liigne kõrgepinge kaob, jätkab IGBT koheselt enda tegevust.
- 3) Puudub muundurite ühine väljalülitumine veaolukorras. Kui ühe muunduri IGBT seiskab töötamine, siis töötavad teised muundurid siiski edasi.
- 4) Liigsete emitterist tulenevate voolupingete korral seiskavad oma töö vaid kaks transistori neljast.

Tulenevalt Soome inseneri lahenduses esinevatest nõrkadest kohtadest lõputöö autori eesmärgiks leida ning teostada optimeeritud lahendusega kõrgsageduse muunduris kasutatav trükkplaat.

### 3. INFOTEHNOLOOGIA

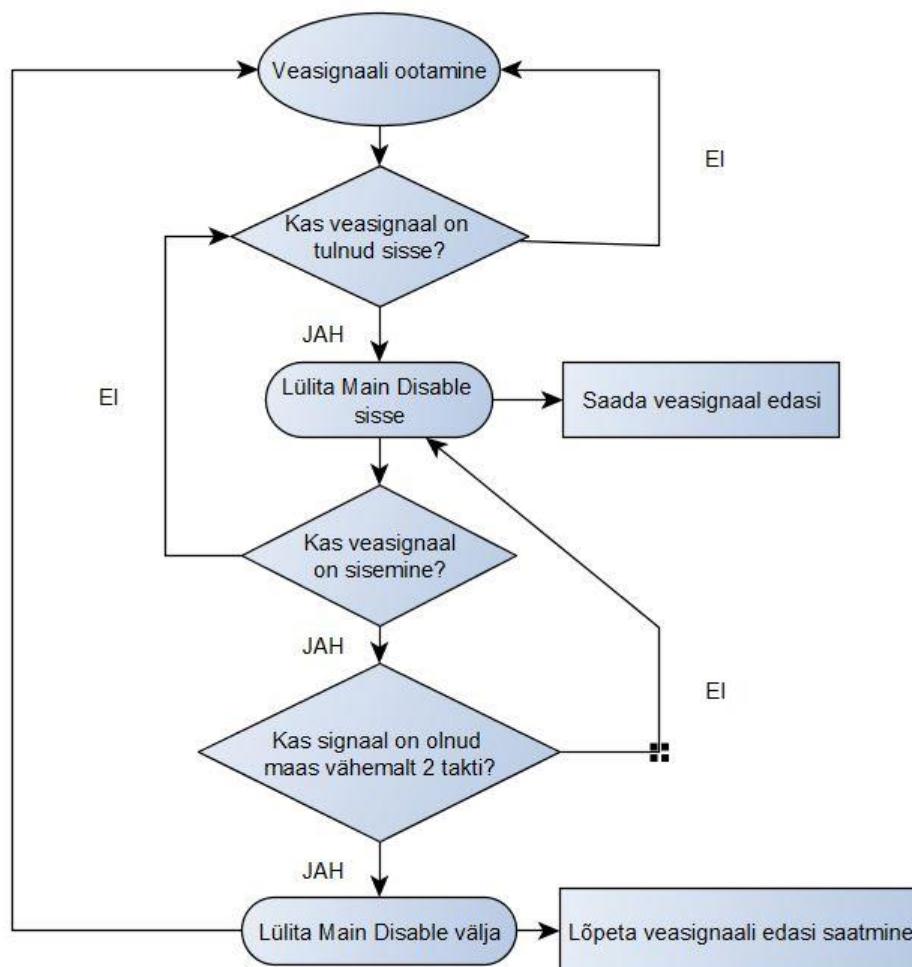
#### 3.1 Veatuvastus- ja veakindlusalgoritm

Optimeeritud lahendusega trükkplaat vajab paremat käsitlust pingeresonantsidest tingitud ohtlikest olukordadest. Sellejaoks on vaja luua loogikal põhinev veaolukorraga käituv printsip.

Esmalt alustati algoritmi koostamisest. Veatuvastus algoritmi disainimisel kasutati yEd Graph Editor tarkvara. Põhilisteks soovideks veatuvastusel olid:

- 1) Veatuvastusel lülitusid välja kõik 4 toiteallikat.
- 2) Vea signaali kadumisel lülitusid kõik 4 toiteallikat üheaegselt sisse.
- 3) Pideva muunduri sisse-välja lülituste vältimiseks peab olema sisemine veasignaali väljas olnud minimaalselt 2 takti enne voolu uuesti läbi laskmist.

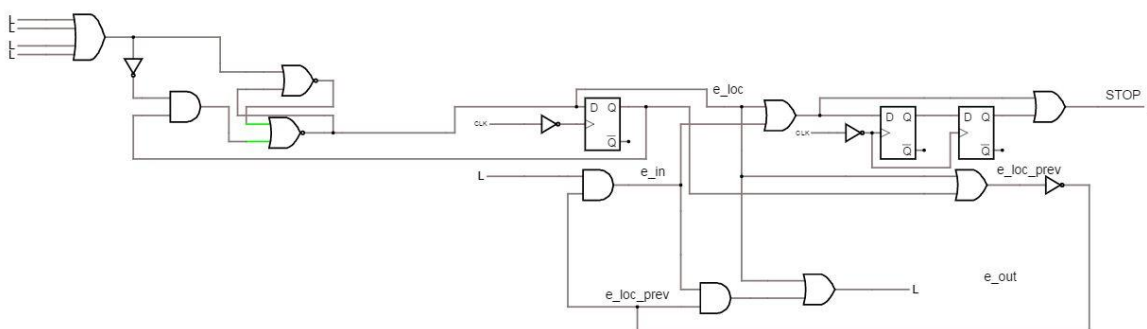
Pidades meeles eelnevalt välja toodud soove loodi järgnev algoritm (Sele 3.1.1).



Sele 3.1.1 Fault algoritm.

## 3.2 Falstad simulatsioonskeem

Pärast veatuvastus algoritmi loomist oli vaja antud algoritm viia füüsilisele kujule. Selle loomiseks otsustati kasutada loogikaelemente. Loogikatehete koostamiseks ning simuleerimiseks kasutati Falstad simulatsioonikeskkonda. Antud tarkvara valimis põhjuseks oli varasem kokkupuude Tallinna Tehnikaülikooli õppeaines „Arvutid I“. Samuti on see keskkond lihtsasti kättesaadav, ei vaja tarkvara allalaadimist ning omab võimalust skeemide simuleerimiseks. Loogikaskeemis kasutatavad elemendid: OR, NOR, AND, INV, NAND, D Flop-Flop, CLK.



Sele 3.2.1 Falstad loogikaskeem.

Loogikaskeemis on 5 sisendsignaali ning 2 väljundit. 4 sisendit simuleerivad trükkplaadi siseselt transistoride poolt tulenevat viga ning 1 sisend on mõeldud väliseks vastuvõtuks ehk teiste muundurite poolt saadetud veasignaali korraks. Väljunditeks üks on mõeldud transistoride töö peatamiseks kasutatava signaalina. Teisega saadetakse signaal edasi jadamisi ühenduses olevasse muundurisse. Veasignaali kadumisel läheb D Flip-Flope kasutades simulatsioonis aega vähemalt kaks kellatakti enne väljundi muutmist, kui vea sisendsignaali on olnud lokaalne. Vastasel juhul muutub väljund momentaalselt.

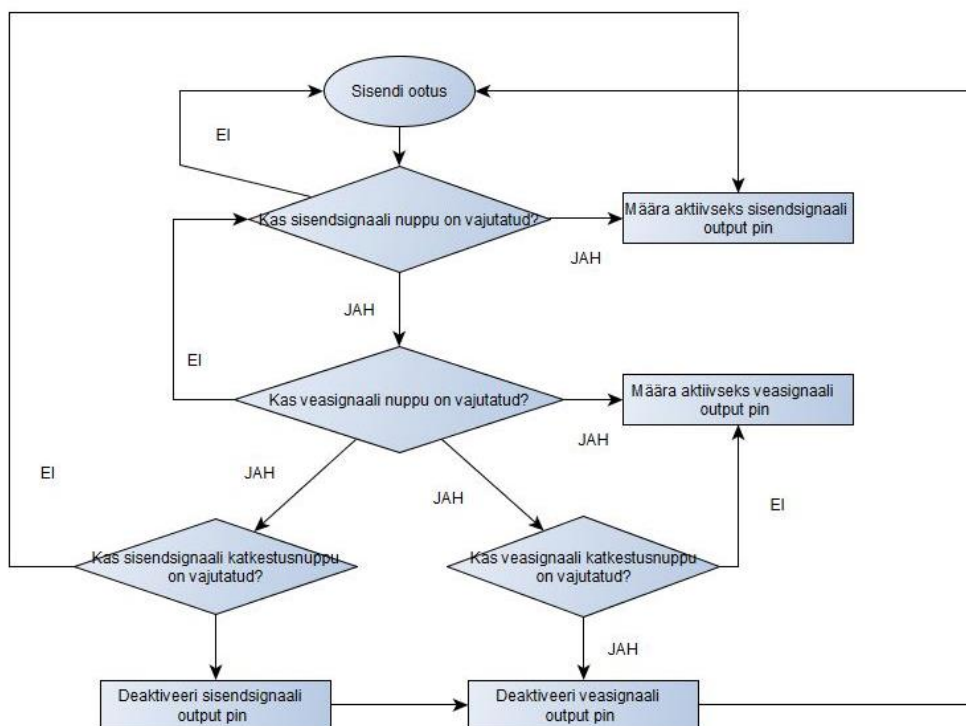
## 3.3 Veatuvastuse testimine

Veatuvastuse testimiseks võeti kasutusele Arduino tarkvaral põhinev lahendus. Eesmärgiks on saata läbi Mega2560 mikrokontrolleri trükkplaadile digitaalsignaali ning kontrollida, kas antud signaal aktiveerumisel toimivad transistoride lülitused korrektselt.

