

Ilari Telaranta

Staattisella kipinävälillä kytketty teslakäämi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

23.11.2014

Tekijä Otsikko	Ilari Telaranta Staattisella kipinävälillä kytketty teslakäämi
Sivumäärä Aika	41 sivua + 3 liitettä 23.11.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	lehtori Kai Lindgren
<p>Insinööriyössä rakennettiin yksivaiheisella syötöllä toimiva staattisella kipinävälillä kytketty pienikokoinen teslakäämi. Laitetta käytettiin kipinöiden eli ionisoituneiden plasmasäikeiden muodostamiseen, jotka purkautuivat ympäröivään ilmaan. Tavoitteena oli saada toisiopiirissä olevasta toroidielektrodista purkautumaan noin 30 cm:n pituisia kipinöitä. Tämän pituuden aikaansaamiseksi toroidin vaihtojännitteen tuli nousta tehollisarvoltaan noin 250 kV:iin. Työssä käsiteltiin vain perinteistä teslakäämiä, jonka muodostivat kaksi resonanssi-piiriä ja kipinäväli.</p> <p>Työssä tutkittiin teslakäämin toiminnan mahdollistavaa teoriaa. Tähän sisältyivät muun muassa yleinen resonanssipiirien toiminta ja ensiö- sekä toisiopiirien toiminnan vaikutus kokonaisuuteen. Työssä käytettyjen komponenttien ominaisuuksia ja niiden arvojen vaikutusta teslakäämin toimintaan tutkittiin teoreettisten laskemien ja käytännön mittausten avulla. Lisäksi esiteltiin muita vaihtoehtoisia komponentteja.</p> <p>Tärkeä osa työtä oli käyttöturvallisuuden perehtyminen, koska komponentit toimivat suurjännitteellä. Laitteen toimiessa esiintyi UV-säteilyä ja otsonia. Kipinäpurkaukset aiheuttivat kovaa ääntä ja radiotaajuista häiriösäteilyä, mikä tuli ottaa huomioon käyttöympäristöä valittaessa.</p> <p>Työtä suoritettaessa havaittiin, että teoreettiset laskelmat auttoivat luomaan pohjaa laitteen oikealle toiminnalle. Parhaan toiminnan mahdollistava hienosäätö tapahtui kuitenkin empiiristen havaintojen pohjalta ensiöpiirin resonanssitaajuutta säätämällä.</p>	
Avainsanat	resonanssi, värähtelyjakso, taajuus, kipinä, induktanssi, kapasitanssi

Author Title	Ilari Telaranta Static Spark Gap Tesla Coil
Number of Pages Date	41 pages + 3 appendices 23 November 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor	Kai Lindgren, Senior Lecturer
<p>In this thesis a single phase fed small static spark gap tesla coil was built. The apparatus was used to create ionized plasma sparks, which were emitted to surrounding air. The goal was to create 30 cm long sparks from the secondary circuit's toroid. To create such long sparks, toroid's alternating voltage needed to be raised to about 250 kV rms. This thesis addresses only traditional spark gap tesla coil, formed by two resonant circuits and a spark gap.</p> <p>In the thesis tesla coil's theory of operation was examined. Among other things this included general working principle of a resonant circuit and the effects caused by operating primary and secondary circuits. The properties of the used components were examined and the effects of their values to the tesla coil were studied with theoretical calculations and practical measurements.</p> <p>Important part of the thesis was to get acquainted with safety of the operation, because high voltage components were used. UV radiation and ozone was formed when operating the apparatus. Discharging sparks caused loud noise and RF-interference, which required to pay attention when choosing the area of operation.</p> <p>While carrying out the thesis, it was observed that theoretical calculations helped to form a base for correct operation of the tesla coil. However, fine tuning for the best operation was performed with empirical observations while adjusting the primary circuit resonant frequency.</p>	
Keywords	resonance, oscillation period, frequency, spark, inductance, capacitance

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet ja symbolit

1	Johdanto	1
2	Yleistä teoriaa	2
2.1	Vastus	2
2.2	Kondensaattori	2
2.3	Käämi	3
2.4	Impedanssi	3
2.5	LC-resonanssipiiri	4
2.6	Resonanssitaajuus	6
2.7	Hyvyyysluku ja kaistanleveys	7
3	Turvallisuus	9
3.1	Henkilöturvallisuus	9
3.2	Laiteturvallisuus	10
4	Teslakäämin toimintaperiaate	11
4.1	Ensiöpiirin toiminta	11
4.2	Ensiö- ja toisioresonanssipiirien värähtely	13
4.3	KytKentäkerroin	17
4.4	Teslakäämin jännitevahvistus	17
4.5	Teslakäämin ja rautasydänmuuntajan toimintaperiaate-erot	19
5	Komponentit	19
5.1	Suurjännitemuuntaja	20
5.1.1	Muuntajatyypit	20
5.1.2	Työssä käytetty neonvalomuuntaja	20
5.1.3	Neonvalomuuntajan suojaus	23
5.2	Kondensaattori	25
5.3	Kipinäväli	27
5.4	Toisiokäämi	30

5.5	Toroidi	32
5.6	Toisiopiirin laskettu ja mitattu resonanssitaajuus	35
5.7	Ensiökäämi	37
5.8	Ensiöpiirin mitattu resonanssitaajuus	39
5.9	Sähköverkon suojaus	40
6	Pohdintaa	41
	Lähteet	42
	Liitteet	
	Liite 1. KytKentäkaavio	
	Liite 2. Tärkeimmät kaavat	
	Liite 3. Valokuvia	

Lyhenteet ja symbolit

<i>AWG</i>	<i>American wire gauge</i> . Amerikkalainen standardi sähköjohtimen halkaisijalle.
<i>B</i>	Kaistanleveys. Yhtenäisen taajuuskaistan kahden taajuuden erotus.
<i>C</i>	Kapasitanssi, yksikkö faradi [F].
<i>E</i>	Energia, yksikkö joule [J].
<i>f</i>	Taajuus, yksikkö hertsi [Hz].
<i>I</i>	Virta, yksikkö ampeeri [A].
<i>k</i>	KytKentäkerroin. Dimensioton suure.
<i>L</i>	Induktanssi, yksikkö henry [H].
<i>NST</i>	<i>Neon sign transformer</i> . Neonvalomuuntaja.
<i>Q</i>	Sähkövaraus, yksikkö coulombi [C].
<i>Q</i>	Hyvyysluku. Dimensioton suure.
<i>R</i>	Resistanssi, yksikkö ohmi [Ω]. Vaihtovirtapiirissä impedanssin reaalinen osuus.
<i>RF</i>	<i>Radio frequency</i> . Radiotaajuus. 3 kHz – 300 GHz.
<i>RMS</i>	<i>Root mean square</i> . Tehollisarvo.
<i>T</i>	Jaksonaika. Taajuuden käänteisarvo.
<i>U</i>	Jännite, yksikkö voltti [V].

X	Reaktanssi, yksikkö ohmi [Ω]. Vaihtovirtapiirissä impedanssin imaginäärinen osuus.
X_L	Induktiivinen reaktanssi, yksikkö ohmi [Ω].
X_C	Kapasitiivinen reaktanssi, yksikkö ohmi [Ω].
Z	Impedanssi, yksikkö ohmi [Ω].
ω	Kulmataajuus, yksikkö radiaania sekunnissa [rad/s].

1 Johdanto

Insinööriyössä esitellään yksivaiheverkosta syötetty teslakäämi. Teslakäämi on suurjännitteellä toimiva, kahden värähtelypiirin muodostama ilmasydäminen resonanssimuuntaja. Serbialais-amerikkalainen Nikola Tesla keksi teslakäämin vuonna 1891 tutkiessaan korkeataajuisia suurjännitettä. Tesla oli yksi merkittävimmistä sähkötekniikan keksijöistä, jonka innovatiiviset keksinnöt ovat nykypäivänä käytössä kaikkialla maailmassa. Näihin lukeutuvat muun muassa induktiomootori ja monivaiheinen sähkönsiirto.

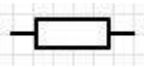
Tesla tutki teslakäämin avulla radioaaltojen lähetystä, röntgensäteitä, langatonta sähkönsiirtoa ja maan sekä ilmakehän sähkömagneettisia ominaisuuksia. Teslakäämiä käytettiin radion alkuvuosikymmeninä radioaaltojen lähetykseen. Nykypäivänä laitteen käyttökohteet ovat lähinnä tutkimuskäytössä suurjännitelaboratorioissa ja harrastajien kokeiluissa. Käytännön työssä teslakäämiä käytettiin laitteen mahdollistaman visuaalisen puolen esittelemiseen. Kipinäpurkaukset muistuttavat luonnossa esiintyviä salamoita.

