



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

TESLA POOLI TOITESÜSTEEMI TAASTAMINE

RESTORATION OF POWER SUPPLY FOR TESLA COIL

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Renno Tamtik

Üliõpilaskood: 164034AAVB

Juhendaja: vanemlektor Paul Taklaja
doktorant-nooremteadur Ivar Kiitam

Tallinn, 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Renno Tamtik

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Tesla pooli toitesüsteemi taastamine

Kuupäev: 24.05.2019

46 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendajad: vanemlektor Paul Taklaja, doktorant-nooremteadur Ivar Kiitam

Töö konsultant: Aare Baumer

Sisu kirjeldus:

Antud lõputöö eesmärgiks on mittetöötava Tesla pooli toitesüsteemi taastamine, et seadmega tekitatavaid elektrilisi nähtusi oleks võimalik demonstreerida meelelahutuslikel eesmärkidel. Töös kirjeldatakse Tesla pooli ajalugu, selle leiutaja Nikola Tesla elulugu, Tesla pooli tööpõhimõtet ja töötamise ajal toimuvaid elektrilisi protsesse. Samuti tutvustatakse erinevaid toitesüsteemide variante, et nende hulgast oleks võimalik valida sobivaim.

Töö praktilises osas valitakse uue toitesüsteemi konfiguratsioon ning tehakse Tesla pooli töötamise kindlakstegemiseks katseid. Katsete tulemusel veendutakse Tesla pooli korrasolekus ja vaadeldakse sisendpinge mõju tekkiva elektrilahenduse pikkusele.

Töö sissejuhatuses püstitatud eesmärk sai suures ulatuses täidetud. Mittetöötav Tesla pool suudeti katsete läbiviimiseks käivitada, olles loonud seadmele uue toitesüsteemi. Püstitatud eesmärk Tesla pooliga elektrilahenduste demonstreerimisest jäi praktiliselt täitmata, sest välgukatsetuste tegemine on takistatud ebapiisava suurusega Faraday puuri ja kompaktse juhtpaneeli puudumise tõttu. Mõlemad puudused on seotud inimeste ohutuse tagamisega. Sobiva võimsusega trafo leidmisel on koheselt võimalik Tesla pool uuesti töökorda viia ja teha katseid.

Märksõnad: Tesla pool, Tesla trafo, restaureerimine, toitesüsteem, elektrilahendus

ABSTRACT

Author: Renno Tamtik

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Restoration of Power Supply for Tesla Coil

Date: 24.05.2019

46 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisors of the thesis: Senior Lecturer Paul Taklaja, Early Stage Researcher Ivar Kiitam

Consultant: Aare Baumer

Abstract:

The aim of this thesis is restoration of power supply for inoperational Tesla coil so that this Tesla coil can be used for electric discharge demonstrations. To reach this goal, history and working principle of Tesla Coil and its inventor's biography was studied. To choose best power supply version, different designs were researched and compared.

In the practical part of this thesis configuration of new power supply was chosen and then experiments were carried out so it can be said that Tesla coil is working. Indeed experiments proved that Tesla coil is working and comparison of lengths of electric discharges was possible.

The aim of the thesis was mostly fulfilled. Inoperational Tesla coil was repaired as the new power supply was assembled. The aim to use Tesla coil for electric discharge demonstrations was not fulfilled because of the safety concerns. There was Faraday's cage that was not large enough and compact control panel was missing. If suitable transformer is found, then it is immediately possible to bring Tesla coil to work.

Keywords: Tesla coil, Tesla transformer, restoration, power supply, electric discharge

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Tesla pooli toitesüsteemi taastamine
Lõputöö teema inglise keeles:	Restoration of Power Supply for Tesla Coil
Üliõpilane:	Renno Tamtik, 164034AAVB
Eriala:	elektroenergeetika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Paul Taklaja, Ivar Kiitam
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	üks aasta
Lõputöö esitamise tähtaeg:	24.05.2019

/allkirjastatud digitaalselt/
Üliõpilane (allkiri)

/allkirjastatud digitaalselt/
Juhendaja (allkiri)

/allkirjastatud digitaalselt/
Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Tesla pool on üks vaatamängulisemaid Nikola Tesla poolt leiutatud seadmeid, mida bakalaureuseõpingute käigus tudengitele ei tutvustata. Ometi on Tesla poolis toimuvad protsessid ja nähtused bakalaureuseastme lõpetajatele tuntud, seega on tudengi seisukohalt kasulik teoreetilised teadmised rakendada praktilisel viisil, võttes eesmärgiks mittetöötava Tesla pooli töökorda viimise. Renoveerimist vajav Tesla pool asub Energia avastuskeskuses, kuid on esialgselt pärit Soomest, kus see valmis ühe doktoritöö tulemusena. Töökorras seade annaks võimaluse Energia avastuskeskuses korraldada välgudemonstratsioone, mille eesmärgiks on lisaks emotsiooni tekitamisele äratada inimestes huvi energeetika ja elektroonika vastu.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on ühe konkreetse Tesla pooli toitesüsteemi taastamine, et seadet oleks võimalik kasutada välgudemonstratsioonideks.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Kuidas Tesla pool töötab?

Millised on antud konkreetse Tesla pooli parameetrid?

Milline võiks olla selle Tesla pooli toitesüsteem, et seade oleks võimalikult töökindel?

Kuidas see Tesla pool töökorda viia?

4. Lähteandmed

Oluliseks allikaks on Tesla pooli ehitamisel põhinev Marco Denicolai doktoritöö „Tesla Transformer for Experimentation and Research“.

5. Uurimismeetodid

Esmalt tutvutakse kirjandusega ning selgitatakse Tesla pooli tööpõhimõtet ja ajalugu. Saadud teadmiste alusel valitakse kõige töökindlam toitesüsteemi variant, mis seejärel ehitatakse valmis ja sobitatakse olemasoleva Tesla pooliga. Tulemuse edukus sõltub oluliselt kirjanduse läbitöötamisest, sest selle põhjal otsustatakse, milline peaks toitesüsteem täpselt välja nägema, ning toitesüsteemi valikust selgub, kas seade ka tööle hakkab. Seadme toimimist kontrollitakse katsete käigus. Katsete lisaeesmärgiks on saavutada võimalikult efektne töörežiim.

6. Graafiline osa

Töö sisaldab fotosid Tesla poolist enne toitesüsteemi taastamise alustamist ja pärast töö lõpetamist. Toimiva Tesla pooli saavutamisel on töös toodud ka fotod seadmest selle töötamise ajal. Töö esimeses osas on toodud Tesla pooli aseskeem(id). Fotod on plaanis paigutada töö põhiossa.

7. Töö struktuur

1. Tesla pooli tööpõhimõte

1.1. Ajaloost

1.2. Ehitus ja toimuvad protsessid

1.3. Erinevad lahendused töökindluse ja juhitavuse suurendamiseks.

2. Taastatava Tesla pooli andmed

2.1. Ajalugu

2.2. Parameetrid

3. Tesla pooli toitesüsteemi taastamine

3.1. Toitesüsteemi valik

3.2. Toitesüsteemi taastamine

3.3. Töötamise katsetamine

8. Kasutatud kirjanduse allikad

M. Denicolai, „Tesla Transformer for Experimentation and Research,“ doktoritöö, Dept. of Elect. and Comm. Eng., Helsinki Univ. of Tech., Espoo, Finland, 2001.

M. Tilbury, *The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide*. New York: The McGraw-Hill Companies, 2008. [Võrgumaterjal]. doi: 10.1036/0071497374

M. Behrend, *How a Tesla Coil works*. Kasutatud: märts. 5, 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://tayloredge.com/reference/Machines/TeslaCoil.pdf>

C. Gerekos, „The Tesla Coil,“ bakalaureusetöö, Physics Dept., Université libre de Bruxelles, Brüssel, Belgia, 2012.

9. Lõputöö konsultandid

Aare Baumer (Energia avastuskeskuse teadus- ja arendusjuht) – 2. peatüki koostamiseks.

10. Töö etapid ja ajakava

Kirjanduse läbitöötamine ja toitesüsteemi valiku tegemine (20. märts)

Kahe esimese peatüki kirjutamine (29. märts)

Toitesüsteemi valmisenhitamine (17. aprill)

Toitesüsteemi katsetamine (1. mai)

Töö esimene versioon valmis ja juhendajale saatmine (9. mai)

Töö lõplik versioon valmis (21. mai)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT.....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	10
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU.....	11
SISSEJUHATUS	13
1. ÜLDISELT TESLA POOLIST	14
1.1 Tesla pooli ajaloost	14
1.2 Tesla pooli ehitus ja tööpõhimõte	16
1.3 Töökindluse ja juhitavuse suurendamise võimalused	18
1.3.1 Vastastikuse induksiooni nähtus kolme induktiivpooliga	18
1.3.2 Kolme elektrodiga sädevahemik	19
1.3.3 Pöörlev sädevahemik	20
1.3.4 Pideva vahelduvvoolulaine kasutamine.....	20
1.3.5 Toide alalisvooluga.....	21
1.3.6 Juhtimine pooljuhtseadmetega	21
2. TAASTATAVA TESLA POOLI ANDMED.....	23
2.1 Ajalugu	23
2.2 Parameetrid	25
2.2.1 Sekundaarahela parameetrid.....	26
2.2.2 Primaarahela parameetrid	28
2.2.3 Sädevahemiku parameetrid	29
2.2.4 Filtri parameetrid	30
2.2.5 Toitesüsteem.....	31

3. TESLA POOLI TOITESÜSTEEMI TAASTAMINE.....	33
3.1 Toitesüsteemi valik	33
3.2 Toitesüsteemi taastamine.....	34
3.3 Tesla pooli katsetamine	37
3.4 Järeldused	40
KOKKUVÕTE	42
SUMMARY	44
KASUTATUD KIRJANDUS.....	45

EESSÕNA

Lõputöö teema ja idee pakkus välja Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi vanemlektor Paul Taklaja, kes oli ka valmis lõputöö tegemist juhendama. Suured tänud lähevad juhendajale ja kaasjuhendaja Ivar Kiitamile, kelle initsiatiivil äratati elektrimaterjalide ja kõrgepingetehnika loengutes ning praktikumides ellu luulepisik, mida väljendatakse järgneva luuletusega.

Tesla pool kui fenomen

Kord härra Tesla valgust soovis
ja uue trafo luua proovis
Sai seadmest üleilmne mood,
nimeks sai sel Tesla pool

Vaja kahte võnkeringi,
et kasvaks sisse antud pinge
Võnkeringis kondensaator,
lisaks poolile ka mootor

Kuid mootor ainult ahelas,
kus sädemik on olemas,
sest vaja jahutavat õhku,
et lahendi ei sulaks lohku

Kui stepslist anda peale pinge,
teeb tulemusest pea meil ringe
Näeb seda, mis on ülalpool,
kui jumal Thor on vihahoos.

Siis igal lapsel rõõmus meel,
sest tahaks seda näha veel.
Ei vanemadki pilku pööra,
ehkki lapsepõlv on läinud mööda.