Antud lahendusel kasutatakse järgnevaid komponente: MEGA Atmega 2560 arendusplaat, millel on sisseehitatud Atmel ATmega2560 mikrokontroller ning USB-UART liidesega mikrokiip CH340G. Mikrokontrolleri liidesena puutetundliku TFT LCD 2.8" ekraan. Arduino Shield - Proto PCB Rev3 laiendusplaat.

Signaal aktiveeritakse ning deaktiveeritakse TFT LCD ekraani puudutusel. Arduino signaali saatmisest koostas autor algoritmi (Sele 3.3.1).





Sele 3.3.1 Arduino signaali saatmise algoritm.

## **4. ELEKTROONIKA**

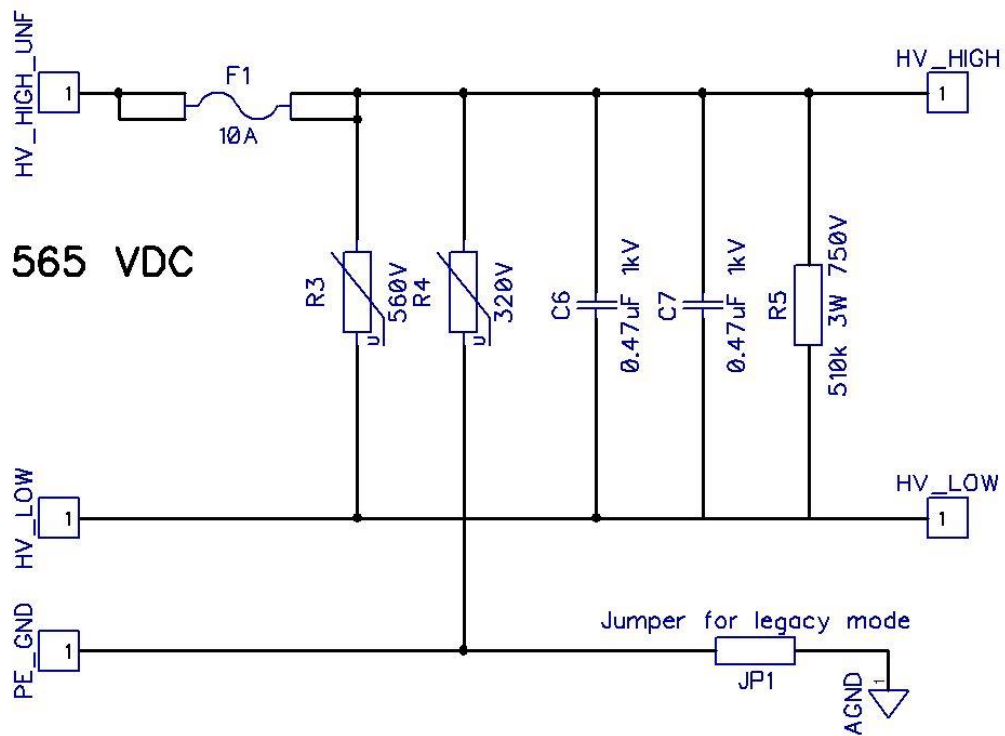
### **4.1 Diptrace elektroonikaskeem**

Uue elektroonikaskeemi loomiseks otsustati DipTrace programmi kasuks. Kuna autoril puudus varasem kogemus elektroonikaskeemide tegemisega, siis kuulati juhendajalt poolt saadud soovitusi. DipTrace olevat piisava lihtsuse ning funktsionaalsusega, mis teeb selle programmi kasutamise kõige optimaalsemaks.

Autori poolt loodud DipTrace elektroonikaskeem koosneb neljast põhilisest osast: toiteskeem, loogikaskeem, A-sild ning B-sild. A- ning B-sild on praktiliselt identsed, kokku moodustavad nad H-silla.

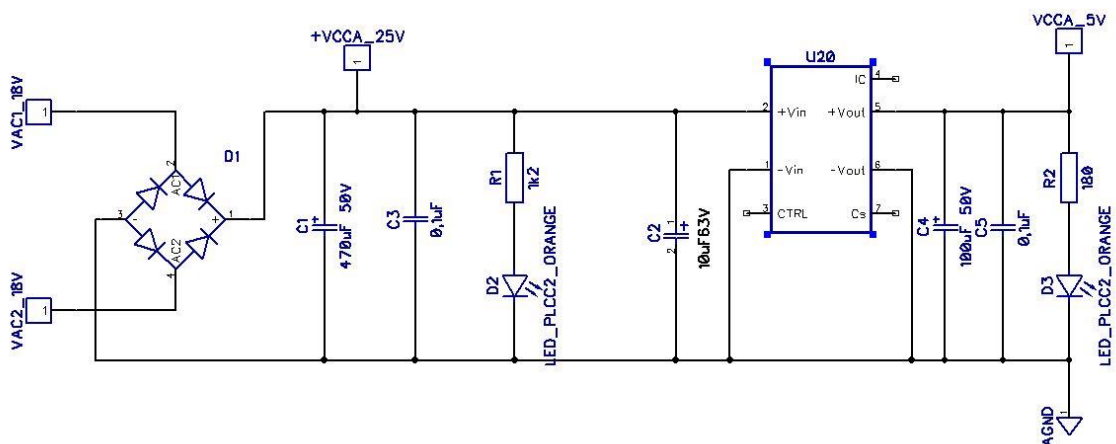
#### **4.1.1 Toiteskeem**

Toiteskeemi tuleb sisse 2 erinevat pinget, 565V alalisvoolu ning 18V vahelduvvoolu. 565V alalisvool on varasemalt käinud läbi juba alaldist, mis tegi seinast tuleva toitevoolu 400V vahelduvvoolu 565 voldiks alalisvooluks. Skeemis läbib 565VDC vool esmalt kaitse, mis liigse voolutugevuse korral vooluahela katkestab (Sele 4.0). Seejärel läbib vool 2 varistori. Varistor on pooljuhtelement mille takistus madalatel pingetel on väga suur, kuid pinge tõusmisel üle läviväärtuse langeb takistus järsult. Veel leidub skeemil 2 kondensaatorit voolu silumis eesmärgga ning üks takisti pingelanguks.



Sele 4.1.1.1 Toiteskeem 565 VDC

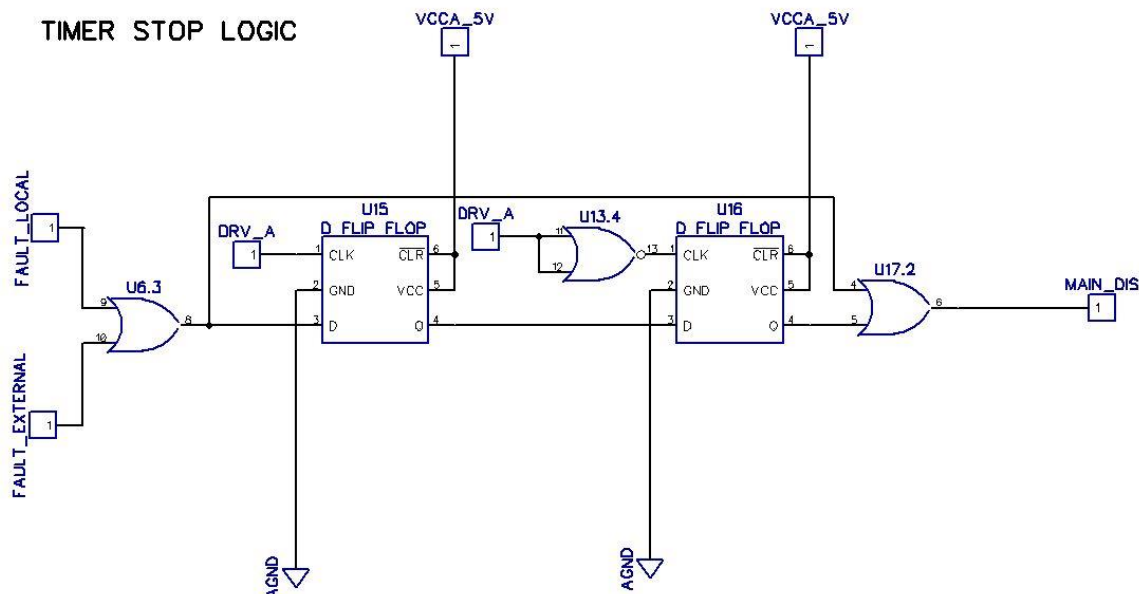
18 VDC viiakse esmalt läbi dioodsilla muutes voolu 25 VAC (Sele 4.1.1.2). Selle järel on ühendatud üks LED mis on vaatajale visuaalseks indikaatoriks, kas vool sealt läbi liigub. Samuti on vooringi ühendatud alalisvoolumuundur, mis muudab 25 volti pinget 5 voltiks. Pinget 5V kasutatakse loogikaskeemi elementide toiteks.