Työssä keskitytään pääasiassa käyttöturvallisuuteen, komponentteihin ja teoriaan, joka mahdollistaa teslakäämin toiminnan. Tarvittavien komponenttien ominaisuuksia tarkastellaan teorian ja käytännön mittausten avulla. Komponenttien mitoittamiseen paneudutaan oikean toiminnan kannalta. [1; 2.]

2 Yleistä teoriaa

2.1 Vastus

Vastus R on komponentti, joka vastustaa sähkövirran kulkua. Vastuksen päihin kytkettäessä jännite U , saadaan vastuksen läpi kulkeva virta I kaavalla $I = \frac{U}{R}$, joka tunnetaan ohmin lakina. Resistanssin muodostama teho P saadaan johdettua ohmin lain mukaisesti $P = \frac{U^2}{R} = RI^2 = UI$.



Kuva 1. Vastuksen piirrosmerkki

2.2 Kondensaattori

Kondensaattori varastoi energiaa sähkökenttään. Kondensaattori koostuu kahdesta elektrodista, joiden välillä on dielektrinen väliaine. Potentiaalieron muodostuessa elektrodien välille muodostuu varaus Q positiiviselle elektrodille ja varaus $-Q$ negatiiviselle elektrodille. Elektrodit ovat eristetyt toisistaan, jolloin niiden välille muodostuu sähkökenttä. Varaus Q saadaan kaavalla $Q = CU$, missä C on kondensaattorin kapasitanssi ja U kondensaattorin jännite. Kondensaattorin sähkökenttään varastoima energia E saadaan kaavalla 1.

$$E = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

Useiden rinnankytkettyjen kondensaattorien kapasitanssi on kapasitanssien summa: $C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$, ja kondensaattoreilla on sama jännite. Sarjaankytkennässä kondensaattoreiden kapasitanssi on $\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$, ja jännite on kondensaattoreiden jännitteiden summa: $V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$. Kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi X_C on $\frac{1}{2\pi C}$.



Kuva 2. Kondensaattorin piirrosmerkki

2.3 Käämi

Käämi eli kela on passiivinen sähkötekniinen komponentti, joka vastustaa sähkövirran muutosta. Käämi varastoi energiaa hetkellisesti magneettikenttäänsä. Kun käämin läpi menevä virta muuttuu, muuttuva magneettikenttä indusoi jännitteen käämin johtimeen Faradayn induktiolain mukaisesti. Käämin varastoima energia E saadaan käämin induktanssin L ja käämin virran I avulla:

$$E = \frac{1}{2}LI^2 \quad (2)$$

Käämin kapasitiivinen reaktanssi X_L on $2\pi fL$. [3.]



Kuva 3. Käämin piirrosmerkki

2.4 Impedanssi

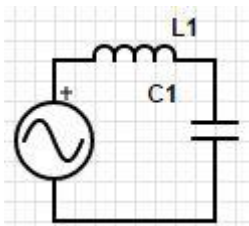
Impedanssi kuvaa piirin vaihtovirralla aiheuttamaa vastusta. Impedanssin itseisarvo on resistanssin ja käämin sekä kondensaattorin reaktanssin neliöllinen summa: $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$.

2.5 LC-resonanssipiiri

LC-resonanssipiiriin muodostaa vaihtovirtapiiriin sarjaan- tai rinnankytketty kondensaattori ja käämi. LC-piiri varastoi energiaa värähtelemällä resonanssitaajuudella. Kondensaattorin sähkökentän jännite aiheuttaa käämin magneettikentän virran kanssa resonanssin seuraavasti:

1. Kytettäessä täyteen ladattu kondensaattori käämin kanssa sähkövaraus alkaa virrata käämiin. Käämi varastoi energiaa magneettikenttäänsä pudottaen kondensaattorin jännitettä.
2. Kondensaattori tyhjentyy. Käämin magneettikenttään varastoituneen energian avulla virta jatkaa piirissä laskien käämin magneettikentän energiaa.
3. Käämin kondensaattoriin syöttämä virta alkaa ladata tyhjentyntä kondensaattoria alkuperäistä vastakkaisella jännitteellä, kunnes käämin magneettikentän energia on hävinnyt. Kondensaattorin sähkövaraus alkaa virrata jälleen käämiin, mutta vastakkaisella polariteetillä, jolloin jännitteen ja virran kiertokulku kondensaattorin ja käämin välillä alkaa uudelleen.

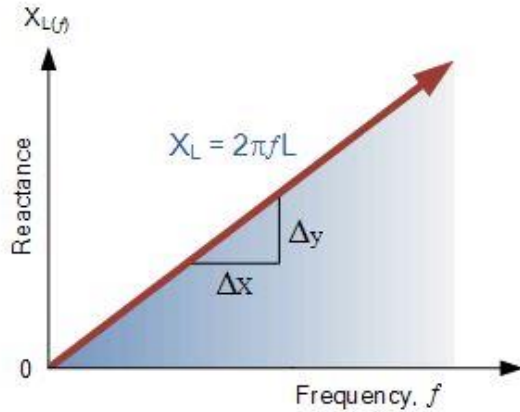
Resonanssi loppuu lopulta piirin sisäisten vastusten vaimentamana.



Kuva 4. LC-sarjaresonanssipiiri

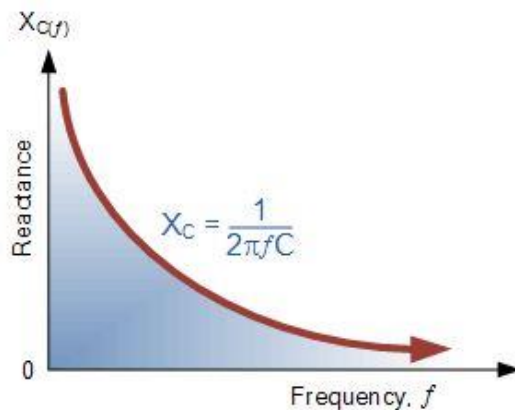
Teslakäämissä ensiö- ja toisioresonanssipiirit ovat käytännössä RLC-sarjaresonanssi-piirejä kipinävälin johtaessa. RLC-piiri on LC-piiri, jossa on mukana resistiivinen komponentti R . Koska resistanssi R ei vaikuta resonanssitaajuuteen, piirejä tarkastellaan LC-sarjaresonanssi-piireinä. Kirchoffin jännitelain mukaisesti kokonaisjännite LC-piirissä on

kondensaattorin ja käämin jännitteiden summa: $u = u_C + u_L$. Kirchoffin virtalain mukaisesti kondensaattorin ja käämin virrat ovat yhtä suuret: $i = i_C = i_L$. Induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi muuttuu piirissä taajuuden kasvaessa seuraavasti:



Kuva 5. Induktiivisen reaktanssin X_L nousu taajuuden f suhteen [4]

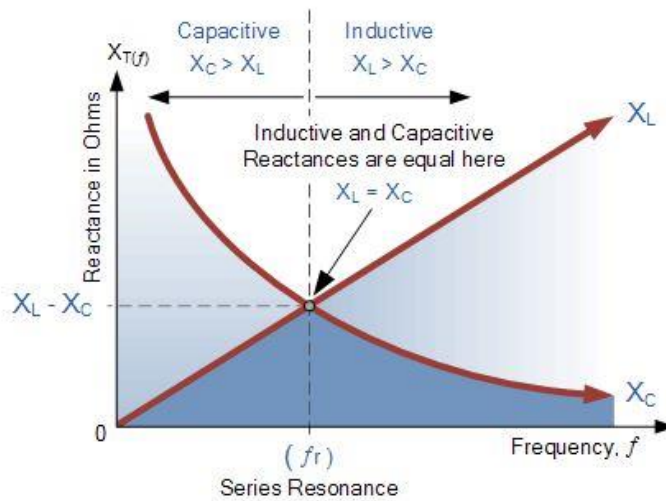
Induktiivisen reaktanssin kasvu taajuuden suhteen on lineaarista ja positiivista. Sen kuvaaja voidaan kirjoittaa muotoon $X_L \propto f$.



Kuva 6. Kapasitiivisen reaktanssin X_C lasku taajuuden f suhteen [4]

Kapasitiivinen reaktanssi on negatiivista. Lasku on eksponentiaalista taajuuden suhteen. Kuvaaja on hyperbolinen funktio, joka voidaan kirjoittaa muotoon $X_C \propto f^{-1}$. Kun $X_L > X_C$, piiri on induktiivinen. Kun $X_C > X_L$, piiri on kapasitiivinen. Suuremmalla taajuudella X_L on suuri, ja vastaavasti pienemmällä taajuudella X_C on suuri. [4; 5; 6.]