Kui laps siis jõuab ülikooli,
ehk mäletab ta Tesla pooli
ja leiab selle eriala,
mida tänapäeva ilmas vaja.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

ρ	traadi eritakistus
C_p	primaarkondensaatori mahtuvus
C_s	sekundaarahela mahtuvus maa suhtes
C_{sp}	arvutuslik sekundaarpooli mahtuvus
C_{st}	arvutuslik toroidi ja maa vaheline mahtuvus
C_{su}	sekundaarahela mahtuvus maa suhtes uue toroidiga
C_{sv}	sekundaarahela mahtuvus maa suhtes vana toroidiga
CCPS	toitesüsteem kondensaatori laadimiseks (<i>capacitor charging power supply</i>)
D	sekundaarpooli diameeter
d	sekundaarpooli traadi läbimõõt
d_1	toroidi välisdiameeter
d_2	toroidi sisediameeter
f	võrgu nimisagedus
f_s	arvutuslik sekundaarahela resonantssagedus
f_{su}	sekundaarahela resonantssagedus uue toroidiga
H	sekundaarpooli kõrgus
IGBT	isoleeritud paisuga bipolaartransistor (<i>insulated-gate bipolaar transistor</i>)
I_s	trafo sekundaarvool
K	pooli mahtuvuse arvutamiseks vajalik konstant, mis oleneb kõrguse ja diameetri suhtest
k	primaar- ja sekundaarpooli vaheline sidestustegur
k_t	trafo ülekandesuhe
L_p	primaarinduktiivpooli induktiivsus
L_s	arvutuslik sekundaarinduktiivpooli induktiivsus
l_s	sekundaarpooli traadi pikkus
L_{TP}	koguinduktiivsus primaar- ja sekundaarpooli jadaühenduses
M	primaar- ja sekundaarpooli vaheline vastastikune induktiivsus
MOSFET	isoleeritud paisuga väljatransistor (<i>metal-oxide-semiconductor field-effect transistor</i>)
N	arvestuslik sekundaarpooli keerdude arv
N'	reaalne sekundaarpooli keerdude arv
P	trafo aktiivvõimsus
R	sekundaarpooli raadius
R_s	arvutuslik sekundaarpooli traadi takistus
Z	trafo takistus

U_1	trafo sisendpinge efektiivväärtus
U_2	trafo väljundpinge efektiivväärtus
U_{1n}	trafo primaarnimipinge
U_{2m}	trafo väljundpinge amplituudväärtus
U_{2n}	trafo sekundaarnimipinge
U_{ef}	vajalik kõrgepingetrafo sekundaarnimipinge
U_m	vajalik kõrgepingetrafo sekundaarnimipinge amplituudväärtus
U_p	primaarkondensaatorile rakendatud pinge
U_s	sekundaarahela mahtuvusele rakendatud pinge
W_p	energia, mida omab primaarkondensaator
W_s	energia, mida omab sekundaarahela ja maa vaheline mahtuvus

SISSEJUHATUS

Kaasaegses ühiskonnas pannakse tööstuses teadus- ja arendustegevusele järjest enam rõhku, sest toodete valmistamist on vaja muuta efektiivsemaks. Innovatsiooni põhjustajateks on muuhulgas mitmed seadused ja piirangud, sh keskkonnanõuded, mis nõuavad uute tehnoloogiliste lahenduste kasutuselevõttu. Tehnilistes tööstusharudes on uuenduste algatajad insenerid, kellelt tuleb idee ja teostus. Inseneri õpetavad ülikoolid, kus tehnilistele erialadele sisseastumisel tuleb kindlasti kasuks uudishimu oma eriala vastu. Juba üldhariduskoolide õpilastes peaks tekkima mingi huvi reaalainete vastu, et oleks soov tulevikus matemaatikat ja füüsikat sisaldavaid erialasid õppima minna. Selline loodusteaduste huvi võiks näiteks alguse saada töötava Tesla pooli nägemisest.

Käesoleva töö eesmärgiks on rekonstrueerida üks remonti vajav Tesla pool, et oleks võimalik seadet kasutada elektriliste nähtuste demonstreerimiseks. Selleks tuleb luua täiesti uus toitesüsteem, ühildades see Tesla pooli olemasolevate komponentidega. Uue toitesüsteemi valmistamiseks tuleb esmalt tutvuda Tesla pooli tööpõhimõtte ja silmaringi laiendamiseks ka ajalooaga. Seejärel tuleb teha kindlaks kõigi olemasolevate komponentide parameetrid, et nende põhjal saaks määrata sobiva toitesüsteemi konfiguratsiooni ja vajaminevad detailid. Uus lahendus võiks olla võimalikult lihtne ja töökindel, et vältida võimalikke rikkeid.

Remonditav Tesla pool on valmistatud 2001. aastal Soomes doktoritöö tulemusena, kuid lõpetas talitlemise toitesüsteemis esinenud vea tõttu. Esialgne toitesüsteem oli küllaltki keeruline, sest Tesla pooli üheks kasutusala oli teaduslike mõõtmiste tegemine. Antud Tesla pooli on püütud vähemalt korra teoreetiliselt parandada, kui selle kohta tegi bakalaureuseastme lõputöö Aivo Joost pealkirjaga „Tesla kõrgepingegeneraatori modifitseerimine“. Nimetatud töös leiti toitesüsteemis esinenud viga ja püüti seda parandada ehitades prototüübi, mida katsetati Tesla poolist eraldiseisvalt. Reaalselt töötavat Tesla pooli selle lõputöö valmimisel ei järgnenud.

Käesoleva töö esimeses peatükis antakse ülevaade Tesla pooli leiutajast Nikola Teslast ja seadme ajaloo kohta. Samuti tutvustatakse klassikalises Tesla poolis toimuvaid füüsikalisi protsesse ja tuuakse välja erinevad tehnilised lahendused, mis klassikalist Tesla pooli täiustavad. Töö teises peatükis tuuakse välja remonti vajava Tesla pooli ajalugu ja parameetrid ning selgitatakse, kuidas sellised parameetrid on varasemalt leitud. Ajalugu illustreerivad erinevad pildid Tesla poolist. Töö kolmandas peatükis valitakse uue toitesüsteemi konfiguratsioon ja arvutatakse uute komponentide valimiseks vajalikud parameetrid. Samuti tuuakse välja uue toitesüsteemiga tehtud katsetuste tulemused ja pildid.

1. ÜLDISELT TESLA POOLIST

Tesla pool on seade, mis suudab toota kõrge sagedusega vahelduvvoolu ja kõrgeid potentsiaale, mis võivad ulatuda mitmete megavoltideni [1]. Eesti keeles võib seadet nimetada mitmeti: Tesla pool, Tesla trafo, Tesla generaator, Tesla transformaator [2, 3, 4].

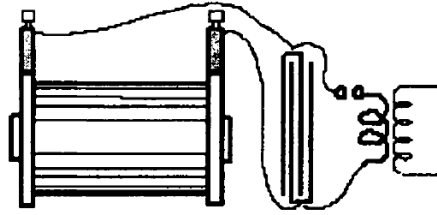
1.1 Tesla pooli ajaloost

Tesla pooli leiutajaks on 1856. aastal Serbias sündinud ja suurema aja oma elust Ameerika Ühendriikides veetnud paljude revolutsiooniliste leiutistega tuntuks saanud Nikola Tesla. Tesla sai oma esimesed tehnilised teadmised Grazist, Austriast, kust edasi ta liikus Praha ülikooli. Õpingute lõppedes suundus ta tööle Budapesti, kus leiutas enda asünkroonmootori ja vahelduvvoolul põhineva elektrisüsteemi. Peale kaheaastast Pariisis viibimist sai ta 1884. aastal töökoha Thomas Alva Edisoni firmas New Yorgis, kus tema ülesandeks oli alalisvooludünamode ja -mootorite ehitamine. Erimeelsused Edisoniga sundisid Tesla aga lahkuma ja moodustama enda firma. [5]

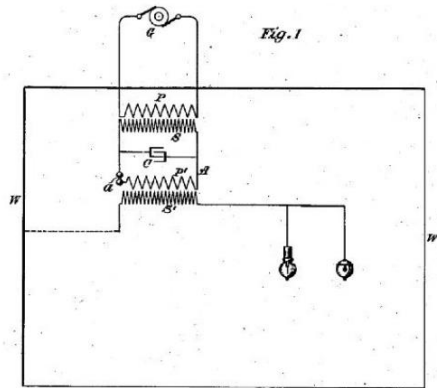
Tesla Electric Company abil realiseeris Nikola Tesla paljud enda ideed ja ehitas valmis mootorite, generaatorite ja trafode mudelid. 1889. aastal leppisid Tesla ja George Westinghouse kokku, et Tesla patente kasutades ehitatakse valmis vahelduvvoolumootorid suure elektrisüsteemi jaoks. Selline süsteem valmis 1895. aastal Niagara Fallsis, põhinedes madala sagedusega vahelduvvooludele ja mitmefaasilisele pingesüsteemile. [5]

1889. aasta lõpuks suundus Tesla tagasi New Yorki ja hakkas oma laboratooriumis katseid tegema kõrgsagedusgeneraatoriga, sest kõrgemate sageduste uurimine oli mootorite ehitamisel perspektiivikas. Ta kordas Heinrich Hertzi katseid, kuid avastas peagi, et generaator ei suuda pöörlemissagedust konstantsena hoida ning seade ei ole kõrgete sageduste tekitamiseks piisavalt töökindel. Töökindlama süsteemi otsingul kaalus ta mitmeid variante, kuid lõpuks avastas, et William Thomson ehk Lord Kelvin oli 1856. aastal välja pakkunud idee, mis seisnes kondensaatori laengu kasutamisel. [6]

1891. aastal antud loengus tutvustas ta enda ideed õhksüdamikuga trafost, mis oli ühendatud kõrgsagedusgeneraatori, sädevahemiku ja kondensaatoriga (vt Joonis 1.1). Trafo primaarpooliga ühendatud vooluring töötas resonantsis sekundaarpoolega. Demonstreerides enda ehitatud seadet, suutis see tekitada üle 12 cm pikkuseid sädelahendusi [6]. Seda peetakse esimeseks valmis ehitatud Tesla pooliks ning Tesla ka patenteeris selle samal aastal (vt Joonis 1.2). Tesla sõnul oli pooli eesmärk ühe elektroodiga vaakumlampide abil valgustuse tekitamine. [5]

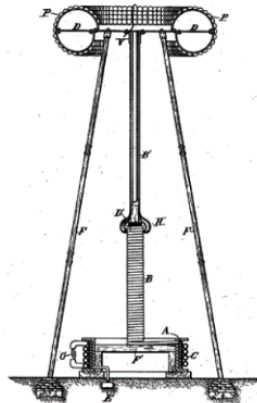


Joonis 1.1 1891. aasta loengus esitletud joonis Tesla poolist [5]



Joonis 1.2 1891. aasta patendis esitletud joonis vaakumlampide abil valguse tekitamisest [7]

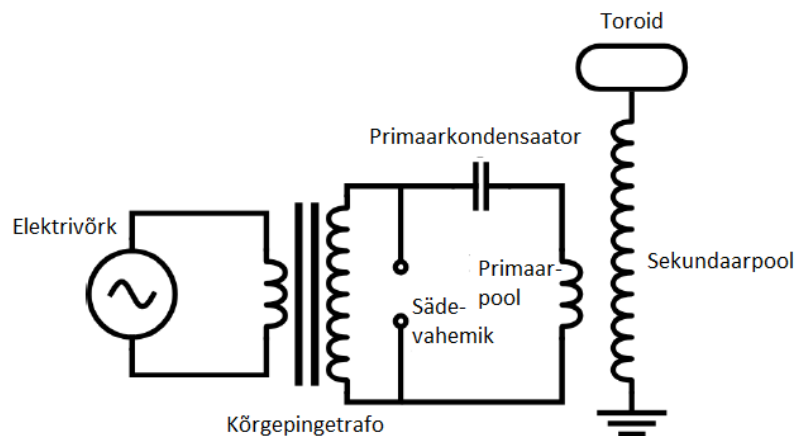
Järgnevatel aastatel katsetas Tesla mitmekümneid vooluringide variatsioone, kuid patenteeris neist vaid mõned. 1892. aastal Londonis ja Pariisis antud loengutes mainis ta enda mõtet, et energiat saaks üle kanda juhtmeteta läbi õhu. See mõte sai tema kinnisideeks ning juba järgmisel aastal andis ta loengu, mida võib pidada raadiotehnikale alust panevaks. Alates sellest loengust algas võidujooks radio leiutamiseks. 1897. aastal andis ta sisse kaks patenti elektromagnetlainete ülekandmise kohta (vt Joonis 1.3). Olgugi, et Tesla suutis esimesena genereerida raadiolaine, ehitasid Guglielmo Marconi ja Aleksandr Popov kumbki varem valmis raadiolainete edastamise ja vastuvõtmise seaded, mistõttu peetakse kord ühte, kord teist radio leiutajaks. [5]



Joonis 1.3 Joonis 1897. aasta patendist juhtmevabalt energia ülekandmise kohta [7]

1.2 Tesla pooli ehitus ja tööpõhimõte

Klassikaline Tesla pool koosneb kõrgepingetrafast, sädevahemikust, primaarkondensaatorist, primaarinduktiivpoolist, sekundaarinduktiivpoolist ja toroidikujulisest mahtuvuslikust elektroodist (vt Joonis 1.4) [7]. Kõrgepingetrafo laeb vahelduvpingega primaarkondensaatorit [7]. Tesla pooli töötamise seisukohalt ei ole oluline, kas laadimine toimub positiivsel või negatiivsel poolperioodil [8]. Laadimine toimub seni, kuni kondensaatori plaatide vahele tekib selline laeng, et sädevahemiku elektrodide vahele tekkiv vastav potentsiaalide vahe on piisav õhu läbilöögiks [7]. Kõige efektiivsemalt töötamiseks peab sädevahemiku läbilöök toimuma hetkel, kui kondensaatori laeng on maksimaalse väärtusega [8]. Õhu läbilöögi tõttu muutub sädevahemik juhtivaks ehk trafo lühistub ning kondensaator hakkab ennast läbi primaarpooli tühjaks laadima [7]. Tekib kondensaatorit ja induktiivpooli sisaldav võnkering, mis töötab pingeresonantsis ehk pinged kondensaatoril ja poolil on suuruselt võrdsed ja kompenseerivad teineteist [9]. Resonantsi korral toimub magnetvälja ja elektrivälja vahel pidev energia võnkumine [9]. Kondensaatori maksimaalsel pingel ja pooli voolu nullväärtusel omab kogu ahela energiat elektriväli, vastupidisel juhul magnetväli [9]. Võnkumine toimub resonantssagedusel, mis on tavaliselt piirides 50 – 400 kHz [7].