Sele 4.1.1.2 Toiteskeem 18 VAC







Sele 4.1.3.2 Taksti peatuse loogikaskeem

## 4.2 IGBT transistor

Pooljuhtidest valmistatud H-sildades kasutatakse üldiselt vastandlike polaarsustega seadmeid, nagu näiteks IGBT või P MOSFET-e, mis on ühendatud kõrge pingega liinile ning IGBT või N MOSFET-e, mis on ühendatud madala pingega liinile [13].

Transistorid on pooljuhtseadmed, millel esineb ka takistus, seetõttu lähevad nad kuumaks, kui voolu kaua juhivad. Seepärast kasutatakse H-sillana valdavalt MOSFET-e, mis on palju efektiivsemad ning ei lähe nii kuumaks [13].

Suurima kasuteguriga H-silla saab, kui kasutada N MOSFET-i transistore mõlemal liinil. Sellepärast, et N MOSFET-il on vaid kolmandik P MOSFET-i takistusest avatud olekus. Sellega kaasneb ka skeemi keerukus, sest kõrgema pingega liinil olevaid N MOSFET-e on vaja juhtida veel kõrgema pingega. Keerukust on võimalik vältida, kasutades spetsiaalseid mikroskeeme, kus on pinge tõstmine kivi sees ära lahendatud [13].

IGBT transistor kombineerib MOSFET-i ning BJT transistoride parimad omadused [18]. Tema eelisteks on:

1. Väike võimsus, pingega juhitud pais sisse ning välja lülitamiseks.
2. Vähenenud juhtivuse kadu.
3. Positiivne temperatuuri koefitsient. Seadmele ei mõju soojuskaod, mis on omased BJT-le.
4. Võimalus kasutada integreeritud või väliseid mitteparalleelseid diode.

IGBT mida skeemis kasutatakse on IRG4PH40UD tüüpi. Tootja soovib kasutada seda lülitustel kuni 40kHz sagedusega, kuid resonantsringis on töötamis sagedus garanteeritud kuni 200kHz [8].

Tabel 4.2.1 IRG4PH40UD seadme maksimaalsed väärtused

| Parameeter                              | Väärtus |
|---|---------|
| Kollektorist emitterisse läbilöögipinge | 1200V   |
| Pidev kollektori voolutugevus           | 30A     |
| Kollektori impulsi voolutugevus         | 120A    |
| Diiodi pidev edasivoolutugevus          | 8A      |
| Diiodi maksimaalne edasivoolutugevus    | 130A    |

### 4.3 FOD8333 Draiver

FOD8333 on arenenud 2.5A väljundiga optronsidega IGBT draiver, mis on võimeline juhtima kuni 1200V ning 150A [7].

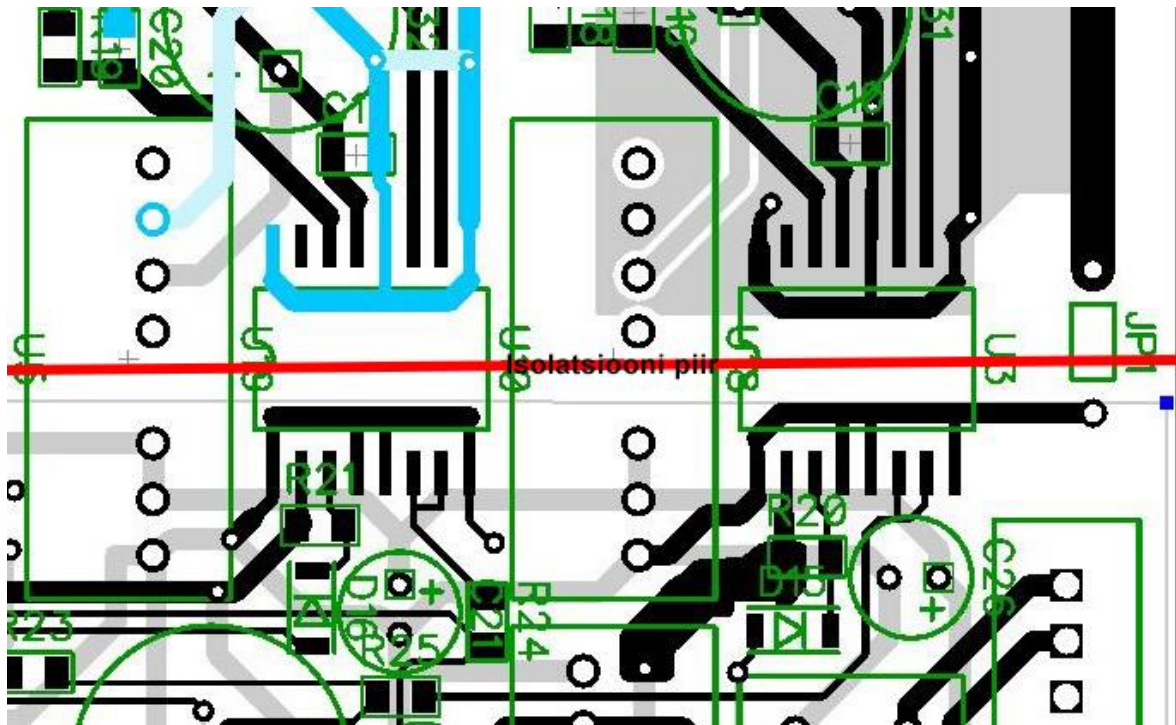
Optron on sisuliselt mittejuhtivasse barjääri ühendatud optiline saatja ja optiline vastuvõtja. Optronsideid kasutatakse kõige sagedamini kahe vooluringi eraldamiseks kus on kasutusel erinevad pinged. Optronsideites kasutatav valgusallikas on enamasti LED. Varasemalt on kasutatud ka hõõglampe, kuid nad ei ole nii tõhusad, moonutavad sisendsignaali ning nende eluiga on märgatavalt väiksem võrreldes valgusdiiodiga [6].

Draiver FOD8333 sobib juhtimaks kiiresti lülituvaid IGBT ning MOSFET transistore suur jõudlus süsteemides. Samuti pakub draiver kaitsefunktsioone mis on vajalikud ennetamiseks vea olukordi mis viivad IGBT transistoride radade läbipõlemiseni [7].

### 4.3 PCB skeem

Trükkplaadi suuruseks valiti Marco Denicolai tehtud trükkplaadi baasil 160 x 100mm [4]. See tähendas seda, et kõik skeemis kasutatavad komponendid peavad sellele alale ära mahtuma.

Põhiliseks eesmärgiks oli eraldada kõrgepinge ning madalpinge toidet kasutatavad alad (Sele 4.3.1). Selle põhjuseks oli kõrgepinges tekkivate suurte pingeresonantside võimalik kahjustus madalpinge elementidele.



Sele 4.3.1 PCB skeemi isolatsioonipiir

Järgmiseks printsiibiks PCB skeemi tehes oli madalpinge alas viia toite ning erinevad signaali rajad ühelt poolt ning maa rajad teiselt poolt plaati.

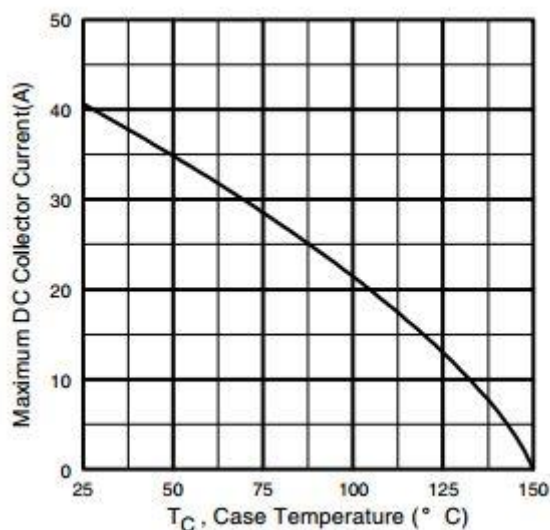
Trükkplaadi prototüüp freesiti välja kahepoolsest vaskplaadist TTÜ innovatsiooni- ja ettevõtluskeskuses Mektorys.