2.6 Resonanssitaajuus



Kuva 7. Induktiivinen reaktanssi on yhtä suuri kuin kapasitiivinen reaktanssi resonanssitaajuudella, mikä tapahtuu kuvaajien leikkauspisteessä [4]

Vaihtovirtapiiri on resonanssissa, kun induktiiviset ja kapasitiiviset reaktanssit ovat yhtä suuret, $X_L = X_C$, jolloin ne kumoavat toisensa vastakkaisten vaihe-erojensa ansiosta. Tämä toteutuu silloin, kun piirin yli mitatun jännitteen ja piiriin syötetyn virran välinen vaihe-ero on nolla, joka voidaan havaita kondensaattorin ja kelan impedansseja tarkastelemalla:

$$Z = Z_C + Z_L = \frac{1}{j\omega C} + j\omega L = j \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C} \quad (3)$$

Resonanssissa $\omega^2 LC$ on 1, jolloin impedanssi koostuu pelkästään resistiivisistä komponenteista, $Z = R$ ja piirissä kulkeva virta on suurimmillaan. Resonanssitaajuuden kaava voidaan johtaa reaktanssien ollessa yhtä suuret:

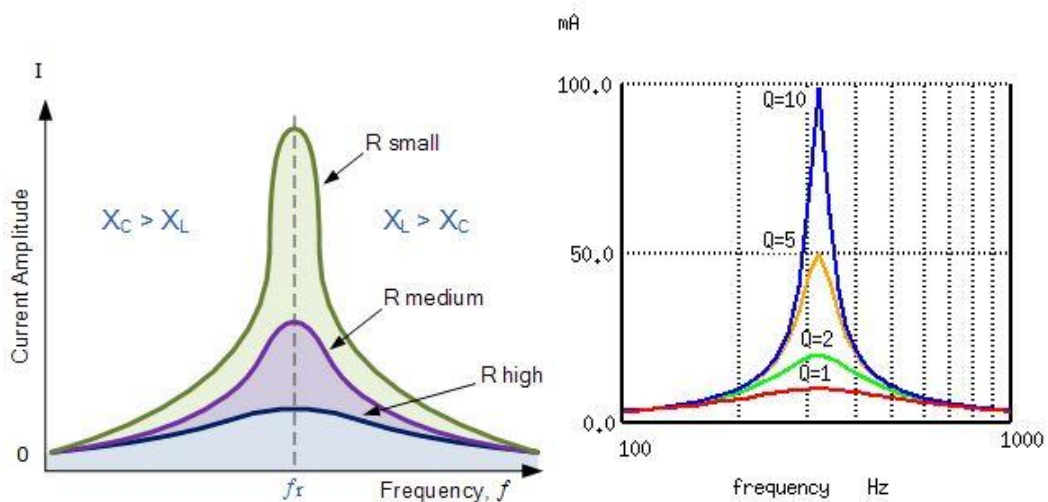
$$X_L = X_C \Rightarrow 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \Rightarrow f^2 = \frac{1}{2\pi L \cdot 2\pi C} = \frac{1}{4\pi^2 LC} \Rightarrow f = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 LC}} \quad (4)$$

$$\therefore f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ (Hz) tai } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ (rad)} \quad (5)$$

[4; 7; 8.]

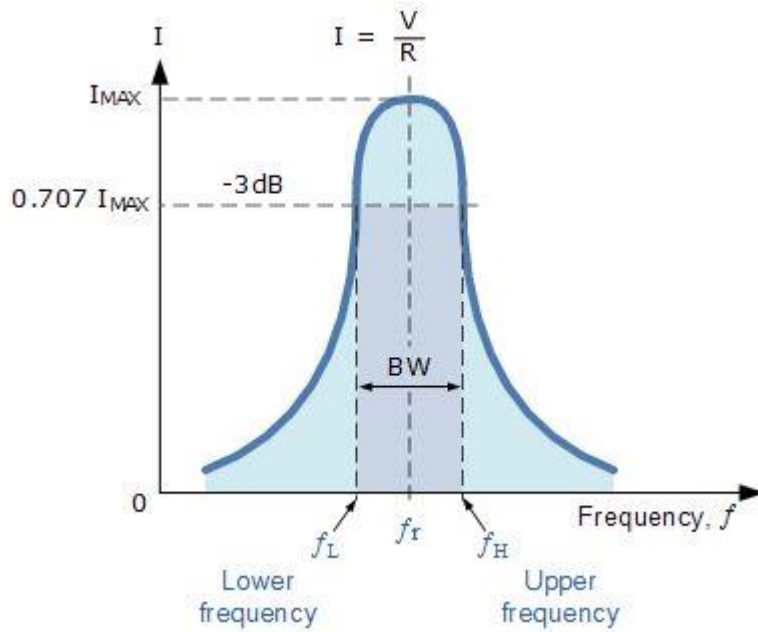
2.7 Hyvyyysluku ja kaistanleveys

Hyvyyysluku eli Q-arvo kertoo, miten voimakkaasti resonanssipiiri värähtelee resonanssissa. Q-arvon kasvaessa värähtely voimistuu, mutta resonanssin kaistanleveys pienee. Vastaavasti pienemmän hyvyyksluvun omaava piiri värähtelee heikommin, mutta suuremmalla kaistanleveydellä. Piirin ollessa resonanssissa piirissä $Z = R$ (ks. 2.6). Resistanssi koostuu suurimmaksi osaksi käämin resistanssista, joten pienemmät häviöt käämissä nostavat piirin Q-arvoa.



Kuva 8. Sarjaresonanssipiirissä resistanssin R laskiessa hyvyyysluku Q ja virta I suurenevät [4; 7]

Q-arvo selvitetään resonanssitaajuuden kaistanleveyden avulla.



Kuva 9. Kaistanleveyden määrittäminen -3 dB ($\frac{f_r}{\sqrt{2}}$) kohdissa olevien ylä- ja alataajuuksipisteiden avulla [4]

Kaistanleveys B on resonanssialueella kahden ylä- ja alataajuuksipisteen välisen alueen erotus. Kuvassa 9 -3 dB:n kohdissa sijaitsevat pisteet f_L ja f_H ovat kaistanleveyden määrittävät pisteet, joiden arvot saadaan $\sqrt{2}$:lla jakamalla resonanssitaajuuden huippuarvon f_r -virta.

Q-arvo voidaan laskea resonanssitaajuuden ja kaistanleveyden avulla:

$$Q = \frac{f_{res}}{B} \quad (6)$$

Q on hyvyysluku

f_{res} on resonanssitaajuus

B on resonanssitaajuuden kaistanleveys.

[9; 10; 11; 12.]

3 Turvallisuus

3.1 Henkilöturvallisuus

Suurimman vaaran henkilöturvallisuudelle aiheuttaa verkkojännitteiset liitokset. Kun teslakäämi on kytketty päälle, mihinkään kohtaan laitetta ei tule koskea. Turvallisuuden kannalta seuraavat tulee huomioida:

- Laitteen säätö tehdään jännitteettömänä.
- Kondensaattorin varaus voi pysyä päiviä. Kondensaattori tyhjennetään ennen säätötoimenpiteitä.
- Kondensaattori voi räjähtää laitteen ollessa päällä. Silmien suojaus ja suurta energiaa varaavien komponenttien fyysinen suojaus on suositeltavaa.
- Metallirunkoiset osat maadoitetaan. Näihin lukeutuvat mm. suurjännitemuuntaja, ohjauspaneeli ja muut mahdolliset käytetyt komponentit.
- Toision kipinöihin tulee pitää riittävä turvaetäisyys. Myöskään mihinkään metalliseen sähköä johtavaan esineeseen, mihin kipinät voivat osua, ei saa olla kosketuksissa.
- Eristäviä kenkiä tulisi käyttää. Nikola Tesla käytti aikoinaan kenkiä, joiden pohjissa oli useiden senttimetrien paksuinen korkkikerros.
- Palosammutin tulee olla mahdollisten tulipalojen varalta.