Joonis 1.4 Klassikalise Tesla pooli skeem [8]

Kondensaatori laengu mahalaadimisel tekib primaarpoolis suure voolu toimel magnetväli, mis indutseerib sekundaarpooli elektromotoorjõu. Sekundaarpool moodustab koos toroidiga võnkeringi, mis hakkab resonantssagedusel võnkuma. Sekundaarpoolil hakkab võnkumiste amplituud suurenema, sest primaar- ja sekundaarvõnkeringide omavõnkesagedused on lähedased ja võnkumised toimuvad samas faasis. Samal ajal kui sekundaarpoolil võnkumiste amplituud tõuseb, siis primaarvõnkeringi võnkumiste amplituud väheneb, mis on põhjustatud energia ülekandest sekundaarpoolile. Võnkumiste amplituudi kasvamine tekitab toroidi ja maa vahele väga suure pinge. [10]

Kui kogu kondensaatori energia on üle kantud sekundaarpoolele, siis sädevahemiku elektriikaare kustumise asemel algab energia ülekanne tagasi primaarpoolele ehk toimub primaarpinge ja -voolu võnkumiste amplituudi suurenemine. Selle põhjuseks on sädevahemikus olev liialt ioniseeritud õhk, mis ei lase elektriikaarel kustuda. Kui kogu energia on primaarpoolele üle kantud, siis hakkab energia jälle sekundaarpoolele kanduma. Selline energia võnkumine võib toimuda mitmeid kordi, kuni pingekadu on nii suur, et kaare taassüttimist enam ei toimu. [10]

Kui elektriikaar kustub, siis kogu allesjäänud energia on sekundaarpoolel. Toroidi elektrivälja on tavaliselt piisav, et põhjustada ümbritseva õhu läbilööki ja koroonalahenduse tekkimist. Ahela energia kulub õhu soojendamiseks ja valguse tekitamiseks, kuid piisava energia olemasolul tekib liiderlahendus toroidi ja maa vahel. Liiderlahendus kannab allesjäänud energia maasse ning seejärel kordub kogu protsess uuesti ehk kondensaatorit hakatakse uuesti täis laadima. [7]

Tesla pooli ülekandesuhte saab välja arvutada, kui on teada Tesla pooli parameetrid. Energia, mille saab primaarkondensaator, sõltub pingest:

$$W_p = \frac{1}{2} C_p U_p^2 \quad (1.1)$$

kus W_p – primaarkondensaatori energia, J,
 C_p – primaarkondensaatori mahtuvus, F,
 U_p – kondensaatorile rakendatud pinge, V. [7]

Sekundaarpoolel oleva toroidi energia arvutamiseks on eelnevaga sarnane valem:

$$W_s = \frac{1}{2} C_s U_s^2 \quad (1.2)$$

kus W_s – toroidi energia, J,
 C_s – toroidi mahtuvus, F,
 U_s – toroidile rakenduv pinge, V. [7]

Lihtsustamise eesmärgil võib arvestada, et energia ülekandel kaod puuduvad, sellel juhul võrdub primaarkondensaatori energia sekundaarkondensaatori energiaga:

$$\frac{1}{2} C_p U_p^2 = \frac{1}{2} C_s U_s^2 \quad [7] \quad (1.3)$$

Primaar- ja sekundaarpinge suhe väljendub:

$$\frac{U_s}{U_p} = \sqrt{\frac{C_p}{C_s}} \quad [7] \quad (1.4)$$

Kuna primaarinduktiivsuse ja -mahtuvuse korrutis võrdub sekundaarinduktiivsuse ja -mahtuvuse korrutisega:

$$L_p C_p = L_s C_s \quad (1.5)$$

kus L_p – primaarpooli induktiivsus, H,

L_s – sekundaarpooli induktiivsus, H, [7]

siis võib ülekandesuhet väljendada ka teisiti: [10]

$$\frac{U_s}{U_p} = \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} \quad (1.6)$$

Primaar- ja sekundaarahela vahelise induktiivse sidestuse määrab ära sidestustegur k . Sidestustegur näitab, kui palju energiat kantakse ühe induktiivpooli poolt tekitatava elektromagnetvälja abil üle teisele induktiivpoolile. Sidestustegur varieerub nullist üheni ning oleneb poolide enda induktiivsusest ja vastastikusest induktiivsusest:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (1.7)$$

kus M – vastastikune induktiivsus, H. [11]

Tesla pooli induktiivpoolide vastastikune induktiivsus:

$$M = \frac{|L_{TP} - (L_p + L_s)|}{2} \quad (1.8)$$

kus L_{TP} – koguinduktiivsus poolide jadaühenduses, H. [7]

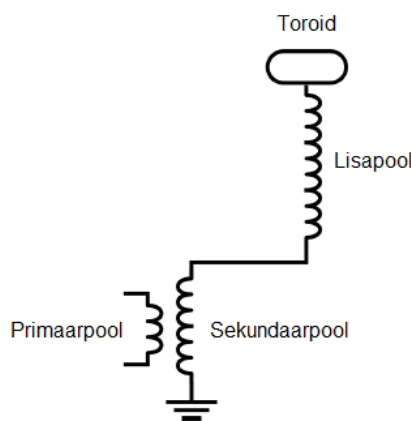
1.3 Töökindluse ja juhitavuse suurendamise võimalused

Eelnevalt kirjeldatud Tesla pooli skeem kujutab endast kõige lihtsamat ja levinumat varianti antud seadmest. Tesla pooli paremaks juhtimiseks, efektiivsuse suurendamiseks ja suurema väljundpinge saamiseks on loodud erinevaid lahendusi, millest peamised on selles alapeatükis välja toodud.

1.3.1 Vastastikuse induktsiooni nähtus kolme induktiivpooliga

Kolme induktiivpooliga skeemi katsetas esimesena Nikola Tesla, kes nimetas seda võimendavaks saatjaks (*magnifying transmitter*). Tema eesmärgiks oli juhtmevabalt edastada signaale või sõnumeid. [6]

Kolme induktiivpooliga skeem erineb kahe pooliga skeemist selle poolest, et toroidi ja sekundaarpooli vahele on pandud lisainduktiivpool (vt Joonis 1.5). Reaalsuses tähendab see seda, et enamik sekundaarpoolist on viidud primaarpoolist kaugemale, et selle magnetväli ei saaks kaugemal olevat pooli mõjutada. Sageli on kahe induktiivpooliga Tesla pooli poolt tekitatav potentsiaal toroidi kõrgusest maapinnast, kuna toroidile lähedal olev primaarpool ja maandatud osad põhjustavad liiderlahenduse tekke liiga vara ja potentsiaal ei saa suuremaks tõusta. Kolme pooliga seade suudab võrreldes klassikalise seadmega tekitada tunduvalt pikemaid liiderlahendusi, pikkus on lisapooli kaugusest maandatud osadest. [7]



Joonis 1.5 Kolme induktiivpooliga Tesla pooli skeem [8]

Primaar- ja sekundaarpooli vaheline potentsiaalide tõus sõltub sarnaselt jõutrafole keerdude arvu suhtest, kuid lisapoolis toimub potentsiaalide tõus endiselt vastastikuse induktiivsuse tõttu. Lisapooliga seadme miinuseks on efektiivse poolide vahelise vastastikuse induktiivsuse tagamise vajadus, mille tarvis on vaja head isolatsiooni ja pöörlevat sädevahemikku, et ülekantav energia ei väljenduks vaid kadudena. [7]

Skeemi saab veelgi täiustada, kui ühendada primaar- ja sekundaarpoolid jadamisi, selline ühendus töötab nagu autotrafo. Skeemi eeliseks on poolide vahelise isolatsiooni puudumine, mis tähendab rahalist kokkuhoidu ja seadme lihtsamat ehitamist. [7]

1.3.2 Kolme elektroodiga sädevahemik

Tööstuslikult toodetud sädevahemikud sisaldavad sageli kolmandat elektroodi, mis põhjustab sädevahemikus esmase ionisatsiooni ja hõlbustab seetõttu dielektriku läbilööki. Kolmanda elektroodiga saab juhtida elektrikaare taassüttimise sagedust ja kiirust. Sädevahemiku juhtimine aitab kontrollida kondensaatori laengu suurust, mis kokkuvõttes mõjutab tekkiva potentsiaali suurust. [7]

1.3.3 Pöörlev sädevahemik

Klassikalise Tesla pooli skeemis on sädevahemik staatiline ja asub mingis dielektrilises keskkonnas, üldjuhul õhus. Selline sädevahemik võib primaarahelas voolava liiga suure voolu mõjul üle kuumeneda. Seetõttu on arendatud võimsamate Tesla poolide tarvis paremaid lahendusi. [7]

Sädevahemiku jahutamiseks kasutatakse vett või ventilaatoreid. Ka kasutatakse mitmetest sädevahemikest koosnevaid jadaühendusi, et kuumust nende vahel paremini jaotada. Mitmete sädevahemike kasutamine põhjustab aga läbilöögipinge suuremat varieerumist. Tesla pooli töötamiseks on vaja tagada sädevahemiku läbilöök, aga ka kustumine ja mingi aja jooksul taassüütmise vältimine. Taassüütmist välditakse dielektriku pideva uuendamisega, sädevahemikust eemaldatakse ioniseeritud õhku suruõhuga või vaakumi abil. [7]

Eelnevalt nimetatud probleeme saab koos lahendada ühe nutika meetodiga, milleks on pöörlev sädevahemik. Pöörlev sädevahemik koosneb statsionaarsetest ja nende suhtes liikuvatest elektrodidest. Õhu läbilöök toimub hetkel, kui statsionaarne elektrood ja liikuv elektrood on teineteisest minimaalsel kaugusel. Paigal olevate elektrodide jahutamiseks saab kasutada jahutusradiaatorit, pöörlevad elektrodid jahtuvad õhu käes liikumisel ise. Piisavalt suuritel kiirustel vahetub elektrodide vaheline dielektrik iseenesest ja eraldi õhku liigutavat seadet vaja ei lähe. [7]

1.3.4 Pideva vahelduvvooluline kasutamine

Klassikaline Tesla pool töötab primaarpooli sisenevate regulaarsete vooluimpulsside abil, mis põhjustavad primaarvooluringis energia võnkumise pooli ja kondensaatori vahel. Tesla pooli primaarpooli saab aga toita ka ostsillaatori kaudu, mis võimendab sisenevat signaali. Sellisel juhul puudub vajadus sädevahemiku järele. Ostsillaator tekitab sekundaarpooles pideva vahelduvpingelaine, mida saab edukalt mitmete katsete puhul rakendada. [7]

Ostsillaatorid kuuluvad elektrooniliste võimendite hulka. Tesla pooli toiteks kasutatakse A-, B- ja C-klassi võimendeid. A-klassi võimendi sisaldab transistori, mis opereerib sisendsignaali kogu perioodi ulatuses [12]. B-klassi võimendi sisaldab kahte transistori, millest üks talitleb positiivse poolperioodi ulatuses ja teine negatiivse poolperioodi ulatuses [12]. A- ja B-klassi võimenditega saavutatakse maksimumpotentsiaal, kui Tesla pooli primaar- ja sekundaarpoole ekvivalentsed näivtakistused on võrdsed [7]. Sekundaarpoole energia moodustab ligikaudu pool seadmesse antavast energiast [7]. C-klassi elektrooniline võimendi sisaldab ainult ühte transistori, mis talitleb ainult mingis

poolperioodi vahemikus [12]. C-klassi võimenditega on võimalik vähendada kadusid ja saavutada umbes 80 protsendiline energia ülekanne [7].