## 5. MEHAANIKA

### 5.1 Trükkplaadi jahutus

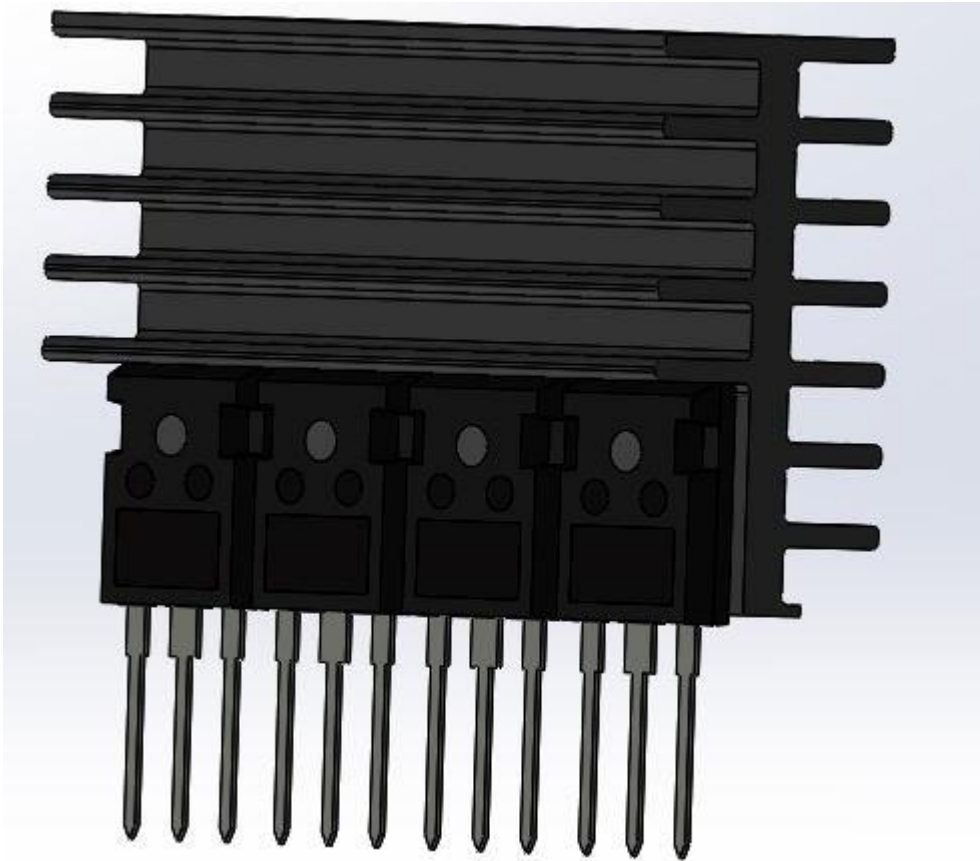
Professor Marco Denicolai oli enda PCB versioonis kasutanud transistoride jahutuseks üsna väikest alumiiniumradiaatorit, selle soojapidavus oli  $3.7\text{ }^{\circ}\text{C/W}$  [4]. Soojuspidavus näitab mitu kraadi soojeneb radiaator ühe watti ühiku kohta. Radiaatori mõõtmed olid  $50 \times 70 \times 30\text{mm}$ . Transistorite jahutus on tähtis, kuna õige temperatuur tagab elemendi korrektse funktsionaalsuse. IGBT IRG4PH40UD tehase andmebaasist leitud tabeli alusel lõpetab antud transistor töötamise kui kesta temperatuur on ületanud  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  [8].



Sele 5.1.1 Graafik IGBT IRG4PH40UD

Sele 5.0 IGBT IRG4PH40UD maksimaalne kollektori voolutugevuse sõltuvus kesta temperatuurist  
Antud radiaatoril esines mõningaid puudusi (Sele 5.1.1):

Radiaatoril asetsevad jahutusribid horisontaalselt. Horisontaalselt asetsevad jahutusribad on efektiivsed kui koos nendega on jahutussüsteemis kasutusel ka mingit sorti ventilaator, mis tagab horisontaalselt liikuva õhuvoolu. Härra Denicolai loodud muunduri lahenduses, aga sellist õhuvoolu kahjuks ei teki. Seetõttu jahutab antud radiaator märgatavalt vähem kui vertikaalselt asetsevate jahutusribidega radiaator.

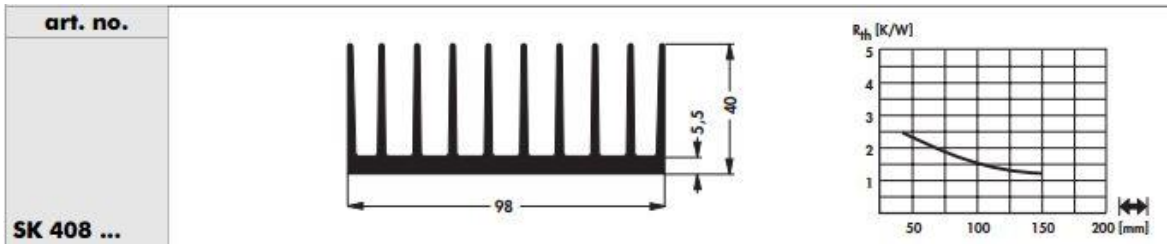


Sele 5.1.1 Marco Denicolai poolt kasutatud jahutusradiaator

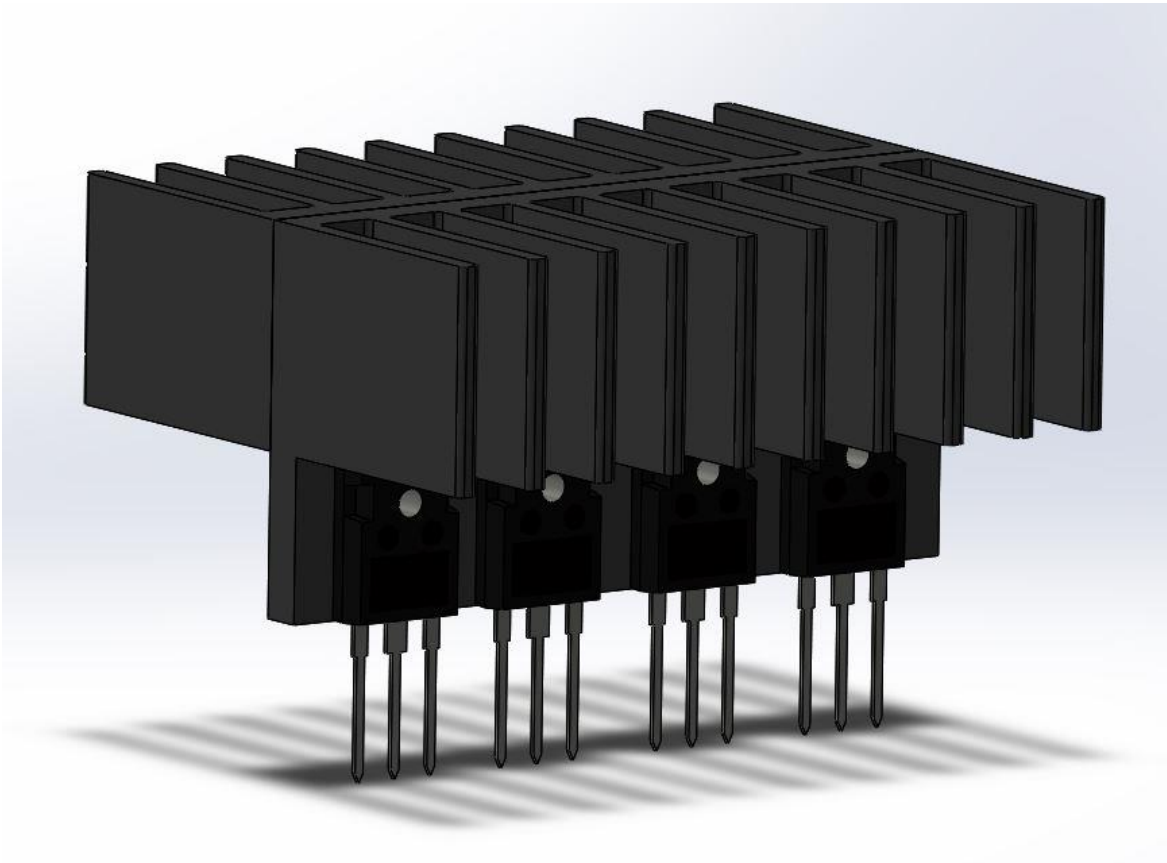
## 5.2 Uuendatud jahutusradiaator

Optimeeritud lahendusega jahutusüsteemis soovib autor kasutusele võtta vertikaalselt asetsevate ribidega jahutusradiaatori. Kuna kõrgesageduse muunduris puudub väline mõjutus õhuringile, siis toimub õhu liikumine vertikaalselt. Transistoride tööst tingitud tekkinud soe õhk liigub üles suunates külmema õhu alla ning moodustades õhuringluse. Kirjeldatud õhuringluse puhul tekib maksimaalselt kontakt õhu läbivooluga vertikaalselt asetsevatel jahutusribidel. Uuendatud disainis soovib autor kasutada kahte jahutusradiaatori profiili mis asetsevad transistoride peal (Sele 5.2.2).

Trükkplaadi jahuteid tootva ettevõtte Fisher Elektronik kataloogist leiti sobiv radiaatori profiil SK408 (Sele 5.2.1). Mõõtmed antud radiaatorile valiti 50 x 98 x 40mm ning 29 x 98 x 40mm. Selliste mõõtude juures on graafikult vaadatud lubatud soojapidavus umbes 2.3 °C/W [5].