Kun teslakäämi toimii, se aiheuttaa radiotaajuista sähkömagneettista säteilyä ympäristöönsä sekä sitä syöttävään sähköverkkoon. Henkilöllä, jolla on sydämentahdistin, häiriösäteily laitteen lähialueella voi aiheuttaa hengenvaaran. Kipinävälin valokaari on erittäin kirkas sekä tuottaa kaarihitsaukseen verrattavissa olevan määrän UV-säteilyä, joten sitä ei saa katsoa ilman suojalaseja. Toroidista purkautuvien kipinöiden sähkömagneettinen säteily sijoittuu enimmäkseen valon näkyville aallonpituuksille, vähäisissä määrin myös UV-aallonpituuksille. UV-säteilyn vähäisyyden vuoksi kipinöiden katsominen on

turvallista silmille. Laitteen kanssa tulisi käyttää kuulosuojaimia sekä huolehtia riittävästä ilmanvaihdosta suljetussa tilassa sen tuottaman otsonin ja muiden haitallisten yhdisteiden takia.

Nikola Tesla havaitsi tutkimuksissaan, että vaihtosähkön taajuuden noustessa yli 2 kHz, hermosto ei enää reagoi merkittävässä määrin sähköön. Metallijohteessa suuri sähkövirran taajuus aiheuttaa virran ahtautumisen johteen pintaan, koska pyörrevirrat kumoavat johteen keskellä menevän virran, vahvistaen reunoilla menevää virtaa. Tämän skin-efektin luullaan usein virheellisesti vaikuttavan myös ihmiskehossa, suojaten henkilöä hänen ollessaan kosketuksissa toision suuritaajuuksien kipinöiden kanssa.

Yleisillä teslakäämin toimintataajuuksilla skin-efektin vuoksi virta kulkee johtimessa alle millimetrin syvyydessä, mutta ihmiskehossa sama taajuus kulkee noin 50 cm:n syvyydessä. Koska hermosto ei reagoi korkeaan taajuuteen, tuntee henkilö ainoastaan virran aiheuttaman lämpenemisen. Anekdoottisten todisteiden mukaan pienitehoisen teslakäämin toision kipinä voi aiheuttaa väliaikaisia kudonvaurioita, jotka ilmenevät päivienkin päästä lihas- ja nivelkipuina. Yli 250 kV kehittävä teslakäämin kipinä voi aiheuttaa luumun asti yltävän palovamman, josta toipuminen voi viedä kuukausia. [13, s. 4 - 8; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20.]

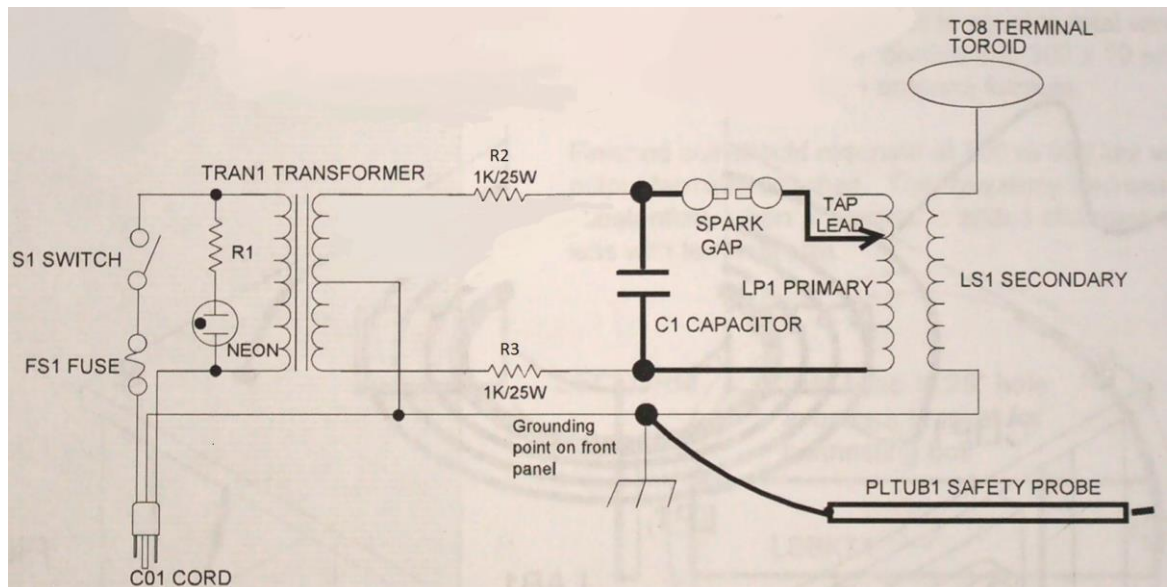
3.2 Laiteturvallisuus

Sähköverkkoon kohdistuvat radioaaltoiset häiriöt voidaan minimoida käyttämällä suurjännitemuuntajan ja verkon välissä sopivaa häiriösuodatinta. Verkkoon liitetyt herkäät sähkölaitteet, esimerkiksi tietokoneet, tulisi irrottaa sähköverkosta. Herkäät verkosta eristetyt sähkölaitteet, esimerkiksi matkapuhelimet, tulee pitää riittävän etäällä päällä olevasta laitteesta. Toisio tulisi maadoittaa eri maadoituspisteeseen missä sähköverkon maa sijaitsee, sillä toisio on suurin radiotaajuuksien häiriöiden aiheuttaja. Maadoitus tulisi toteuttaa esimerkiksi maahan upotettavalla kuparitangolla. Radioaaltoiselta häiriösäteilyltä voidaan suojautua käyttämällä Faradayn häkkiä teslakäämin ympärillä, jolloin tämä säteily rajoittuu häkin sisätilaan. [20.]

4 Teslakäämin toimintaperiaate

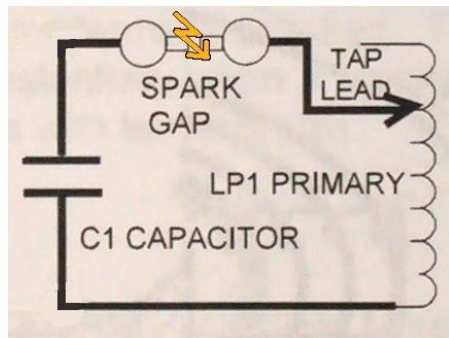
4.1 Ensiopiirin toiminta

Teslakäämi koottiin kuvassa 10 olevan kytkentäkaavion mukaisesti.



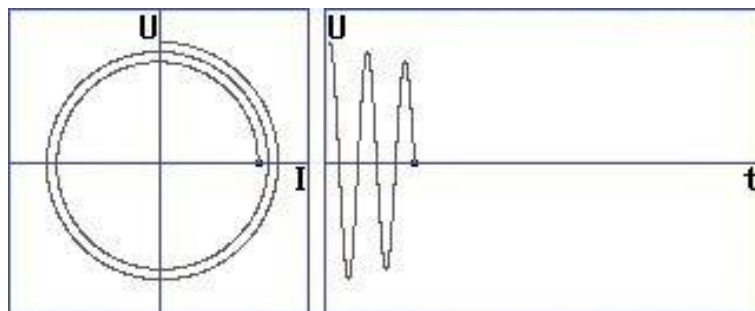
Kuva 10. C01: virtajohto, S1: pääkatkaisija, FS1: sulake, R1: merkivalon vastus, Neon: merkkivalo, Tran1: suurjännitemuuntaja, R2 & R3: RF-suodatinvastukset, C1: kondensaattori, Spark gap: kipinäväli, Tap lead: ensiökäämin välilottojohdin, LP1: ensiökäämi, T08: toroidi, LS1: toisiokäämi, PLTUB1: maadoitettu johdin; kaaviosta puuttuvat sähköverkon häiriösuodatin, kondensaattorin tyhjentävä vastus, suurjännitemuuntajan turvakipinäväli ja 230 V/115 V välimuuntaja suurjännitemuuntajalle [liite 1]

Sähköverkosta syötetään välimuuntajan kautta suurjännitemuuntajaa, joka muuntaa 115 VAC jännitteen 6 kVAC:n jännitteeseen. Suurjännitemuuntaja lataa kondensaattoria siniaallon molemmilla puolialloilla eli 100 kertaa sekunnissa verkkotaajuuden ollessa 50 Hz. Kondensaattorin jännitteen noustessa kipinävälin ilman läpilyöntilujuus ylittyy kriittisen jännitteen saavutettuaan, ja kipinäväli sulkeutuu valokaaren avulla. Kipinäväli johtaessaan muodostaa matalaimpedanssisen resonanssipiirin kondensaattorin ja ensiökäämin kanssa, jolloin kondensaattori purkautuu nopeasti luoden ensiökäämiin suuren virran. Kondensaattori mitoitetaan purkautumaan ennen puoliallon huippuarvoa. Suurjännitemuuntajan tehtävä loppuu tällä piirin tarkasteluhetkellä, kun ensioipiiri alkaa värähellä.