Tesla pooli jaoks kasutatava ostsillaatori kõige olulisemaks osaks on vaakumtoru, mis töötab nagu lüliti. Vaakumtoru kas laseb primaarpoolel voolu läbi või ei lase. Lülitamiste sagedus peab olema sama, mis sekundaarvõnkeringi resonantssagedus. Kui vool läbib primaarpooli, siis selle magnetväli mõjutab nii sekundaarpooli kui ka induktiivpooli, mis on mõeldud tagasiside andmiseks vaakumtorule. Tagasiside abil saavutatakse lülitamiste täpne sagedus ehk resonantssagedus. [13]

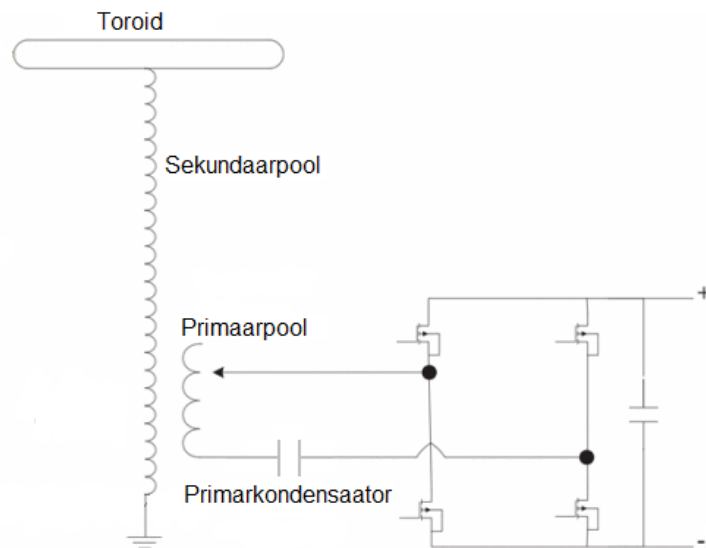
Pideva voolulainega töötavate Tesla poolide puudused on silmaga märgatavad. Sama toitepinge ja pooli parameetrite juures suudavad sädevahemikega Tesla poolid toota kõrgemat potentsiaali kui siinuspingega töötavad Tesla poolid, seega viimaste tekitatud liiderlahendused ei ole nii vaatamängulised. [7]

1.3.5 Toide alalisvooluga

Vahelduvpingetrafo asemel võib toiteallikana kasutada ka alalispingeallikat. Alalispinge eelis vahelduvpinge ees on konstantsus. Vahelduvpinge korral oleneb primaarkondensaatori laadimispinge toitevoolu suurusest, toitepinge hetkväärtusest ja sädevahemiku läbilöögipingest ning elektrikaart põhjustav pinge on kondensaatori raskesti määratava laengu tõttu erineva väärtusega. Teadustöödeks kasutatava Tesla pooli jaoks on oluline, et kondensaatori laeng oleks iga sädevahemiku läbilöögi korral sama väärtusega, mis on saavutatav vaid alalisvoolutoitega. [7]

1.3.6 Juhtimine pooljuhtseadmetega

Kõige lihtsam viis alalispingetoitega Tesla pooli sisendpinget juhtida on kasutada autotrafot. Autotrafost väljuv vahelduvpinge muundatakse alaldi abil alalispingeks, mis laeb primaarkondensaatorit. Keerulisem moodus on kasutada transistore või türistore, mis toimivad autotrafo, alaldi ja sädevahemiku asemel. Kui traditsiooniline Tesla pool vajab toiteks kõrgepingetrafoot, siis transistorjuhitavates Tesla poolides tekitatakse kondensaatori laadimiseks vajalik vahelduvpinge pooljuhtseadmete lülitustega. Sellist seadet toidetakse võrgupingega, mis muundatakse pooljuhtlülituse abil kõrgete väärtustega alalispingeimpulssideks. Enamasti kasutatakse transistoride pool- või täissildlülitusi, mis nõuavad vastavalt kahte või nelja IGBT või MOSFET tüüpi transistori (vt Joonis 1.6). Transistoride kaitseks lisatakse skeemi diodid. [14]



Joonis 1.6 Täissildlülitusega Tesla pool [1]

Võrreldes traditsioonilise Tesla pooliga, ei vaja transistorjuhitav Tesla pool kõrgepingetrafoot, mis on mürarikas ja mõjutab tugevalt ümberkaudseid elektroonikaseadmeid. Samuti on pooljuhtseadmetega Tesla pool efektiivsem ehk väiksemate kadudega. Kõige olulisemaks eeliseks on hea juhitavus ehk on võimalik mõjutada primaarkondensaatori laengut ja seeläbi ka tekkivat potentsiaali sekundaarahelas. Erinevate skeemi konfiguratsioonidega saab luua erineva pikkuse ja tihedusega liiderlahendusi ning vajadusel ka muusikat mängida. [14] Heli tekib toroidi ümbritseva õhu soojenemisest ja jahtumisest, mis põhjustab õhu paisumist ja kokku tõmbumist ehk helilainete tekkimist. Õhu temperatuur oleneb Tesla pooli võimsusest, mida saab reguleerida Tesla pooli sisendpinge moduleerimisega. [15]

Töökindla transistorjuhitava Tesla pooli ehitamine on küllaltki keeruline, kui puuduvad vajalikud teadmised jõuelektroonikast. Pooljuhtseadmed võivad olla küllalki kallid, mis muutub oluliseks siis, kui skeemi konfiguratsioonis ja arvutamisel tehakse vigu ning katsetamise käigus tuleb komponente välja vahetada. [14]

2. TAASTATAVA TESLA POOLI ANDMED

Selles peatükis käsitletakse remonti vajava Tesla pooli ehitusajalugu ja paiknemise asukohti ning tutvustatakse vana toitesüsteemiga töötava seadme ja uue toitesüsteemiga töötava Tesla pooli parameetreid.

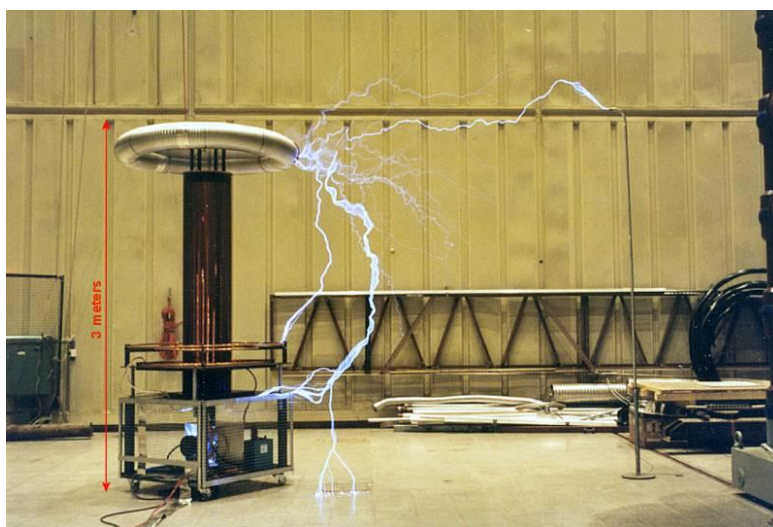
2.1 Ajalugu

Remonti vajav Tesla pool (vt Joonis 2.1) valmis 2001. aastal Marco Denicolai doktoritöö raames Espoos, Soomes. 1999. aasta alguses alustati Helsingi tehnikaülikoolis projektiga Thor, mille eesmärgiks oli ehitada keskmise suurusega Tesla pool, mida kasutades saaks läbi viia suure täpsusega mõõtmisi ja mida saaks kasutada erinevate uurimuste jaoks. Tööülesandeks oli seadet mõjutavate tundmatute parameetrite hulga minimeerimine. [16]



Joonis 2.1 Taastatav Tesla pool Energia avastuskeskuses

1999. aasta aprilliks valiti toitesüsteemi konfiguratsioon ja juuliks oli toitesüsteem 5 kV tasemel suuteline töötama. Järgmise aasta märtsiks täiustati toitesüsteemi nii palju, et see suutis töötada 10 kV-ga. Aprillis valmis sekundaarpool, mais sai valmis primaarpool ja toroid ning toitesüsteem suutis töötada 20 kV tasemel. Oktoobris saabus Ameerika Ühendriikidest pöörlev sädevahemik ja novembriks suudeti Tesla pool esimest korda talitlema panna. 14,7 kV välja andev toitesüsteem suutis tekitada 2,5 meetri pikkuseid liiderlahendusi. 2001. aasta alguses suudeti Tesla pooliga luua kolme meetri pikkuseid lahendusi (vt Joonis 2.2) ning toitesüsteemi pingeks oli sel hetkel 18,3 kV. [16]



Joonis 2.2 Tesla pooliga tekitatud 3 meetri pikkused elektrilahendused [16]

Algselt Helsingi Tehnikaülikooli kõrgepingelaboris asunud seadme uueks omanikuks sai peale kolme ülikooli (Helsingi Tehnikaülikool, Helsingi Majandusülikool ja Helsingi Kunsti- ja Disainiülikool) ühinemist Aalto Ülikool, kuid Tesla pooli asukoht jäi samaks. Peale Aalto Ülikooli labori sulgemist toodi seade Tallinna Tehnikaülikooli kõrgepingelaborisse, kust see omakorda toimetati Energia avastuskeskusesse. Energia avastuskeskuses vahetati seadme toroid uue vastu (vt Joonis 2.3). Kuna toitesüsteemis esines rike ja Tesla pool polnud töökorras, siis eksponeeriti külastajatele ainult seadme ehitust.



Joonis 2.3 Marco Denicolai poolt paigaldatud vana toroid (vasakul) ja Energia avastuskeskuses paigaldatud uus toroid [16]

2.2 Parameetrid

Vana toitesüsteemiga töötava kui ka uue Tesla pooli olulisemad elektrilised parameetrid ja gabariidid on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Tesla pooli tehnilised andmed [7]

Seadme osa	Parameeter	Vana väärtus	Uus väärtus
Toide	Pinge, kV	0...20	0...14,14
	Võimsus, kW	5	-
	Võimsus, kVA	-	0,64
Primaarahel	Mahtuvus, μF	0,0967	0,0967
	Induktiivsus, μH	62, max 99,1	62, max 99,1
	Resonantssagedus, kHz	63,92	63,5
Sekundaarahel	Kõrgus, cm	150	150
	Läbimõõt, cm	40	40
	Mahtuvus, pF	84,8	56,1
	Induktiivsus, mH	80,2	80,2
	Resonantssagedus, kHz	65,56	75
Toroid	Väline läbimõõt, cm	150	-
	Sisemine läbimõõt, cm	20	-
	Mahtuvus, pF	57	28,3

Marco Denicolai valis osa Tesla pooli parameetreid vabalt ja osa parameetreid arvutas. Parameetrite järgi ehitati valmis Tesla pool ning mõõtmistega kontrolliti arvutatud parameetrite vastavust reaalsete mõõtetulemustega. [7]

Järgnevalt on kirjeldatud erinevate Tesla pooli komponentide leidmist nii Marco Denicolai poolt kui uue toitesüsteemiga Tesla pooli tarbeks.