Sele 5.2.1 Optimeeritud jahutusradiaatori profiil



Sele 5.2.2 Uuendatud jahutusradiaatori disain

IGBT võimsuse saame arvutada kasutades valemit:

$$P = I_c^2 \times R_{IGBT}, \quad (5.2.1)$$

kus  $P$  - võimsus (W),

$I_c$  - pidev kollektori vool (A),

$R_{IGBT}$  - IGBT takistus ( $\Omega$ ),

$$8^2 \times 0.30375 = 19.44 \text{ W.}$$

Transistori takistuse saame arvutada kasutades valemit:

$$\frac{V_{ce}}{I_c} = R_{IGBT}, \quad (5.2.2)$$

kus  $V_{CE}$  - IGBT pinge kollektorilt emitterile (V),

$I_c$  - pidev kollektori vool (A),

$R_{IGBT}$  - IGBT takistus ( $\Omega$ ).

$$\frac{2.43}{8} = 0.30375 \Omega.$$

Radiaatorist emiteeruva soojuse same arvutada kasutades valemit:

$$\Delta T = P \times R_{TH}, \quad (5.2.3)$$

kus  $P$  - võimsus (W),

$\Delta T$  - temperatuuri erinevus väliskeskkonna ning radiaatori vahel ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$R_{TH}$  - soojapidavus ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ).

$$19.44 \times 2.3 = 44.712 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Radiaatorist emiteerud teoreetiliselt  $44.712 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ . See piisavalt väike temperatuuri tõus transistoride jätkukindlaks lülitusteks. Samuti hakatakse kasutama Tesla kõrgepingegeneraatorit peamiselt demonratsioonide tegemiseks, seega ei tule masinal pikkasi töötüsükkeid, mis võiks põhjustada ülekuumenemist.

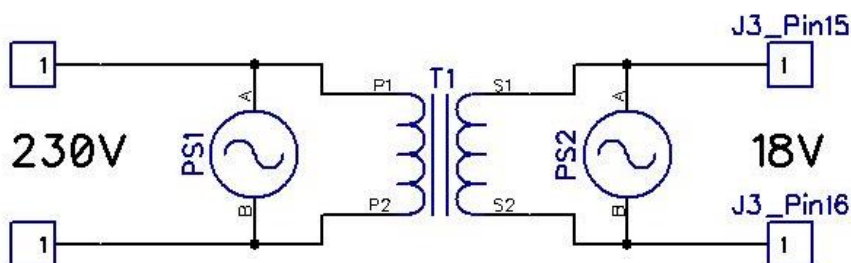
## 6. Süsteemi testimine

Süsteemi testimine enne Tesla masina töötüklisse panemist on vajalik komponentide kaitsemiseks. Kui trükkplaadi disainis esineb probleeme, siis on parem kui need tulevad välja testides nõrga vooluga, kuna see ei vigasta süsteemielemente. Testimise põhimõte on liikuda raskusastmeliselt kergemast vooluringist keerukama, kõrgema voolu ning rohkem elemente kasutava poole.

1. Süsteemi toitelülituste töö (loogikaskeemi ja draiverite toitelülitused)
2. Individuaalne IGBT lülitustransistoride katsetamine
3. Juht- ja vealogika kontroll
4. Kogu lülitussüsteemi töö kontroll
5. Koormustest

### 6.1. Süsteemi toitelülituste töö kontroll

Jälgides üleval väljatoodud testimisprintsipi alustatakse toitepingete olemasolu mõõtmisest. Kontrollitakse üle kõik trükkplaadil olevad komponendid mis vajavad elektrilist toidet. Toiteks on seinä elektroonikavõrgust väljuv vahelduvvool 230V mis on trafot kasutades muudetud 18V vahelduvvooluks.



Sele 6.1.1 Toiteskeem.

Peale toitepinge 18 V rakendamist skeemi, kontrollime:

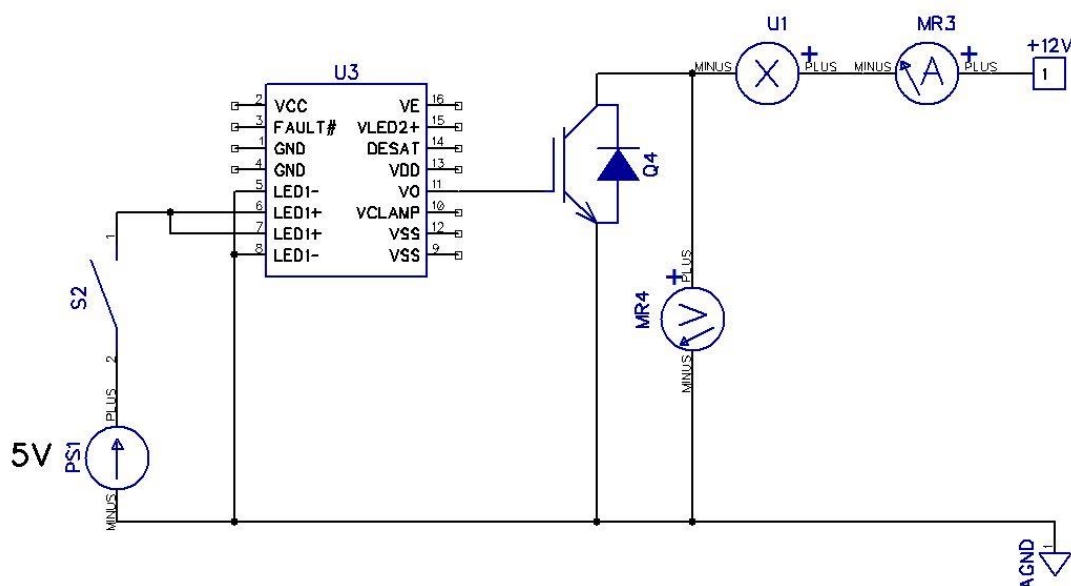
- 1) DC/DC muunduri U20 väljundpinge mõõtmine, peab olema vahemikus 4.75 kuni 5.25V [9]
- 2) DC/DC muundurite U18, U19, U2, U21 väljundpinge mõõtmine, peab olema vahemikus 14.25 kuni 15.75V [10].
- 3) SR Flip-Flop mikrokiip U14 väljundpinge mõõtmine, peab olema vahemikus 2 kuni 6V [11].
- 4) D Flip-Flop mikrokiipide U12, U15, U16 väljundpinge mõõtmine, peab olema vahemikus 3.325 kuni 3.675V [14].
- 5) OR loogikalemendi mikrokiipide U6, U17 väljundpinge mõõtmine, peab olema vahemikus 0.5 kuni 7,5V [15].
- 6) NOR loogikalemendi mikrokiipide U6, U17 väljundpinge mõõtmine, peab olema vahemikus 0.5 kuni 7,5V [19].

## 6.2. Individuaalne IGBT lülitustransistoride katsetamine

Järgnevalt soovitakse idividuaalselt üle kontrollida transistoride töö, kas toimuvad lülitused. Selle kontrolliks rakendame IGBT sillale 15V pinget ning mõõdame kollektori ja emitteri vahelist pinget. Kui pinge vastab tehase poolt pakutud andmelehel [8] esitatud pingele (2.43V), siis saame kinnitust transistori korrektsest lülitamisest.

Katsetamise käik:

- 1) Rakendame toitepinge 18 V.
- 2) Ühendame lüliti draiveri U3 viikudele 6 ja 7.
- 3) Ühendame Sele 5.6 kohase mõõtskeemi IGBT transistori Q4 viikudele.
- 4) Rakendame mõõteskeemile täiendava välise toitepinge allika (+12 V, voolupiirang 5 A).
- 5) Mõõdame  $U_{CE}$  pinge juhul, kui S2 on suletud (transistor peab olema lahti).
- 6) Mõõdame  $I_C$  voolu, kui transistor on avatud olekus.
- 7) Arvutame takistuse transistori avatud olekus.
- 8) Lülitame lüliti S2 avatud olekusse.
- 9) Mõõdame  $I_C$ .
- 10) Veendume, et  $I_C$  on nullilähedase väärtusega ( $< 1$  mA).



Sele 6.1.2 IGBT katsetuskeem

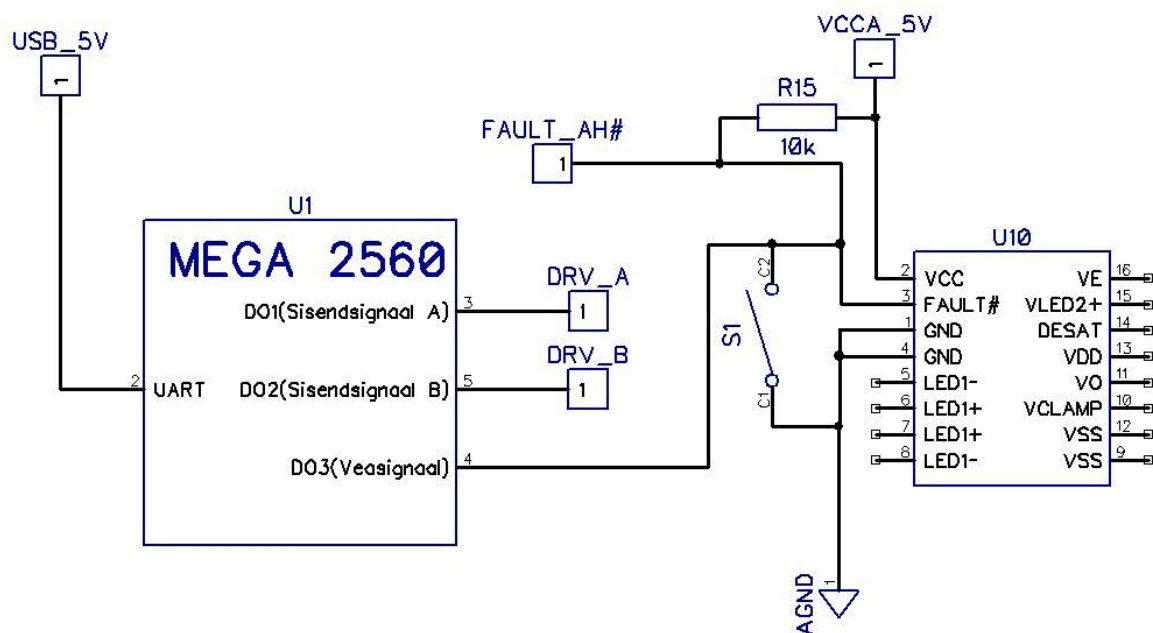
Samasugused toimingud korrata transistoride Q1, Q2, Q3 puhul, ühendades vastavalt Seel toodud katseskeemil draiverite U4, U5, U10 viikudega.