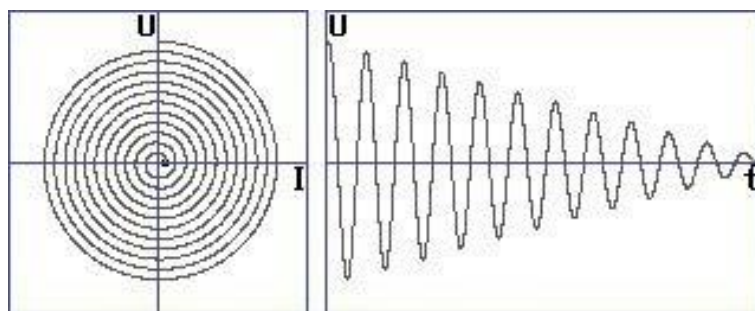
Kuva 11. Kondensaattorin, ensiökäämin ja johtavan kipinävälin muodostama ensiösarjaresonanssiipiiri [liite 1]

Kondensaattorin kapasitanssi ja ensiökäämin induktanssi määrittävät ensiön resonansitaajuuden, joka on satojen kilohertsien luokassa. Resonanssissa energia siirtyy vuorottaisesti kondensaattoriin sähkökentän ja käämin magneettikentän välillä. Ensiön energia hukkaantuu nopeasti kipinävälin toimiessa ja energian siirtyessä toisioon.



Kuva 12. Resonanssiipiirin energia on suurimmillaan kipinävälin sulkeutuessa [22]

Vasemmanpuoleisessa kuvassa x-akselilla on käämin virta I ja y-akselilla kondensaattorin jännite U . Oikeanpuoleisessa kuvassa on kondensaattorin jännite U ajan t suhteen. Hetkellä $t = 0$ s kipinäväli sulkeutuu.

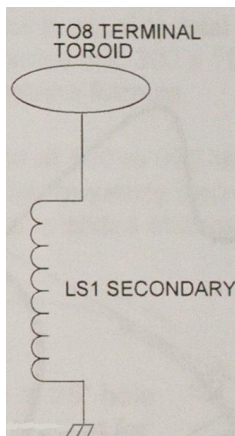


Kuva 13. Resonanssiipiirin energian vaimeneminen ajan t kuluessa [22]

Kondensaattorin jännite ja kelan virta laskevat samassa suhteessa. Kondensaattorin jännitteellä ja kelan virralla on $\frac{\pi}{2}$ vaihe-ero. [13, s. 31; 21; 22.]

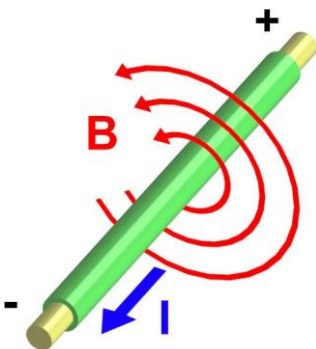
4.2 Ensiö- ja toisioresonanssipiirien värähtely

Ensiöpiirin värähtely aiheuttaa toisiopiiriin vastaavan värähtelyn niiden ollessa resonanssissa.



Kuva 14. Toisiokäämi ja toroidi muodostavat toisosarjaresonanssipiirin [liite 1]

Toisio on maadoitettu työssä sähköverkon maadoitukseen.

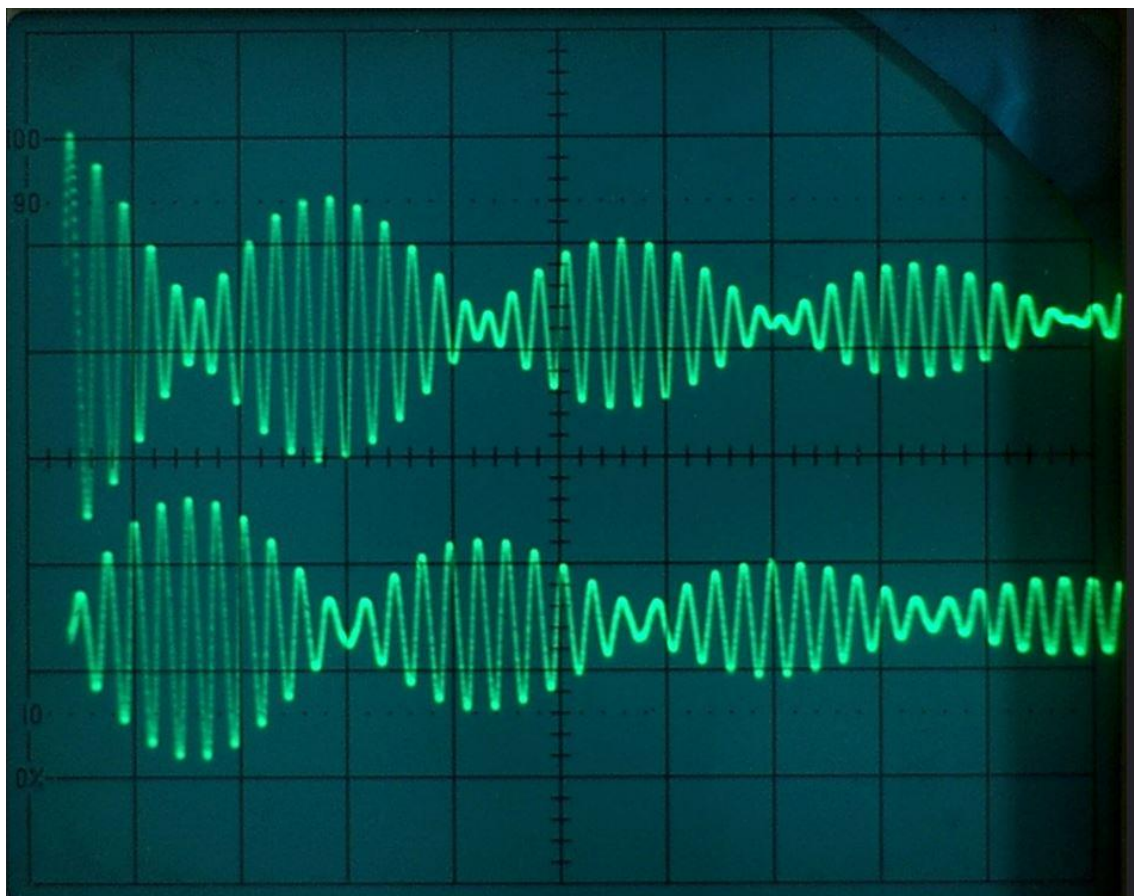


Kuva 15. Ampèren lain mukaan sähkövirta johtimessa luo ympärilleen magneettikentän; Ampèren laki on yksi Maxwellin yhtälöistä [23]

Ensiökäämissä kulkeva suuri virta luo ympärilleen magneettikentän Ampèren lain mukaisesti. Tyypillisesti 5 - 20 % ensiökäämin magneettikentästä on vaikutuksessa toisiokäämin kanssa, jolloin kytkentäkerroin k on 0,05 - 0,2 (ks. 4.3). Ensiökäämin värähtelevä

virta luo muuttuvan magneettikentän, joka kytkeytyy toisiokäämiin ja luo vastaavan värähtelevän virran, kun ensiö- ja toisiopiiri on viritetty samalle resonanssitaajuudelle. Ensiön värähtelyn amplitudi vaimenee, jolloin samaan aikaan toision värähtelyn amplitudi voimistuu energian siirtyessä toisioon. Toision jännitteen noustessa toroidi ei pysty tietyn jännitteen saavutettuaan pitämään pinnallaan varausta, jolloin varaus purkautuu ilmaan kipinäinä.