2.2.1 Sekundaarahela parameetrid

Sekundaarpooli kõrguse valis Marco Denicolai vabalt, võttes selleks 150 cm. Pooli diameeter 40 cm valiti vastavalt kõrguse ja diameetri suhte 4:1 järgi, kuna sellise suhtega Trafo poolid on madala omamahtuvusega. Traadi diameeter:

$$d = \frac{H}{N} = \frac{1500}{1000} = 1,5 \text{ mm} \quad (2.1)$$

kus d – traadi läbimõõt, mm,

H – sekundaarpooli kõrgus, mm,

N – keerdude arv. [7]

Arvestati, et 1,5 mm vasktraadiga saab realselt kerida umbes 970 keerdu. Arvutati vajamineva traadi pikkus:

$$l_s = 2\pi RN' = 2\pi \cdot 0,2 \cdot 970 = 1219 \text{ m} \quad (2.2)$$

kus l_s – traadi pikkus, m,

R – sekundaarpooli raadius, m,

N' – korrigeeritud keerdude arv. [7]

Traadi aktiivtakistus:

$$R_s = \rho \frac{l_s}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} = 0,017 \frac{1219}{\pi \left(\frac{1,5}{2}\right)^2} = 11,7 \Omega \quad (2.3)$$

kus R_s – arvutuslik traadi takistus, Ω ,

ρ – traadi eritakistus, $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$. [7]

Sekundaarpooli arvutuslik induktiivsus:

$$L_s = \frac{R^2 N'^2}{2540 \cdot (9R + 10H)} = \frac{20^2 \cdot 970^2}{2540 \cdot (9 \cdot 20 + 10 \cdot 150)} = 88,2 \text{ mH} \quad (2.4)$$

kus L_s – arvutuslik sekundaarpooli induktiivsus, mH. [7]

Induktiivpool omab ka mingit keerdudevahelist mahtuvust, selle leidis Denicolai järgnevalt:

$$C_{sp} = KD = 0,695 \cdot 40 = 27,8 \text{ pF} \quad (2.5)$$

kus C_{sp} – arvutuslik sekundaarpooli mahtuvus, pF,

K – konstant, mis oleneb kõrguse ja diameetri suhtest,

D – sekundaarpooli diameeter, cm. [7]

Sekundaarahela toroidi mahtuvus:

$$C_{st} = 2,8 \left(1,2781 - \frac{d_2}{d_1} \right) \sqrt{0,1217 d_2 (d_1 - d_2)} =$$

$$= 2,8 \left(1,2781 - \frac{20}{150} \right) \sqrt{0,1217 \cdot 20 (150 - 20)} = 57 \text{ pF} \quad (2.6)$$

kus C_{st} – arvutuslik toroidi mahtuvus, pF,

d_2 – toroidi sisediameeter, cm,

d_1 – toroidi välisdiameeter, cm. [7]

Mahtuvuse ja induktiivsuse põhjal leidis doktor Denicolai sekundaarahela eeldatava resonantssageduse:

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s(C_{sp} + C_{st})}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{88,2 \cdot 10^{-3} (27,8 \cdot 10^{-12} + 57 \cdot 10^{-12})}} = 58200 \text{ Hz} = 58,2 \text{ kHz} \quad (2.7)$$

kus f_s – arvutuslik sekundaarahela resonantssagedus, Hz. [7]

Pärast sekundaarpoole parameetrite väljaarvutamist kontrollis ta neid mõõtmistega. Mõõtmistel saadi sekundaarpooli induktiivsuseks 80,22 mH ja sekundaarvõnkeringi resonantssagedusi leiti kolm: 65,56; 220,2 ja 344 kHz [7]. Resonantssagedusi on mitu, kui sidestatud ahelate sumbuvus on piisavalt väike, et resonantsikõveratel $I_1 = F_1(f_r)$ ja $I_2 = F_2(f_r)$ on mitu maksimumi ja miinimumi [9]. Seega resonantssageduste väärtused sõltuvad ahelates voolavatest vooludest. Eelnevad parameetrid olidki sekundaarahela reaalsed parameetrid [9].

Energia avastuskeskuses paigaldati seadmele aga uus toroid ning seega oli antud bakalaureusetöö raames vaja määrata uus sekundaarahela mahtuvuse väärtus. Sekundaarpoole induktiivpooli mahtuvus jäi samaks. Sekundaarahela mahtuvuse leidmiseks mõõdeti signaaligeneraatoriga sekundaarahela resonantssageduse väärtusi ning leiti eelnevalt mõõdetud primaarahela resonantssagedustele lähim väärtus, milleks osutus 75 kHz. Sekundaarpoole resonantssageduse abil leiti kogu sekundaarpoole mahtuvus:

$$C_{su} = \frac{1}{(2\pi f_{su})^2 L_s} = \frac{1}{(2\pi \cdot 75000)^2 \cdot 80,22 \cdot 10^{-3}} = 56,1 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 56,1 \text{ pF} \quad (2.8)$$

kus C_{su} – uus sekundaarahela mahtuvus, pF,

f_{su} – uus sekundaarahela resonantssagedus, Hz.

Uue toroidi paigaldamisega muutus toroidi ja ka kogu sekundaarpoole mahtuvus 28,7 pF võrra väiksemaks:

$$C_{sv} - C_{su} = (C_{sp} + C_{st}) - C_{su} = (27,8 + 57) - 56,1 = 28,7 \text{ pF} \quad (2.9)$$

kus C_{sv} – sekundaarpoole mahtuvus eelmise toroidiga, pF.

2.2.2 Primaarahela parameetrid

Primaarkondensaatori mahtuvuseks valis Marco Denicolai kogemuse põhjal 0,1 μF , mille alusel telliti joonisel 2.4 olev kondensaator.



Joonis 2.4 Tesla pooli primaarkondensaator

Kuna Tesla pool töötab kõige efektiivsemalt, kui resonantssagedused on võrdsed, siis vastavalt sellele arvutas ta vajaliku primaarpooli induktiivsuse, kasutades arvutuslikku sekundaarvõnkeringi resonantssagedust.

$$L_p = \frac{1}{C_p} \left(\frac{1}{2\pi f_s} \right)^2 = \frac{1}{0,1 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{1}{2\pi \cdot 58,2 \cdot 10^3} \right)^2 = 74,8 \cdot 10^{-6} \text{ H} = 74,8 \mu\text{H} \quad (2.10)$$

kus L_p – primaarpooli induktiivsus, H,

C_p – primaarkondensaatori mahtuvus, F. [7]

Primaarpooli traadi läbimõõduks valis seadme autor 8 mm. Keerdude arvuks valiti 9,5, sest 9 keeru induktiivsuseks saadakse arvutamise teel 85,8 μH ning poole keeru võrra mähise suurendamine võimaldab induktiivsuse piisavat reguleerimist. Doktoritöö raames oli primaarpooli lõplikuks keerdude arvuks seatud 7,5 keerdu, millest olenes pooli induktiivsus ja selle tõttu ka resonantssagedus. Kasutades 7,5 keerdu primaarpoolist, mõõdeti pooli induktiivsuseks umbes 62 μH ning leiti primaarresonantssagedus 63,92 kHz, mis tähendas, et Denicolai oli Tesla pooli kahe võnkeringi resonantssagedused seadnud praktiliselt võrdseks: [7]

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{62 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}} = 63,92 \text{ kHz} \quad (2.11)$$

Primaarpooli kõrgus alumise kasti laest oli 245 mm, mis määras ära kahe pooli vahelise sidestusteguri väärtuse (0,187). [7]

Olgugi, et antud lõputöö raames primaarparameetreid ei muudetud, tehti signaaligeneraatoriga kordusmõõtmine, millest selgus, et primaarresonantssagedusi on vähemalt kolm: 63,5; 79,5 ja 229,6 kHz. Mõõtmisel saadud sagedus 63,5 kHz ja arvutatud resonantssagedus erinevad vaid 0,6 protsendi võrra.

Primaarinduktiivpool oli Energia avastuskeskuses seatud 185 mm kõrgusele alumisest kastist ja sellest sai Marco Denicolai töö põhjal järgmised parameetrite väärtused:

- jadaühenduses primaar- ja sekundaarpooli koguinduktiivsus $L_t = 79,4$ mH,
- poolide vaheline vastastikune induktiivsus $M = 450$ μ H,
- sisetustegur $k = 0,16$

2.2.3 Sädevahemiku parameetrid

Tesla pooli ehitamisel otsustati pöörleva sädevahemiku (vt Joonis 2.5) kasuks, millega elimineeriti staatilise sädevahemiku probleemid nagu ülekuumenemine, ebamäärane läbilöögiaeg ja läbilöögipinge juures läbilöögi toimumise väike tõenäosus. Läbilöögiaja reguleerimiseks lisati elektroode pööravale mootorile sagedusmuundur, et oleks võimalik kontrollida mootori pöörlemiskiirust. Marco Denicolai paigaldas 750 W vahelduvvoolumootori, mille maksimaalne pöörlemiskiirus on 2850 pöört/minutis ning mis suudab põhjustada 570 läbilööki sekundis. Rootorile kinnitati 12 kahepoolset elektroodi, mis moodustavad nelja statsionaarse elektroodiga igal miinimumkaugusel kaks paari sädevahemikke. [7]

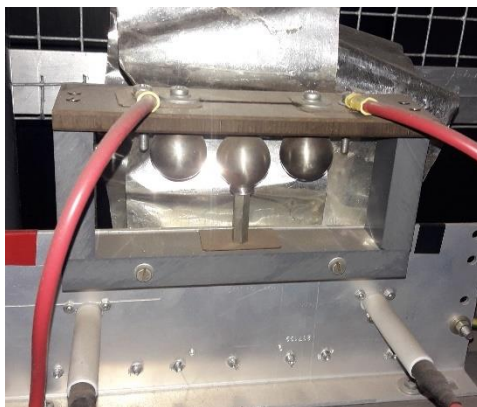


Joonis 2.5 Marco Denicolai poolt valmistatud pöörlev sädevahemik

2.2.4 Filtri parameetrid

Töötav Tesla pool tekitab transientliigpingeid ja liigvoole, mis mõjutavad toitesüsteemi ja vähendavad selle eluiga. Toitesüsteemi kaitseks paigaldatakse Tesla pooli sisendklemmidele kaitsefiltrid, mis piiravad kõrgete voolude ja pingete jõudmist seadme töötamiseks vajalikku süsteemi. [8]

Kui toitek kasutatakse kõrgepingetrafo, siis filtrita Tesla pool võib põhjustada trafo sekundaarmähise lühistumist trafo sees, sest tekivad kõrgsageduslikud liigpingelained jagunevad trafo mähisel ebaühtlaselt ning põhjustavad mähise soojenemist. Filtrile lisaks kasutatakse sädevahemikku (vt Joonis 2.6), mis piirab trafosse tungivaid liigpingeimpulsse. [8]



Joonis 2.6 Marco Denicolai Tesla pooli kaitse-sädevahemik

Filtri tööpõhimõte seisneb ohtlikult suurte sageduste blokeerimises ehk tegemist on madalpääsfiltriga. Filter laseb sagedusi läbi ainult mingi teatud väärtuseni, kust suuremad sagedused enam läbi ei pääse. Kasutatakse RC- ja LC-filtreid. RC-madalpääsfiltrid koosnevad trafoga jadamisi olevatest aktiivtakistustest ja rööbiti olevatest kondensaatoritest. RC-filtri põhiliseks probleemiks on märkimisväärne pingekadu aktiivtakistil. Samas Tesla poolis kasutatavates RC-filtrites ei ole pingekadu probleemiks, sest filtrit läbiv vool on väike. Väikse voolu tingib sekundaarahela kõrge pinge, kuna võimsus trafo primaar- ja sekundaarpoolel jääb ligikaudselt samaks. [17]

Võimalik on ka kasutada LC-madalpääsfiltreid, kus aktiivtakistus asendab induktiivpool. Induktiivpoolis on pingekadu väiksem ja seega pool on aktiivtakistusest efektiivsem. Eeliseks on ka filtrist väljuva lainekuju korrapärasus. Samas on induktiivpoolid kallimad, suuremad ning raskemad kui aktiivtakistid, mis raskendavad Tesla pooli ehitamist. [17]

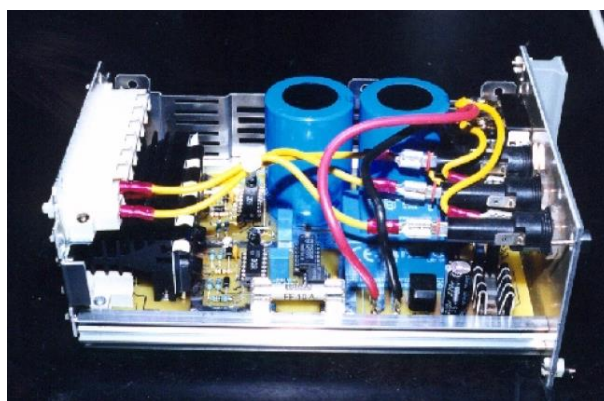
Marco Denicoli paigaldas enda toitesüsteemi kaitseks sädevahemiku ja toiteallika vahele LC-madalpääsfiltri (vt Joonis 2.7). Filter koostati neljast 1 nF mahtuvusega kondensaatorist ja kahest 2 mH induktiivsusega induktiivpoolist. Kaks jadamisi 1 nF kondensaatorit ühendati vastavalt mõlema toiteallika klemmi ja maanduse vahele rööbiti. Induktiivpoolid ühendati toiteklemmide ja sädevahemiku vahele jadamisi. [7]