## 6.3. Juht- ja ohtusloogika kontroll

Kolmandana teostatakse loogika kontroll. Peatükis 3.3 pakutud Arduino lahendusega saab TFT LCD puutekraanilt genereerida sisendsignaali või veasignaali.

Katsetamise käik:

- 1) Rakendame toitepinge 18 V.
- 2) Ühendame lüliti draiveri U10 viikudele 3 ja 4.
- 3) Ühendame Sele 5.6 kohase mõõtskeemi draiveri U10 viikudele.
- 4) Rakendame mõõteskeemile täiendava välise toitepinge allika U1 (+5 V, voolupiirang 0.8 A).
- 5) Sisendsignaali A lülitatakse U1 kaudu sisse ning mõõdetakse üle transistoride Q1, Q2, Q3, Q4 olekud vastavalt peatükis 6.2 kirjeldatud katsetusele. Avatud peavad olema transistorid Q2, Q3, suletud peavad olema Q1, Q4.
- 6) Järgnevalt lülitatakse sisse sisendsignaali B U1 kaudu ning mõõdetakse üle transistoride Q1, Q2, Q3, Q4 olekud vastavalt peatükis 6.2 kirjeldatud katsetusele. Avatud peavad olema kõik transistorid.
- 7) Lülitatakse sisse veasignaali U1 kaudu ning mõõdetakse üle transistoride Q1, Q2, Q3, Q4 olekud vastavalt peatükis 6.2 kirjeldatud katsetusele. Kõik transistorid peavad katse edukaks läbimiseks olema suletud.



Sele 6.3.1 Loogika kontrolliskeem

## 6.4 Terve süsteemi kontroll

Terve süsteemi kontrolliks rakendatakse mõõteskeemile 12V 5A välist toitepinge allikat. Väline toide ühendatakse HV-high ning HV-low pinidele. Katsetajale visuaalse indikaatorina ühendatakse Bridge koormuseks 40W lamp. Transistoride lülitustest tekkinud siirdeprotsessi mõõdetakse ostsiloskoopiga.

Katsetamise käik:

- 1) Rakendame toitepinge 18 V.
- 2) Ühendame lamp L1 draiveri U3 viigule 9.
- 3) Ühendame komponendi J2 pinidele 14 ning 20 välise toitepinge. Alalispinge „+“ pool ühendatakse pin 14.
- 4) Rakendame mõõteskeemile täiendav väline toitepinge allikas (+12 V, voolupiirang 5A).
- 5) Mõõdame ostsiloskoopiga transistoride lülitustest tekkinud siirdeprotsessi olemasolu.
- 6) Katse edukaks läbimiseks peab siirdeprotsess olema vähemalt sagedusega 100 kHz.

## 6.5 Koormustest

Koormustest sarnaneb peatükis 6.4 kirjeldatud katsele. Erinevuseks on valine toitepinge allikas. Väliste toitepinge allikana rakendatakse mõõteskeemile 24V 8A. Korratakse peatükis 6.4 kirjeldatud katsetamise käiku.

Pärast kõikide süsteemide edukat läbimist võib ühendada valmistatud prototüüp trükkplaadi kõrgepingevõrku.



## KOKKUVÕTE

Käesoleva töö käigus arendati Tesla kõrgepingegeneraatoris kasutatavat kõrgsageduse muundurit. Töö eesmärk oli valmistada prototüüplahendus Tallinna Tehnikaülikoolis leiduvale generaatorile, mille töö oli rikke tõttu katkenud. Muunduri trükkplaadi arendamisel kasutati võrreldes 2001 aastal konstrueeritud Tesla trafoga modernsemaid ning efektiivsemaid tehnilisi lahendusi.

Käesolev töö jagunes viieks põhilisemaks osaks. Töö esimene osa koosnes peamiselt vajaminevast teooriast ning rikke põhjuse tuvastamisest, põhjendamisest. Järgnevas osas tegeleti optimeeritud kõrgsageduse muunduri infotehnoloogilise poolega. Alustati veatuvastuse algoritmi loomisest yEd plokkdiagrammi programmis. Seejärel konstrueeriti ning simuleeriti vastavale algoritmile vastav loogikaelementidest koosnev skeem [falstad.com/circuit/](http://falstad.com/circuit/) õpikeskkonnas. Peatüki lõpus arendati trükkplaadi testimiseks vajalik algoritm Arduino mikrokontrollerile. Kolmandas peatükis koostati elektroonika ning PCB skeem kasutades DipTrace tarkvara. Peatüki lõpus freesiti valminud PCB skeem trükkplaadi vormis välja. Neljas osa käsitles endas põhiliselt lõputöö mehaanikat, vahetati välja jahutusradiaator ning tehti optimeeritud radiaatorile vajalikud soojusarvutused. Viimases peatükis kirjeldatakse valminud prototüübi testimisprotsessi koos selgitavate skeemidega.

Töö tulemusena valmis prototüüplahendus Tesla kõrgepingegeneraatoris kasutatavast kõrgsageduse muundurist.

## SUMMARY

A fault sensing high-frequency converter used in Tesla Coil was developed during this thesis. The aim of this project was to build a prototype solution for the Tesla generator situated in Tallinn University of Technology, which had ceased to work. During the development of the converters PCB more modern technical solutions were used compared to the year 2001 when the Tesla Coil had been constructed. As a result a dual sided PCB was milled from a copper board with corresponding electrical schematics.

This thesis was divided into five major sections. The first chapter mainly consists of theory of operation with finding and explaining the reasons for the Tesla Coil breakdown. The next chapter concentrates on the infotechnological part of this work. Firstly an algorithm was made in yEd graph editor software for fault detection. The algorithm was realized using logic gates and simulated in *falstad.com/circuit/* circuit simulation applet. An algorithm for testing the circuit board was designed in the end of this chapter. Next came the electrical part of this thesis. Electrical- and PCB schematics were made with the use of DipTrace program. After that the PCB was milled out of a dual sided copper board. The fourth chapter includes the mechanical section of this work. An optimized heat sink was developed with the necessary heat dissipation calculations. The last chapter describes the testing procedures for the prototype solution of the high frequency converter used in Tesla Coil.

The result of this bachelor thesis was a prototype solution of a modified high frequency converter for Tesla Coil.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Nikola Tesla. Wikipedia [WWW] [https://et.wikipedia.org/wiki/Nikola\\_Tesla](https://et.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla) (vaadatud 19.05.2017)
2. Nikola Tesla. Biography [WWW] <http://www.biography.com/people/nikola-tesla-9504443> (vaadatud 19.05.2017)
3. Optronsidesti [WWW] <http://howwes.com/et/pages/650961> (vaadatud 18.05.2017)
4. Tesla transformer for experimentation and research. (2001). / Koost M. Denicolai. Helsinki.
5. Jahutusradiaator [WWW] [http://www.tdmginc.com/heatsink\\_design.html](http://www.tdmginc.com/heatsink_design.html) (vaadatud 18.05.2017)
6. Fisher Electronik kataloogi. Andmebaas.  
[http://www.fischerelektronik.de/web\\_fischer/en\\_GB/heatsinks/A01/Standard%20extruded%20heatsinks/PR/SK134\\_/\\$productCard/parameters/index.xhtml](http://www.fischerelektronik.de/web_fischer/en_GB/heatsinks/A01/Standard%20extruded%20heatsinks/PR/SK134_/$productCard/parameters/index.xhtml) (vaadatud 21.05.2017)
7. FOD8333 mikrokiip. Datasheet <http://www.mouser.com/ds/2/149/FOD8333-463350.pdf> (vaadatud 05.05.2017)
8. IGBT IRG4PH40UD. Datasheet <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irg4ph40ud.pdf> (vaadatud 07.05.2017)
9. NDL2405SC DC/DC muundur. Datasheet [http://www.mouser.com/ds/2/281/kdc\\_ndl-18945.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/281/kdc_ndl-18945.pdf) (vaadatud 07.05.2017)
10. IP2415SA DC/DC muundur. Datasheet [http://www.xppower.com/Portals/0/pdfs/SF\\_IP.pdf](http://www.xppower.com/Portals/0/pdfs/SF_IP.pdf) (vaadatud 07.05.2017)
11. MC74HC109D SR Latch mikrokiip. Datasheet.  
<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/motorola/MC74HC109D.pdf> (vaadatud 07.05.2017)
12. Tesla trafo. Wikipedia [WWW] [https://et.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_trafo](https://et.wikipedia.org/wiki/Tesla_trafo) (vaadatud 15.05.2017)
13. H-sild. Wikipedia [WWW] <https://et.wikipedia.org/wiki/H-sild> (vaadatud 21.05.2017)
14. SN74LVC1G175 D Flip-Flop mikrokiip. Datasheet.  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1g175.pdf> (vaadatud 07.05.2017)
15. MM74HC32 OR loogika mikrokiip. Datasheet. <http://www.mouser.com/ds/2/149/MM74HC32-1011000.pdf> (vaadatud 07.05.2017)
16. High Voltage. Wikipedia [WWW] [https://en.wikipedia.org/wiki/High\\_voltage](https://en.wikipedia.org/wiki/High_voltage) (vaadatud 17.05.2017)