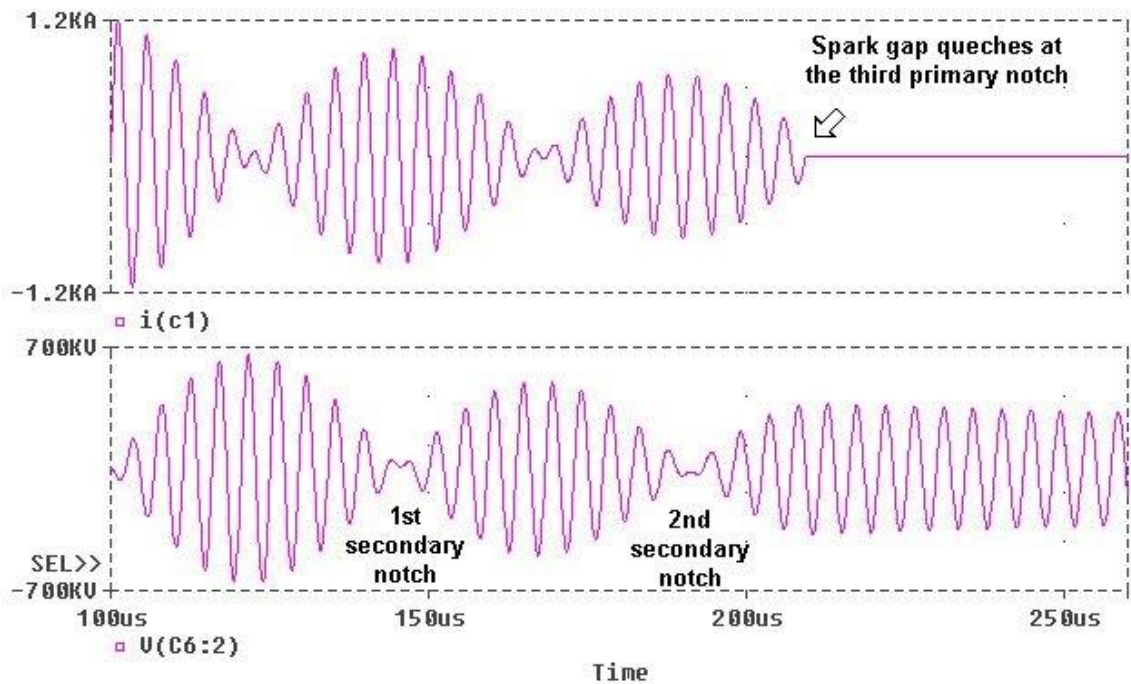
Lopulta kaikki energia on siirtynyt toisioon. Ideaalisessa tilanteessa kipinäväli sammuisi tässä vaiheessa, kun ensiön ensimmäisen värähtelyjakson jälkeen ensiössä ei ole enää energiaa. Käytännössä kipinäväli jatkaa pysyen päällä, jolloin toisio alkaa syöttää energiaa takaisin ensiöön, kunnes toision kaikki energia on siirtynyt ensiöpiiriin. Ensiön- ja toision välinen edestakainen energian siirto värähtelyn avulla voi jatkua vaimentuen satojen mikrosekuntien ajan.



Kuva 16. Ensiön (ylempi) ja toision (alempi) värähtelyjaksot samalla ajanhetkellä; kuvassa kipinäväli ei sammunut [24]

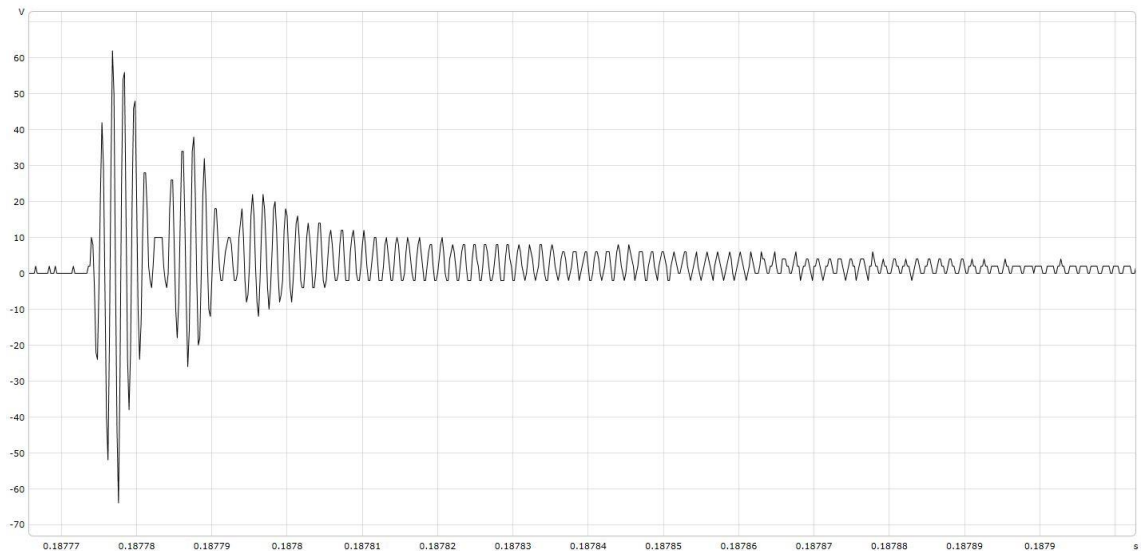
Teslakäämin toiminta ja toision jännitevahvistus perustuu näiden kahden resonanssipiirin värähtelyyn. Kuvasta 16 (ks. ed. s.) voitiin havaita, miten ensiön värähtelyn vaimentua toision värähtely voimistuu ja piirin kokonaisenergia laskee vähitellen. Alhainen kytkentäkerroin aiheuttaa sen, että värähtelyä tarvitaan monta kokonaisenergian siirtämiseksi.

Usean värähtelyjakson jälkeen värähtelevä energia on laskenut tarpeeksi alhaiseksi, mahdollistaen kipinävälin ilmavälin jäähtymisen. Kipinävälin läpi menevä virta ei pysty enää ylläpitämään kipinävälin sulkevaa valokaarta, jolloin kipinäväli sammuu ja ensiövirrapiiri katkeaa. Sattuminen tapahtuu, kun ensiön värähtelyjakso on vaimentunut, jolloin virta on minimissään. Kipinävälin sammuttua ensiö ei enää muodosta värähtelypiiriä toision kanssa, jolloin toisioon siirtynyt energia jää resonoimaan siihen.



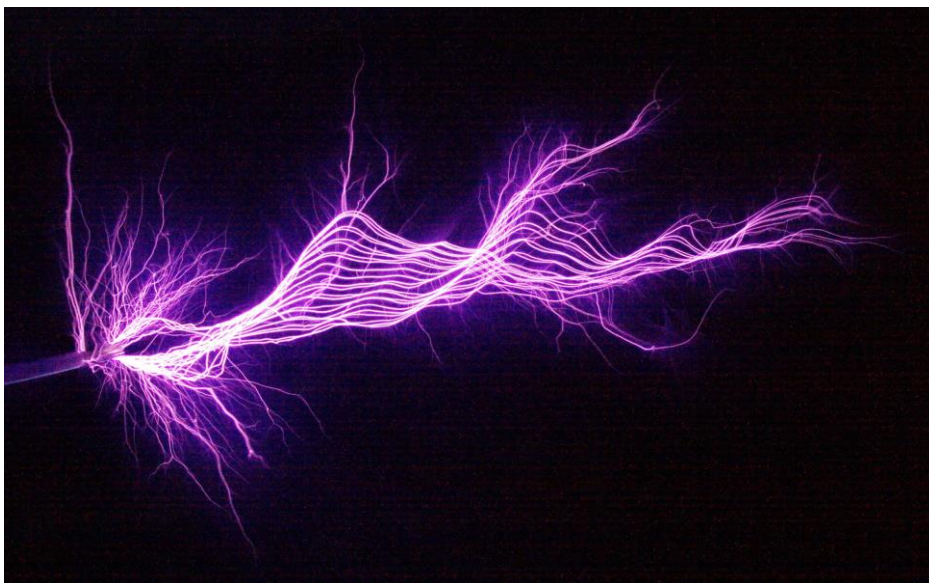
Kuva 17. Simulaatiokuvassa kipinäväli sammuu ensiön kolmannen värähtelyjakson jälkeen, jolloin toision energia jää värähtelemään hitaasti vaimentuen [25]

Nämä peräkkäiset värähtelyjaksot lisäävät toroidin kipinäpurkausten pituutta. Kuvissa 16 ja 17 oleva toision värähtely on helppo todentaa käytännössä oskilloskoopin avulla (kuva 18, ks. seur. s.).



Kuva 18. Oskilloskooppikuva on toroidin kipinäpurkauksen luomasta jännitteestä mittajohtimeen johtimen roikkuessa vapaana 1,5 metrin päässä toroidista; koko purkauksen pituus värähtelyn vaimenemisen kanssa on noin 120 μ s

Kuvasta 18 havaittiin, että kipinäväli sammuu ensiön kolmannen värähtelyjakson jälkeen. Hyvin toimiva kipinäväli sammuu kahden tai kolmen värähtelyjakson jälkeen. Kipinävälin sammuttua toisioon jäänyt energia vaimenee resistiivisiin häviöihin ja toroidin kipinä- ja koronapurkauksiin. Jokaisen värähtelyjakson kipinä jättää jälkeensä ionisoituneen kanavan ilmassa, mitä pitkin seuraavan värähtelyjakson luoma kipinä kulkee, jolloin kipinän kokonaispituus lisääntyy.