Joonis 2.7 Marco Denicolai poolt valmistatud LC-filter

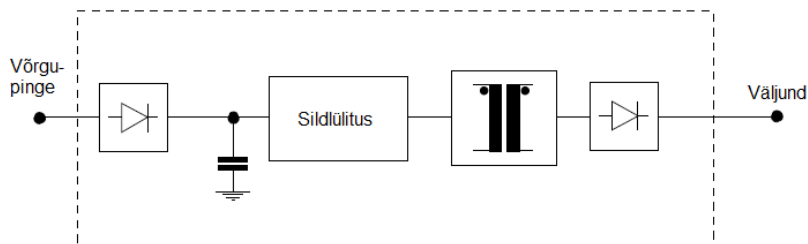
2.2.5 Toitesüsteem

Vana toiteallika väljund andis välja 20 kV suurust alalispinget koguvõimsusega 5 kW, mis laadis kondensaatorit kõrgepingeimpulssidega. Toitesüsteemi võib nimetada lühendiga CCPS (*Capacitor Charging Power Supply*), mis koosneb neljast jadamisi ühendatud kõrgsagedusmuundurist (vt Joonis 2.8), mille igaühe võimsus on 1,25 kW ja väljundpinge 5 kV. Muundurmodulite juhtimine käib kontrollermooduliga ning tagasiside jaoks on moodul, mis kontrollib kõrgsagedusmuundurite väljundpinget. [7]



Joonis 2.8 Üks kõrgsagedusmuunduri moodul [16]

Muundureid toidetakse 560 V alalispingega, mis saadakse 400 V vahelduvpinge aldamisega. Alalispinge rakendatakse mooduli trafot juhtivale täissildlülitusele, mis koosneb neljast transistorist ja diodist. Transistorid on IGBT tüüpi. Trafo sekundaarmähise poolt genereeritud impulsid suunatakse uuesti läbi alaldi ning neid kasutatakse Tesla pooli primaarkondensaatori laadimiseks. Muunduri põhimõtet selgitav skeem asub joonisel 2.9. [7]



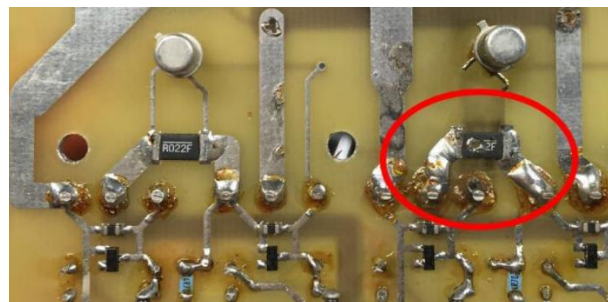
Joonis 2.9 Kõrgsagedusmooduli põhimõtteskeem [7]

Tallinna Tehnikaülikooli kõrgepingelaborisse saabudes oli toitesüsteemis rikkis. Seadet küll prooviti tööle panna, kuid katse oli edutu. Küll aga tehti kindlaks, et sädevahemiku mootor pöörleb ja sagedusmuundur suudab mootori pöörlemise sagedust muuta.

2017. aasta Aivo Joosti bakalaureusetöös leiti Tesla pooli toiteseadmel olevat mitmeid töökindlust mõjutavaid probleeme, peamine probleem seisneb liigpingete kaitsemehhanismis:

- IGBT ahel katkestatakse alles siis, IGBT emitter liigpinge tuvastab, kuid selleks peab olema üks liigpingeimpulss IGBT-d juba läbinud,
- liigpinge puhul lülitatakse välja vaid see kõrgsagedusmuunduri moodul, kus liigpinge tuvastati, teised jäävad töösse,
- liigpinge tuvastamisel seiskub neljast transistorist vaid kaks.

Sellised järeldused on tehtud lähtuvalt ühe läbipõlenud aktiivtakistuse (vt Joonis 2.10) paiknemisest ja funktsioonist elektriahelas. [4]



Joonis 2.10 Trükkplaadil läbipõlenud aktiivtakistus [4]

3. TESLA POOLI TOITESÜSTEEMI TAASTAMINE

Tesla pooli käivitamiseks tuli teha sobiv toitesüsteemi valik ning leida sellest lähtuvalt vajalike komponentide parameetrid. Neid parameetrid leiti eelnevalt olemas olnud komponentide teada olnud parameetrite põhjal. Toitesüsteemi valmishitamisel sai katsetada Tesla pooli töötamist.

3.1 Toitesüsteemi valik

Tesla pooli eeldatavaks kasutusotstarbeks on elektrilahenduste demonstreerimine, seega ei ole oluline, et kondensaatori laeng oleks igal sädevahemiku läbilöögil samasugune, nagu on teadustöös kasutatavatel Tesla poolidel. Sellel eeldusel valitakse toiteallikaks kõrgepingetrafo, mis on nii töökindel kui ka lihtsa tööprintsibiiga.

Trafo väljundpinge valikul otsustati, et valitav pinge peaks jääma võimalikult lähedale varem Tesla pooli toitnud pingele. M. Denicolai poolt ehitatud toitesüsteem andis välja alalispinget kuni 20 kV ulatuses. Kuna kõrgepingetrafo pingeväärtused on antud efektiivväärtusena, siis sobiva trafo nimipinge peaks olema 14,14 kV:

$$U_{ef} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{20}{\sqrt{2}} = 14,14 \text{ kV} \quad (3.1)$$

kus U_{ef} – vajalik kõrgepingetrafo sekundaarnimipinge, kV,

U_m – vajalik kõrgepingetrafo amplituudväärtus, kV. [8]

Eeldades, et masstootmises sellist trafot ei ole, siis tuleb võtta väiksema sekundaarnimipingega trafo, kuna suurema pinge kasutamist takistavad erinevad seadme elemendid, mis on mõeldud töötama kuni 20 kV amplituudväärtusega pingega.

Trafo võimsus arvutatakse vastavalt trafo parameetritele. Kõigepealt leitakse trafo takistus:

$$Z = \frac{1}{2\pi f C_p} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,0967 \cdot 10^{-6}} = 32917 \Omega = 32,917 \text{ k}\Omega \quad (3.2)$$

kus Z – trafo takistus, Ω ,

f – võrgu nimisagedus, Hz. [8]

Trafo aktiivvõimsuse leidmiseks tuleb lahendada võrrandisüsteem, pannes trafo sekundaarvoolu leidmise valemid omavahel võrduma:

$$\begin{cases} I_s = \frac{U_s}{Z} \\ I_s = \frac{P}{U_s} \end{cases} \quad (3.3)$$

kus I_s – trafo sekundaarvool, A,

P – trafo aktiivvõimsus, kW. [8]

Piisav trafo aktiivvõimsuse väärtus avaldub valemiga (3.4). [8]

$$P = \frac{U_s^2}{Z} = \frac{10^2}{32,917} = 3 \text{ kW} \quad (3.4)$$

Trafo väljundvõimsuse reguleerimiseks on mõistlik kasutada autotrafot, et Tesla pooli toitepinget sujuvalt nullist alates tõsta. Autotrafo peab suutma langetada võrgupinget väärtuste vahemikuni nullist jõutrafo sisendpingeni ja võimaliku ülekoormamise puhul ka üle selle.

3.2 Toitesüsteemi taastamine

Arvutatud parameetritega trafo leidmine Eestist osutus keeruliseks, kuna ühefaasilised 10 kV jaotustrafod Eestis praktiliselt kasutust ei leia, küll aga on taolised trafod laialdaselt kasutusel Ameerika Ühendriikide mastalajaamades. Joonisel 3.1 on kujutatud trafot, mis võiks ideaalselt sobida Tesla pooli toitetrafoks.



Joonis 3.1 ABB ühefaasiline mastitrafo [18]

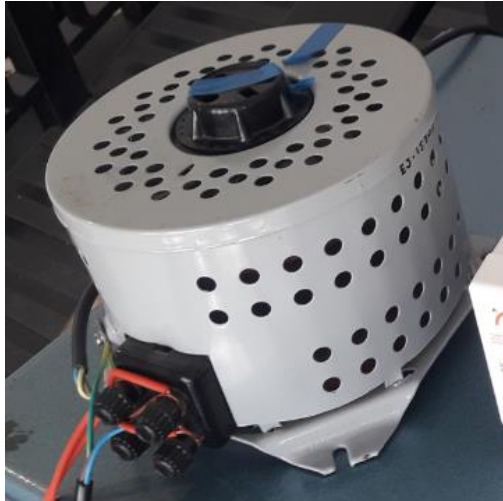
Trafo pika tarneaja ja kalli hinna tõttu otsustati Tesla pooli töötamist katsetada ülikoolis olemasoleva 0,1/10 kV trafoga (vt Joonis 3.2), et saada teada, kas Tesla pooli komponendid on korras ja kas liiderlahenduse tekitamine on võimalik. Trafo võimsuseks oli 640 VA, mis on üle 4,5

korra väiksem kui arvatud võimsus. Seega võis eeldada, et varem nähtud kolme meetrise pikkusega liiderlahenduste saamine ei ole võimalik. Arvestati ka asjaoluga, et trafot on võimalik lühiajaliselt üle koormata.



Joonis 3.2 Tesla pooli toitmiseks kasutatud 10 kV trafo

Energia avastuskeskuses toimetati Tesla pool võimalikult lähedale Faraday puurile ehk maandusele, et tagada ohutus. Faraday puuri külge ühendati need Tesla pooli osad, mis peavad olema maandatud. Trafo kõrgepingeklemmid ühendati Tesla pooli sisendklemmidega ning trafo primaarpinge reguleerimiseks leiti ülikoolist autotrafo (vt Joonis 3.3), mille eesmärgiks oli pinge sujuv tõstmine. Autotrafo sisendklemmid ühendati võrguga. Pöörleva sädevahemiku kolmefaasiline mootor ühendati varasema toitesüsteemi paneeliga, sest samas kestab asub ka sagedusmuundur, millega on võimalik muuta mootori pöörlemissagedust. Võimaliku liigvoolu tekkimise tõttu ühendati autotrafo ja kõrgepingetrafo vahele 10 A automaatkaitselüliti, mis liiga suure voolu korral ahela välja lülitab. Joonisel 3.4 on näha vanast toitesüsteemipaneelist ja autotrafost koosnevat ajutist seadmete komplekti, millega käitati Tesla pooli.

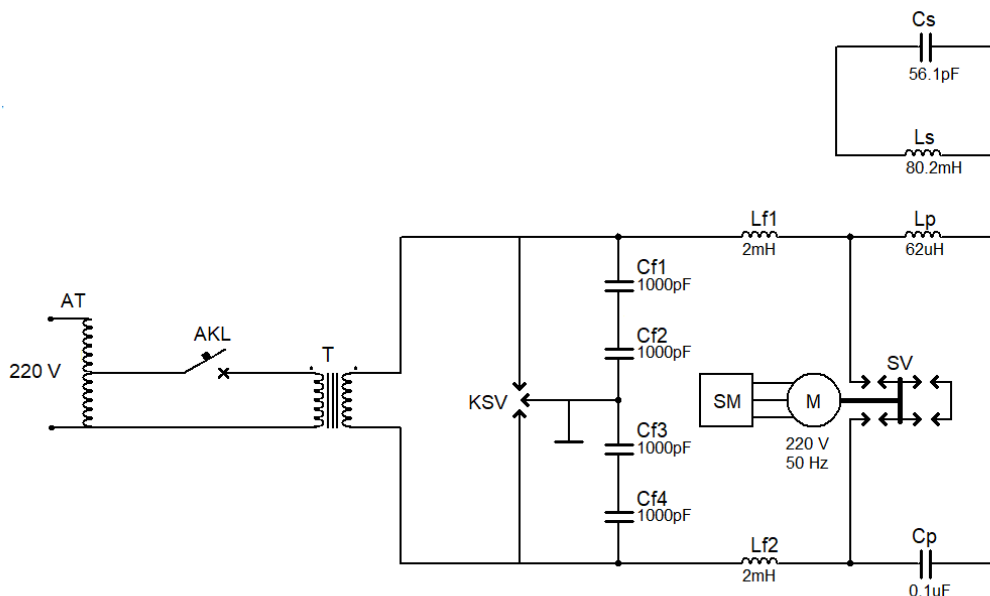


Joonis 3.3 Reguleerimiseks kasutatud autotrafo



Joonis 3.4 Ajutine juhtimissüsteem

Täieliku Tesla pooli skeem koos toitesüsteemi ja mootori juhtimissüsteemiga asub joonisel 3.5. Skeem koostati programmis Multisim ja seda täiendati programmis Paint.