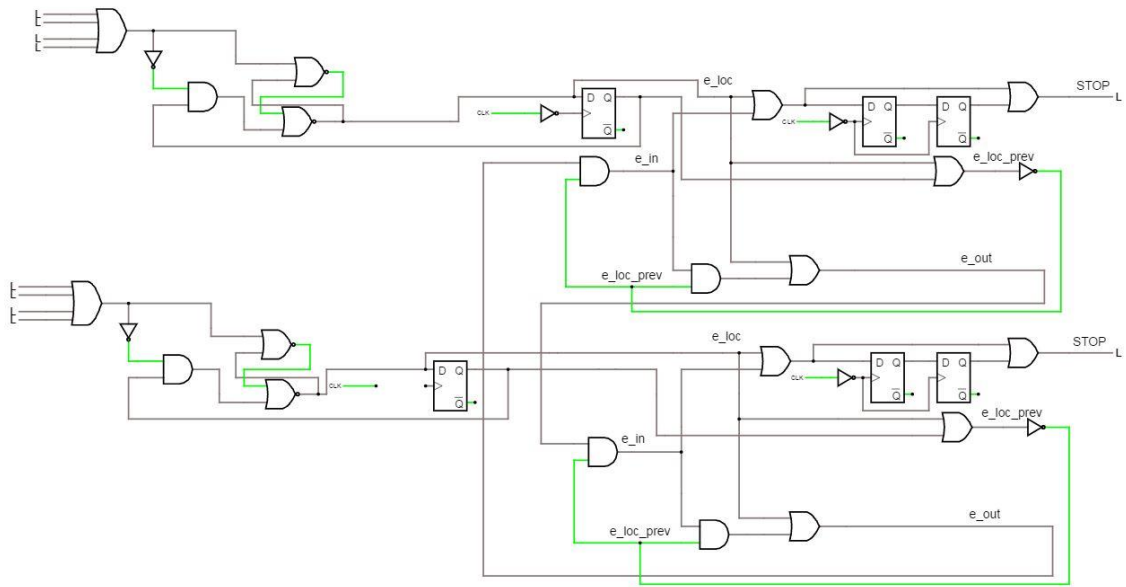
17. Kõrgepinge. Wikipedia [WWW] <https://et.wikipedia.org/wiki/K%C3%B5rgepinge> (vaadatud 17.05.2017)

18. IGBT ning MOSFET erinevus [WWW] <http://www.electronicdesign.com/power/what-s-difference-between-igbts-and-high-voltage-power-mosfets> (vaadatud 25.05.2017)

19. MM74HC08M NOR loogika mikrokiip <http://www.mouser.com/ds/2/149/MM74HC08-1010940.pdf> (vaadatud 25.05.2017)

# LISAD

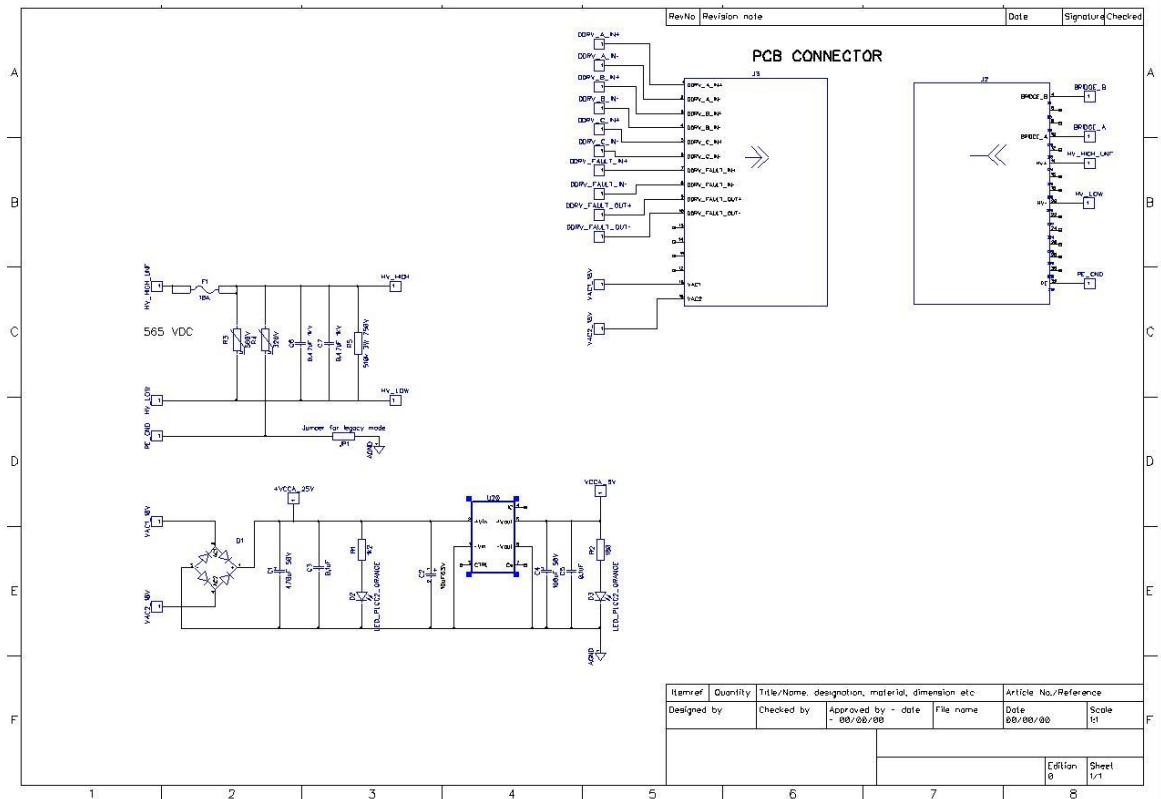
## Lisa 1. Falstad simulatsiooniskeem kahe konvertoriga