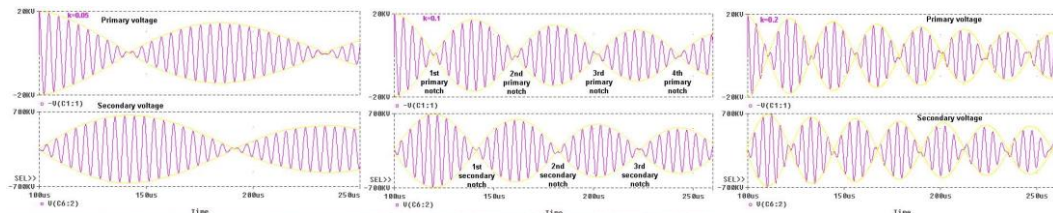


Kuva 19. Lähikuva kipinästä; sinivioletti hehku kipinöiden ympärillä on koronasäteilyä; ionisoituessaan ilma muodostaa uusia haarautuvia kanavia. 125 ms:n valotusaika

Kipinävälin sammuttua suurjännitemuuntaja alkaa ladata kondensaattoria uudelleen, ja tapahtumaketju alkaa alusta jännitteen noustua kondensaattorissa tarpeeksi suureksi. [25; 26.]

4.3 Kytchentäkerroin

Kytchentäkerroin k kertoo, kuinka suuri osa lähettävän käämin magneettivuosta läpäisee vastaanottavan käämin. Mitä enemmän vuota läpäisee vastaanottavan käämin, sitä suurempi on kytchentäkerroin. Kun kytchentäkerroin on 1, kaikki vuo läpäisee vastaanottavan käämin. Kun kerroin on 0, käämit eivät ole kytkettyneet ollenkaan toisiinsa. Kertoimeen vaikuttavat ensiö- ja toisiökäämien geometria, käämien muoto ja niiden välinen sijainti sekä kulma toisiinsa nähden.



Kuva 20. Kytchentäkertoimen vaikutus energian siirtoon piirien välillä; $k = 0,05$ vasemmalla, $k = 0,1$ keskellä ja $k = 0,2$ oikealla [25]

Alhainen kytchentäkerroin aiheuttaa resonanssi- ja piireillä energian siirtymisen hitaammin piiristä toiseen. Alle 0,05 kytchentäkerroin aiheuttaa sen, että suuri määrä energiaa hukkuu ensiöpiirissä, ennen kuin se siirtyy toisiopiiriin. Yli 0,2 kytchentäkerroin aiheuttaa toisiökäämissä jännitteen läpilyöntejä suuren jännitteen nousunopeuden takia. [25; 27.]

4.4 Teslakäämin jännitevahvistus

Toision jännite voidaan johtaa kondensaattorin toisioon siirtämästä energiasta. Ideaalisella käämillä ei ole häviöitä.

Kun kondensaattorin energia siirtyy toisioon, energiasta voidaan johtaa kaava toision jännitteelle seuraavasti:

$$E_S = E_p = \frac{1}{2} C_S V_S^2 \Rightarrow V_S^2 = \frac{E_p}{\frac{1}{2} C_S} \quad (7)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E_p}{\frac{1}{2} C_S}} \quad (8)$$

E_p on kondensaattorin energia

E_S on toisiopiirin energia

C_S on toision kapasitanssi

V_S on toision jännite. [22.]

Ensiö- ja toisiopiirin induktanssien ja kapasitanssien suhde voidaan kirjoittaa muodossa:

$$L_p C_p = L_S C_S \quad (9)$$

L_p on ensiökäämin induktanssi

C_p on kondensaattorin kapasitanssi

L_S on toisiökäämin induktanssi

C_S on toision kokonaiskapasitanssi. [26.]

Kaavan 8 avulla voidaan arvioida teoreettista toision jännitettä. Toision jännite ei kuitenkaan nouse käytännössä näin korkealle seuraavista syistä:

- Kaava ei huomioi ensiö- ja toisiökäämin resistanssia, jolloin kaikki kondensaattorin energia ei siirry toisiopiiriin.
- Suuri osa kondensaattorin energiasta hukkuu kipinävälin toimiessa valon, lämmön ja äänen muodossa.

- Ensiö- ja toisiokäämit toimivat antenneinä ja säteilevät pienen osan energiasta radioaaltoina.
- Toroidin korona- ja kipinäpurkaukset rajoittavat toision huippujännitettä. [22.]

4.5 Teslakäämin ja rautasydänmuuntajan toimintaperiaate-erot

Tavallisen rautasydämisen muuntajan toiminta perustuu ensiö- ja toisiokäämien tiukkaan induktiiviseen kytkentään, jolloin $k \approx 1$. Muuntosuhde on suurimmissa määrin verrannollinen ensiö- ja toisiokäämien kierrosmäärien suhteeseen seuraavasti:

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (10)$$

U_p on ensiön jännite

U_s on toision jännite

N_p on ensiökäämin kierrosmäärä

N_s on toisiökäämin kierrosmäärä.

Teslakäämin toiminta perustuu kahteen LC-resonanssipiiriin, jotka ovat viritetyt samalle resonanssitaajuudelle. Teslakäämissä ensiö- ja toisiopiiri muodostavat ilmasydämisen, väljästi induktiivisesti kytketyn muuntajan, jonka jännitevahvistus on riippuvainen resonanssista enemmän kuin kierrosmäärien suhteesta. Rautasydänmuuntajalla toision taajuus on sama kuin ensiön taajuus, kun teslakäämillä toision taajuus on käämin induktanssin ja toroidin kapasitanssin määrittämä. [12.]

5 Komponentit

Kaikki komponentit voidaan valmistaa itse, mutta ajan ja vaivan säästämiseksi käytetyt komponentit hankittiin yhdysvaltalaisesta verkkokaupasta valmiina osina.

5.1 Suurjännitemuuntaja

5.1.1 Muuntajatyypit

Teslakäämin tärkein komponentti on suurjännitemuuntaja, jota tarvitaan kondensaattorin lataamiseen. Muuntajan toisiojännite on yleensä 6 - 15 kV. Alle 5 kV:n jännitteellä kipi-näväli ei välttämättä toimi kunnolla.

Sopivia muuntajia ovat:

- Neonvalomuuntaja (NST), jossa ei ole vikavirtasuojakatkaisinta, joka estäisi muuntajan käytön teholähteenä. Lähtöjännite on 3 - 15 kV, ja toisiovirta on rajoitettu 30 - 120 mA:n luokkaan. NST on ainoa muuntajatyyppeistä, joka tarvitsee erillisen suodattimen suojaamaan teslakäämin aiheuttamilta häiriöiltä.
- Öljypolttimen sytytysmuuntaja, jonka toisiojännite on yleensä noin 10 kV, ja virta on noin 20 - 25 mA.
- Mikroaaltouunin muuntaja, jonka toisiojännite yleensä 2 kV luokkaa, jolloin on tarpeellista käyttää useaa muuntajaa. Muuntajalla ei ole sisäistä virtarajoitusta, joten virtaa on rajoitettava erillisellä kuristimella muuntajan ylikuormittumisen välttämiseksi.
- Jakeluverkon muuntaja, jota käytetään suuritehoisissa teslakäämeissä. Jännite on muutamista kilovolteista useisiin kymmeneen kilovolttiin. Muuntaja tarvitsee erillisen kuristimen. [28.]

5.1.2 Työssä käytetty neonvalomuuntaja

Muuntajan toisiokäämityksen keskipiste on maadoitettu. Toisiojännite saadaan kahdesta 180°:een vaihe-erolla toisiinsa nähden olevista 3 kV:n lähdeistä, jolloin niiden välinen potentiaaliero on 6 kV. Tämä tekee muuntajan eristämisen ja valmistuksen helpomaksi.



Kuva 21. Kuvissa ovat vikavirtasuojamaton NST ja sen arvokilpi; muuntajaa syötetään 115 V:n jännitteellä, joka saadaan erillisellä 230 V/115 V:n muuntajalla

Muuntajaa ei käytetä nimellisjännitteellä ja -taajuudella, joille se on suunniteltu (120 V, 60 Hz). Syöttöjännite on 115 V ja -taajuus on 50 Hz. Tämän takia toision tyhjäkäyntijännite U on $115/120 V * 6 kV = 5,75 kV$.