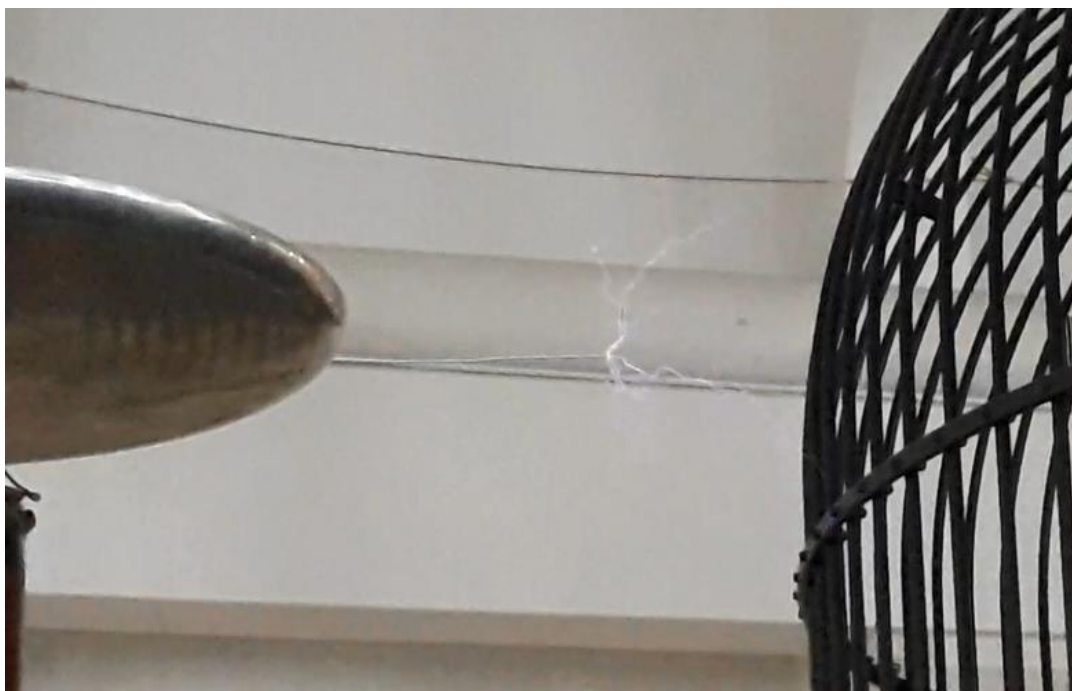


Joonis 3.5 Töötava Tesla pooli elektriline skeem. Skeemi elemendid: AT – autotrafo, AKL – automaatkaitselüliti, T – kõrgepingetrafo, KSV – kaitsesädevahemik, Cf1, Cf2, Cf3, Cf4 – filtri kondensaatorid, Lf1, Lf2 – filtri induktiivpoolid, SM – sagedusmuundur, M – asünkroonmootor, SV – sädevahemik, Lp – primaarinduktiivpool, Cp – primaarkondensaator, Ls – sekundaarinduktiivpool, Cs – kogu sekundaarahela mahtuvust väljendav kondensaator

3.3 Tesla pooli katsetamine

Kõigepealt katsetati sädevahemiku tööd. Vanale toitepaneelile lülitati toide peale ning lülitati sisse sagedusmuundur. Kuna sädevahemiku mootor hakkas pöörlema ja sagedusmuundurist antud käskluste põhjal muutis see ka pöörlemissagedust, siis mootori töötamine sai kinnitust. Mootori pöörlemissagedus seati 25 Hz-le, mis 12 pöörleva elektroodi korral põhjustab 300 läbilööki sekundis.

Toroidi külge paigaldati metalltraat, et toroid kui üks elektrood asuks maandusele võimalikult lähedal ja liiderlahenduse tekkimisel ei tõuseks pinge ülemäära kõrgeks. Traadi otsa kinnitati mutrivõti, mis osutus esimeseks käepäraseks metallist esemeks, mille abil traati sirgena hoida ja maanduse poole suunata. Mutrivõtme ja maa vaheliseks kauguseks määrati viis sentimeetrit. Seejärel lülitati tööle autotrafo ja hakati sujuvalt pinget tõstma. Autotrafo väljundpingel umbes 50 V toimus mutrivõtme ja maanduse vahelise õhu läbilöök. Veidi varem oli kuulda ka koroonalahenduse tekkimist ja hiljem oli seda ka lõhnast tunda (neljanda katse koroonalahendust vt Jooniselt 3.6). Sellega sai kinnitust, et kõik tehtud juhtmete ja klemmide ühendused toimivad ja Tesla pool on töökorras.



Joonis 3.6 Koroonalahendus trafo 90 V sisendpinge juures

Arvestades kõrgepingetrafo ülekandesuhtega, saab arvutada pinge efektiivväärtuse, mis rakendus Tesla pooli sisendile esimesel katsel:

$$k_t = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{100}{10000} = 0,01 \quad (3.5)$$

kus k_t – trafo ülekandesuhe,

U_{1n} – trafo primaarnimipinge, kV,

U_{2n} – trafo sekundaarnimipinge, kV.

$$U_2 = \frac{U_1}{k_t} = \frac{50}{0,01} = 5000 \text{ V} = 5 \text{ kV} \quad (3.6)$$

kus U_2 – trafo väljundpinge efektiivväärtus, kV,

U_1 – trafo sisendpinge efektiivväärtus, kV.

Kondensaatori laadimise puhul on oluline pinge amplituudväärtus, esimese katse laadimispinge:

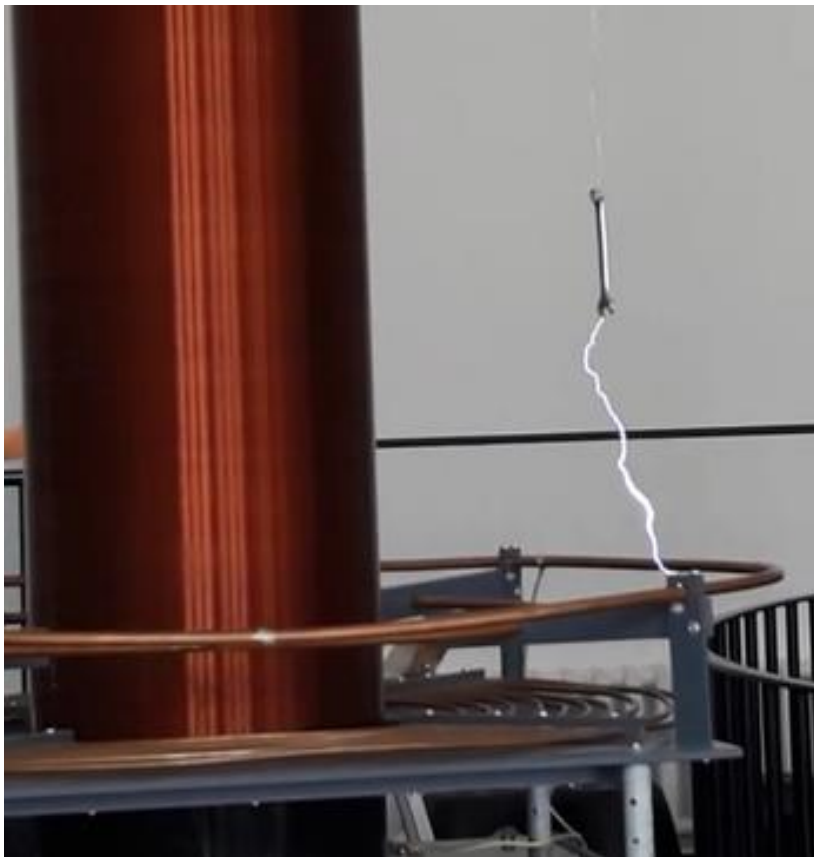
$$U_{2m} = U_p = \sqrt{2}U_2 = 7,1 \text{ kV} \quad (3.7)$$

kus U_{2m} – kõrgepingetrafo sekundaarpinge absoluutväärtus, kV.

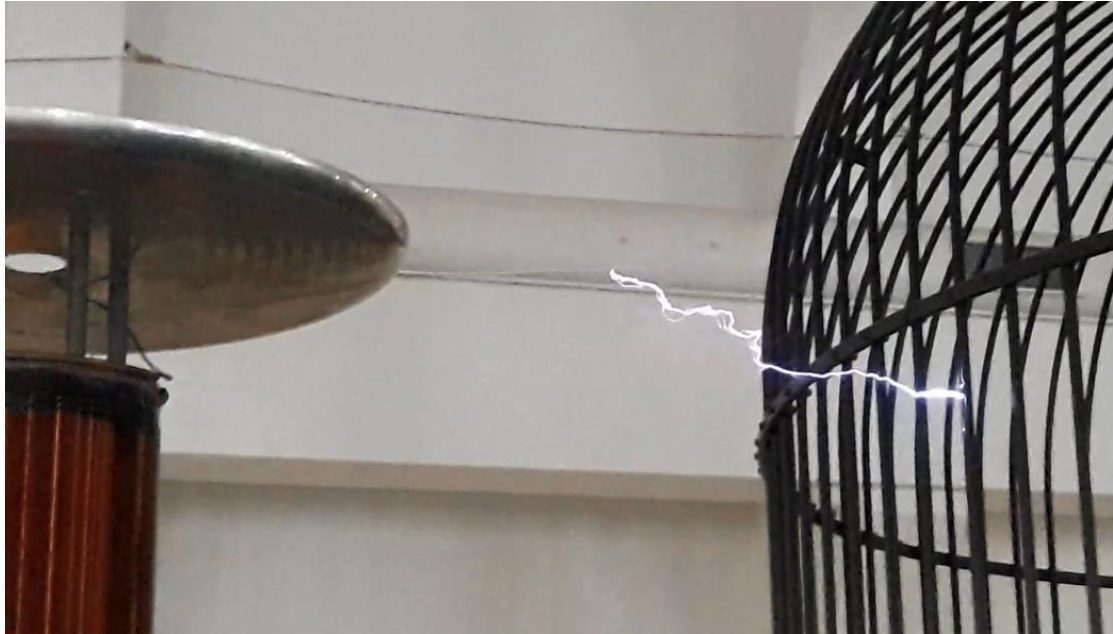
Järgnevalt tehti sama katsel erinevatel õhkvaheemiku laiustel (vt Joonis 3.6 ja 3.7). Kolmandal katsel asendati traat alumiiniumpulgaga, mis oli suunatud Faraday puuri poole. Samal katsel tõusis autotrafo ja kõrgepingetrafo vahelistes juhtmetes vool üle 10 A ja kaitseautomaat lülitus välja. Sama juhtus ka järgnevatel katsedel, kui pinget veelgi tõsteti.

Valemi (1.6) abil on võimalik ligikaudselt leida Tesla pooli sekundaarahelas tekkinud potentsiaali suurus, kuid kuna primaar- ja sekundaarresonantsagedused ei olnud võrdsed, siis reaalsed väärtused on arvutuslikest mõnevõrra väiksemad. Mõõtmis- ja arvutustulemused on tabelis 3.1. Järgnevalt on toodud arvutus maksimaalse õhkvaheemiku juures tekkinud pingest, mis esines viimasel katsel.

$$U_s = \frac{U_p \sqrt{L_s}}{\sqrt{L_p}} = \frac{14142 \sqrt{80,22 \cdot 10^{-3}}}{\sqrt{62 \cdot 10^{-6}}} = 507 \text{ kV}$$



Joonis 3.7 Elektrilahendus trafo 75 V sisendpinge juures



Joonis 3.8 Elektrilahendus trafo 90 V sisendpinge juures

Tabel 3.1 Mõõtmis- ja arvutustulemused

Õhkvahekiu laius, cm	Kõrgepingetrafo sisendpinge, V	Kõrgepingetrafo väljundpinge, Tesla pooli sisendpinge, kV	Kondensaatori laadimispinge, kV	Tesla pooli maksimaalne väljundpinge, kV
5	50	5	7,1	255
30	75	7,5	10,6	381
50	80	8	11,3	406
70	90	9	12,7	457
100	>100	>10	14,1	507

Peale katse läbiviimist tuli maanduskepiiga kindlustada, et kogu sekundaarkondensaatori laeng oleks maha laetud ja Tesla pool oleks ohutu.