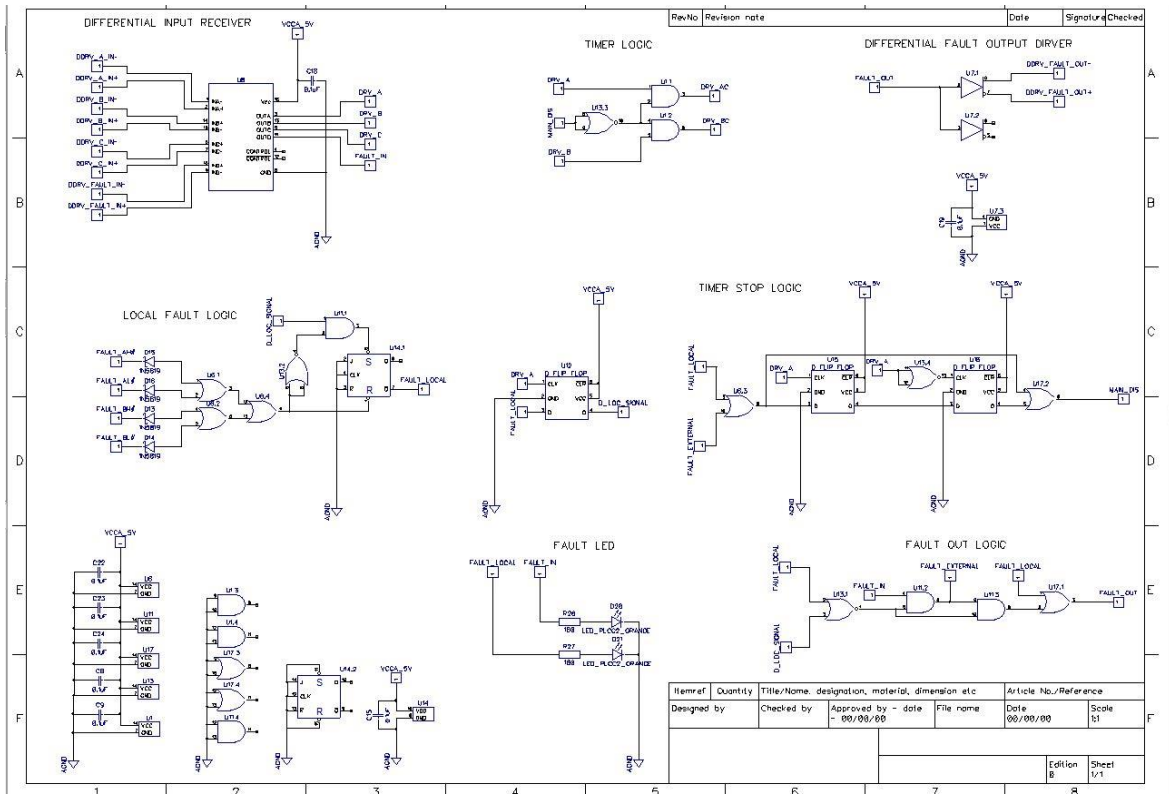


# Lisa 3. DipTrace elektroonikaskeem

## Ühendus ja toide



## Loogika ja kontroll

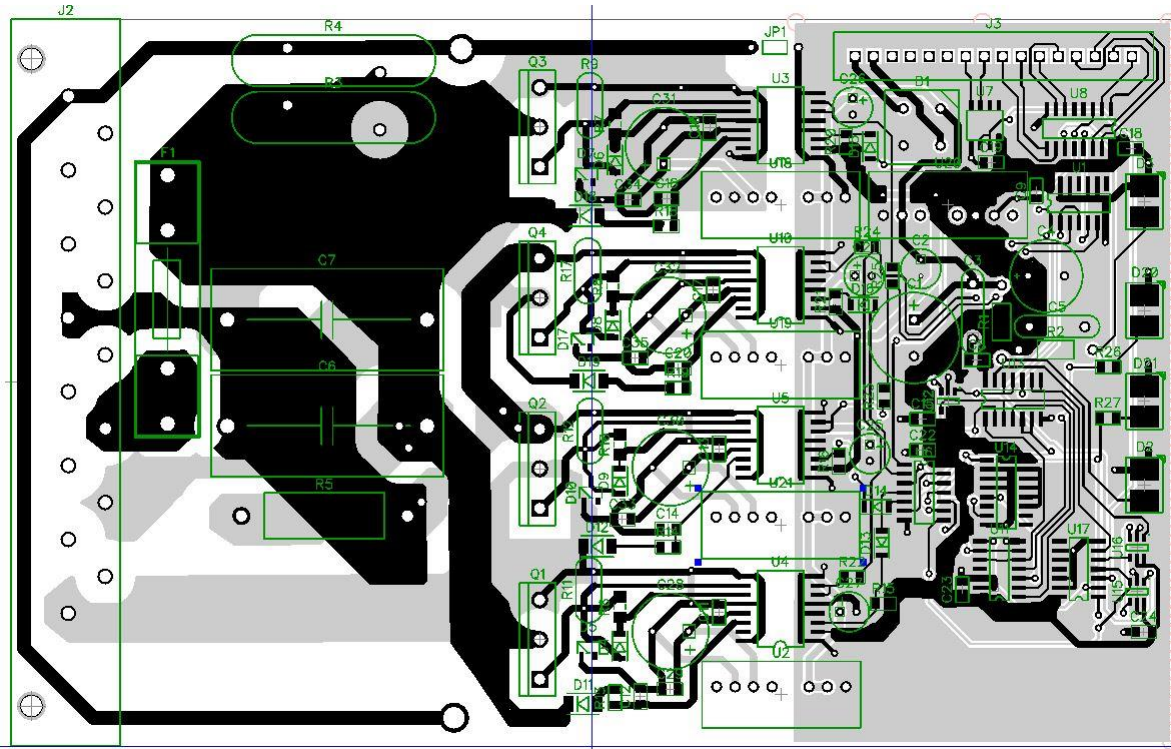






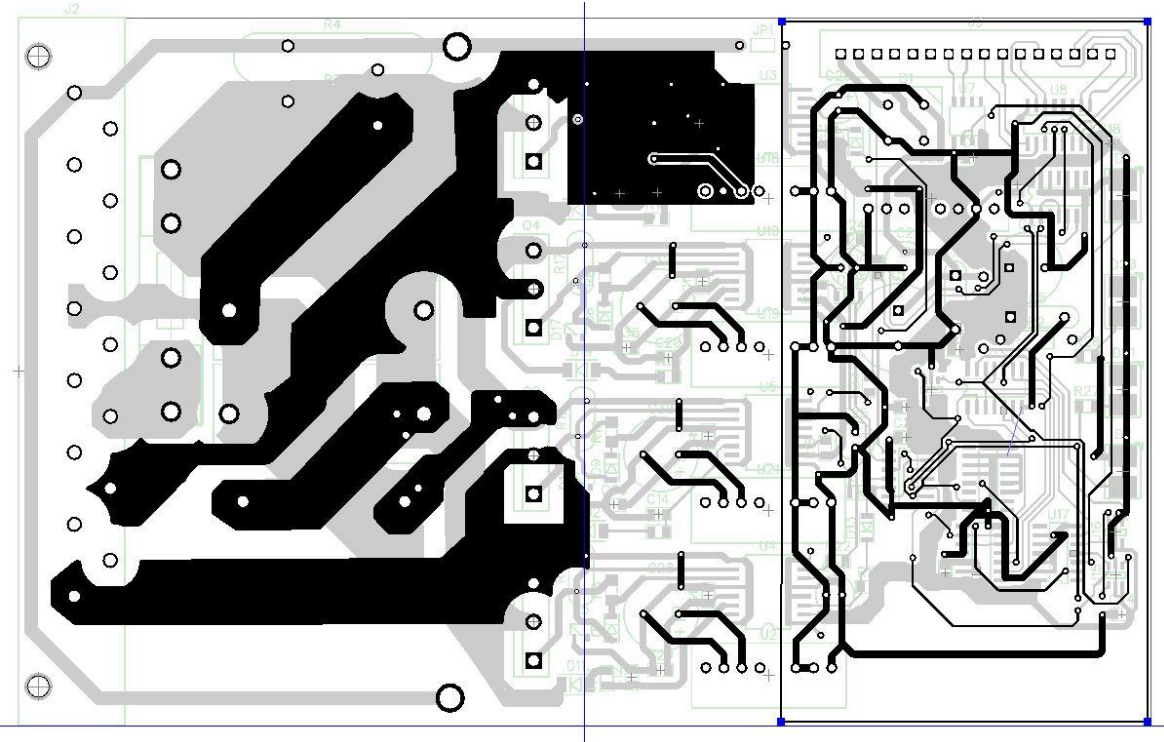
# Lisa 4. DipTrace PCB skeem

Ülemine pool



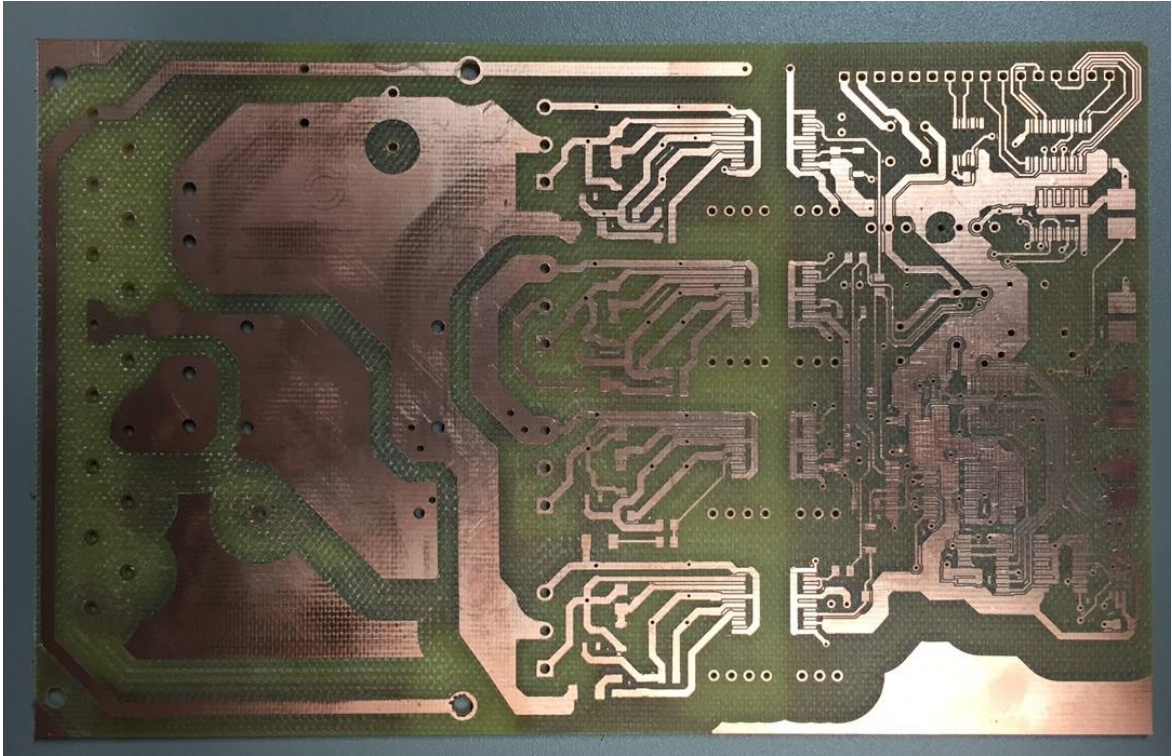
Alumine

pool



## Lisa 5. Mektorys välja freesitud trükkplaat

Ülemine pool



Alumine pool