3.4 Järeldused

Peale uue toitesüsteemi paigaldamist suudeti Tesla pooli katsetades tekitada üle ühe meetri pikkune liiderlahendus toroidi ja maanduse vahel. Piisava võimsusega kõrgepingetrafo olemasolul on Tesla pooli elektrilahenduse maksimumpikkuseks umbes kolm meetrit, mis on ka seadme enda kõrguseks. Kuna katsed teostati 10 kV trafoga, millel võimsust kuni 640 VA, siis võimsama trafo hankimisel on teoreetiliselt võimalus tekitada ka maksimaalpikkusega lahendusi. Ilmselt ei olnud

meetrised lahendused ka selle trafo suurimaks võimekuseks, sest kõige efektiivsemalt töötab seade siis, kui primaar- ja sekundaarahela resonantssagedused on võrdsed.

Tesla pooli ei ole koheselt võimalik elektrilahenduste demonstreerimiseks kasutada, sest suurimaks probleemiks on ohutuse tagamine, mis on takistatud piisavalt suure Faraday puuri puudumise tõttu. Küllastajate ohutuse jaoks peaks Tesla pool asuma maandatud Faraday puuris, kuid Energia avastuskeskuses asuv maanduspuur on liialt madal, et võimaldada kolme meetri pikkuseid liiderlahendusi ning ilma puuri demonteerimata ei ole Tesla pooli puuri toimetamine ilmselt võimalik. Samuti on praegune puur läbimõõdult liialt väike, kui tahta seal demonstreerida kolme eelnevalt töötavat ja uut korda tehtud kõige suuremat Tesla pooli. Küllastajate ohutus on oluline argument Tesla pooli töötamist demonstreerides, sest nagu selgus, on ainuüksi 640 VA trafoga võimalik tekitada toroidil potentsiaali kuni 507 kV. Maanduspuuri laiendamine on Energia avastuskeskuses lähiajal kavas.

Meelelahutuslike demonstratsioonide korraldamine on raskendatud ka hästi toimiva ja ühtse juhtimissüsteemi puudumise tõttu. Tesla pooli katsetusteks organiseeriti ajutine juhtimissüsteem, mis sisaldas vana toitesüsteemi mittevajalikke osi ja millel puudus kompaktsus, sest süsteem oli erinevatest seadmetest kokku pandud. Juhtimine toimuks ideaaljuhul ühtselt paneelilt ja kõik juhtimisseadmed oleksid ühises korpuses. Sellise juhtimiskasti kokkupanek ei ole praktiliselt mõeldes enne võimalik, kui on teada, milliste mõõtmete ja elektriliste parameetritega kõrgepingetrafo Tesla pooli toitmiseks soetatakse. Enne ei saa valida autotrafot ega võimalikke mõõteseadmeid.

KOKKUVÕTE

Antud lõputöö eesmärgiks on mittetöötava Tesla pooli toitesüsteemi taastamine, et seadmega tekitatavaid elektrilisi nähtusi oleks võimalik demonstreerida meelelahutuslikel eesmärkidel. Tulemuseni jõudmiseks tutvuti esmalt Tesla pooli ajaloo ja selle leiutaja Nikola Tesla elulooga. Samuti uuriti Tesla pooli tööpõhimõtet ja töötamise ajal toimuvaid elektrilisi nähtusi. Tutvuti erinevate toitesüsteemide variantidega, et oleks hiljem võimalik valida neist sobivaim. Oluline oli ka uurimisobjektiks oleva Tesla pooli kõigi parameetrite kindlakstegemine, sest see oli uue toitesüsteemi valimise seisukohalt määrava tähtsusega. Parima tulemuseni jõudmiseks oli tähtis uurida remonditava Tesla pooli ajalugu, et tekiks võrdlusmoment varasemalt töötanud Tesla pooli ja uue toitesüsteemiga seadme vahel. Teoreetiline osa läbinud, sai tööd jätkata praktilise osaga, mis hõlmas Tesla pooliga reaalsete katsete tegemist.

Tesla pooli käivitamiseks oli vajalik luua uus toitesüsteem, sest eelnevalt kasutatud süsteem oli rikke tagajärjel talitlemise lõpetanud. Uus konfiguratsioon valiti teoreetilises osas omandatud uutele teadmistele tuginedes. Otsustati kasutada klassikalise Tesla pooli toitesüsteemi, kus võrgupinge tõstetakse kõrgepingetrafo abil kõrgetele väärtustele. Trafo sisendpinge juhtimiseks otsustati kasutada autotrafot. Sobivaimaks trafoks arvati olevat 3 kW võimsusega 10 kV trafo. Sellise trafo puudumise tõttu otsustati kasutada väiksema võimsusega (640 VA) trafot, mis oli ülikoolil olemas. Väiksema võimsusega trafo kasutamise põhjenduseks võib tuua Tesla pooli muude komponentide ja kogu süsteemi katsetamise, mille toimimise korral oleks juba võimalik teha otsus uue trafo ostmise kohta.

Katsetamiseks ühendati olemasolevad komponendid uute seadmetega ning lülitati seade vooluvõrku ja hakati autotrafoga pinget tõstma. Peale esimest katset, kus liiderlahenduse tekkimise vahemik seati viiele sentimeetrile, saadi kinnitus Tesla pooli toimimise kohta. Kokku tehti viis katset erinevatel vahemikel, et määrata kasutatava trafoga saadav elektrilahenduse maksimumpikkus. Maksimaalne toroidis tekkinud potentsiaal maa suhtes oleks ideaaljuhtumil olnud 507 kV, aga kuna primaar- ja sekundaarahela resonantssagedused ei olnud võrdsed, siis tegelik potentsiaal oli väiksem.

Töö sissejuhatuses püstitatud eesmärk sai suures ulatuses täidetud. Mittetöötav Tesla pool suudeti katsete läbiviimiseks käivitada, olles loonud seadmele uue toitesüsteemi. Seadet katsetades suudeti tekitada üle ühe meetri pikkune liiderlahendus toroidi ja maanduse vahel. Püstitatud eesmärk Tesla pooliga elektrilahenduste demonstreerimisest jäi praktiliselt täitmata, kuigi katsetuste ajal viibisid Energia avastuskeskuses külastajad, kes katsetusi ka nägid. Tesla pooliga

välgukatsetuste tegemine on takistatud ebapiisava suurusega Faraday puuri ja kompaktsed juhtpaneeli puudumise tõttu. Mõlemad puudused on seotud inimeste ohutuse tagamisega.

Üldiselt võib väita, et lõputöö eesmärk sai täidetud, sest suudeti Tesla pool töökorda seada ning tekitada sellega elektrilahendusi. Sobiva võimsusega trafo leidmisel on koheselt võimalik Tesla pool uuesti töökorda viia ja teha katseid. Energia avastuskeskuse külalistele on katseid võimalik demonstreerida peale Faraday puuri laiendamist, juhtimispaneeli koostamist ja seadme parameetrite korrigeerimist, et tekkivad elektrilahendused oleksid võimalikult pikad ja paljude harudega.

Tulevikus võiks proovida kasutada ka vana toitesüsteemi, kui selle parandamine on võimalik. Sellisel juhul oleks hea võrrelda vahelduv- ja alalispingega kondensaatori laadimise erinevust ning võrrelda tekkivaid liiderlahendusi.

SUMMARY

The aim of this thesis was restoration of power supply for inoperational Tesla coil so that this Tesla coil can be used for electric discharge demonstrations. To reach this goal, history of Tesla Coil and its inventor's biography was studied. After that, Tesla coil's working principle and electrical processes were researched. To choose best power supply version, different designs were researched and compared. Detecting all of the parameters of Tesla coil was essential for choosing the right design of power supply. To get the best results, the history of given Tesla coil was studied so that old and new power supply can be compared. After theoretical part of thesis, practical experiments were conducted.

As the old supply of power was out of order, the new supply was needed. New configuration was chosen according to knowledge acquired from theoretical part of the thesis. The task was to assemble power supply which have a transformer to transform voltage from mains to high voltage. To regulate transformer's input voltage autotransformer was added to circuit. Best parameters for transformer were calculated: power 3 kW, output power 10 kV. Transformer with these parameters was not available so 640 VA transformer was used. This decision was made because it was recommended to test other components of Tesla coil before buying new transformer.

All new devices were connected to old components and Tesla coil was connected to mains so that it would be possible to start increasing voltage with autotransformer. After first test it was certain that device is working. Five experiments were carried out as discharge gap was widened for every experiment. Maximum potential ideally possible was calculated which was 507 kV but it was realistically smaller because primary and secondary resonance frequencies were not equal.

The aim of the thesis was mostly fulfilled. Inoperational Tesla coil was repaired as the new power supply was assembled. Length of discharge in the second circuit was over a meter. The aim to use Tesla coil for lightning demonstrations was not fulfilled although there were people in Energy Discovery Centre during our experiments. The aim got unfulfilled because of the safety concerns. There was Faraday's cage that was not large enough and compact control panel was missing.

Basically the aim was fulfilled as Tesla coil was made working and leaders was created. If suitable transformer is found then it is immediately possible to operate Tesla coil. Discharge demonstrations will be possible if Faraday cage is widened, control panel is assembled and parameters are adjusted.

In the future it would be interesting to try to fix old power supply and compare two different power supply designs.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] W. Pongsathit, P. Yutthagowith ja W. Limcharoen, „Solid state tesla transformer for flashover test on suspension insulators,“ *2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, Toyohashi, 2017.
- [2] M. Saar, „Tesla pooli elektroonilise juhtseadme väljatöötamine,“ bakalaureusetöö, elektroenergeetika instituut, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2016.
- [3] Energia avastuskeskus, *Välgudemonstratsioon*. Kasutatud: 24.05.2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.energiakeskus.ee/tegevused-post/valgudemonstratsioon/>
- [4] A. Joost, „Tesla kõrgepingegeneraatori modifitseerimine,“ bakalaureusetöö, elektroenergeetika instituut, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2017.
- [5] T. K. Sarkar, R. J. Mailloux, A. A. Oliner, M. Salazar-Palma, M. Salazar-Palma ja D. L. Sengupta, *History of Wireless*, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [6] N. Tesla, *My Inventions : The Autobiography of Nikola Tesla*, Start Publishing LLC, 2013.
- [7] M. Dencolai, „Tesla Transformer for Experimentation and Research,“ doktoritöö, elektri- ja telekommunikatsioonitehnoloogia instituut, Helsingi Tehnikaülikool, Espoo, 2001.
- [8] C. Gerekos, „The Tesla Coil,“ bakalaureusetöö, füüsikainstituut, Brüsseli Vaba Ülikool, Brüssel, 2012.
- [9] L. Neumann ja P. Kalantarov, *Elektrotehnika teoreetilised alused II*, Tallinn: Valgus, 1967.
- [10] R. Burnett, *Operation of the Tesla Coil*, Richie's Tesla Coil Web Page. Kasutatud: 24.05.2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.richieburnett.co.uk/operation.html#operation>
- [11] R. M. Duarte ja G. K. Felic, „Analysis of the Coupling Coefficient in Inductive Energy Transfer Systems,“ *Active and Passive Electronic Components*, köide 2014, juuni 2014. Kasutatud: 24.05.2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.hindawi.com/journals/apec/2014/951624/>
- [12] V. Vodovozov ja R. Jansikene, *Elektroonika ja jõupooljuhttehnika*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli kirjastus, 2008.

- [13] Steve's High Voltage, *Vacuum Tube Tesla Coils*, 2004. Kasutatud: 24.05.2019. [Võrgumaterjal].
Saadaval: <https://www.steehv.4hv.org/VTTCfaq.htm>
- [14] R. Burnett, *Solid State Tesla Coil*, Richie's Tesla Coil Web Page. Kasutatud: 24.05.2019.
[Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.richieburnett.co.uk/sstate.html>
- [15] R. Burnett, *A Singing Arc*, Richie's Tesla Coil Web Page. Kasutatud: 24.05.2019. [Võrgumaterjal].
Saadaval: <http://www.richieburnett.co.uk/cwsstc.html>
- [16] M. Denicolai, *Project Thor*. Kasutatud: 24.05.2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<http://www.saunalahti.fi/dncmrc1/thor.htm>
- [17] M. Joshi, *RC and LC Filters – Circuit Diagram, Waveforms and Working Principle*, 2017.
Kasutatud: 24.05.2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://myclassbook.org/rc-lc-filters-circuit-diagram-waveforms-working-principle/>
- [18] ABB, *Single-phase distribution transformers*. Kasutatud: 24.05.2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<https://webimages.imagebank.abb.com/public/default/product/9AAC30400664/presentation>