Muuntajan nimellistaajuus on 60 Hz. Käytössä oleva 50 Hz:n taajuus heikentää muuntajan kuormitettavuutta taajuuksien suhteessa. Muuntajan toisiota voi kuormittaa $50/60 Hz = 0,83$ eli 83 % ilman, että vaaraa muuntaja ylikuumentumisesta ilmenee. Rakennettua teslakämiä ei käytetä yhtäjaksoisesti yli minuuttia pidempään missään vaiheessa, joten taajuuden vaikutusta muuntajan kuormitettavuuteen ei huomioida.

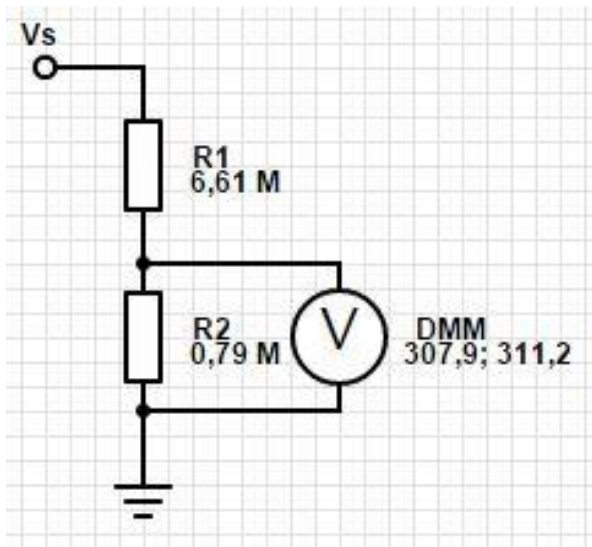
Muuntajan sisäinen 30 mA:n oikosulkuvirtarajoitus 60 Hz:n taajuudella on toteutettu metallisilla shunteilla, joilla muuntajan ensiön magneettivuota estetään halutusti kytkeytymästä toisioon. Muuntajan virtarajoitusta voi verrata induktiiviseen kuristimeen. Kuristimen induktanssi tulee tietää, jotta kondensaattorin tarvittava kapasitanssi voidaan määrittää (ks. 5.2). Muuntajan virtarajoituksen aikaansaava impedanssi koostuu pelkästään

induktiivisesta reaktanssista X_L . Reaktanssi 60 Hz:n taajuudella on $X_L = \frac{U}{I_k} = \frac{5,75 \text{ kV}}{30 \text{ mA}} = 191,7 \text{ k}\Omega$. Induktiivisen reaktanssin ollessa 191,7 k Ω , induktanssi L on (ks. 2.3)

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (11)$$

X_L on kuristimen induktiivinen reaktanssi
 f on nimelliskäyttötaajuus.

Kaavasta muuntajan sisäisen kuristimen induktanssiksi tulee 508,4 H. Muuntajan toisonapojen jännitteet maahan nähden mitataan jännitteenjakajan avulla. Tarkoituksena on tarkastaa, että muuntajan antama jännite on oikeassa luokassa.



Kuva 22. Suurjännitevastuksista koottu jännitteenjakaja; V_s on muuntajan toision jännite, joka selvitetään; R_2 sisältää jännitemittarin rinnankytketyn sisääntuloimpedanssin; DMM on jännitemittari

Kuvassa 25 R_2 koostuu 0,858 M Ω :n vastuksesta ja jännitemittarin 10 M Ω :n sisääntuloresistanssista. Niiden rinnankytketty resistanssi on $\frac{1}{1/0,858 + 1/10} = 0,79 \text{ M}\Omega$. Jännitemittarin näyttämät jännitteet ovat 307,9 V ja 311,2 V. Toision jännitteet U_{S1} ja U_{S2} saadaan kaavalla

$$U_s = \frac{U_{DMM} * (R_1 + R_2)}{R_2} \quad (12)$$

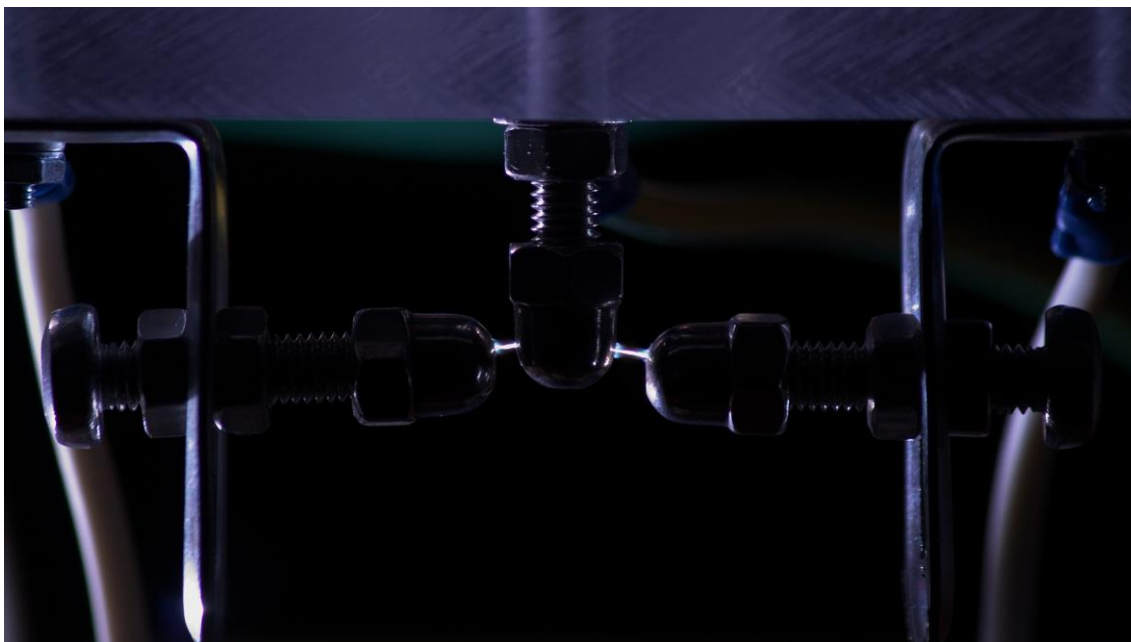
U_s on neonmuuntajan toision jännite

U_{DMM} on jännitemittarin näyttämä jännite.

Kaavasta laskettuna U_{S1} on $2884 \text{ V} \pm 55 \text{ V}$ ja U_{S2} on $2915 \text{ V} \pm 55 \text{ V}$. Muuntajan toisiojännite on siis $5799 \text{ V} \pm 110 \text{ V}$. Testaushetkellä syöttöjännite oli $116,3 \text{ V}$ ($U = 5815 \text{ V}$), joten muuntaja toimii oikein. [29; 30; 31; 32.]

5.1.3 Neonvalomuuntajan suojaus

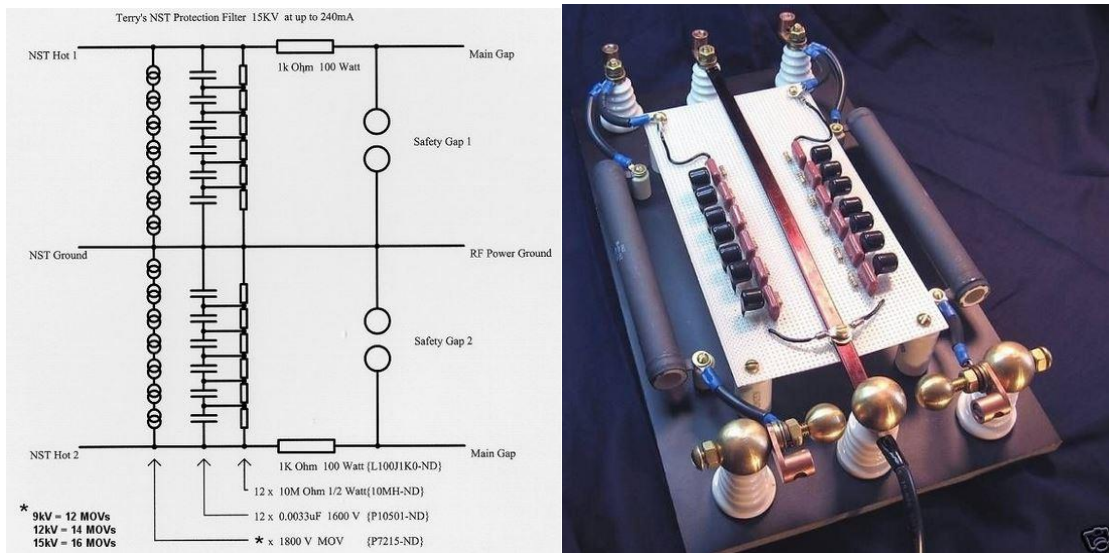
Ensiöresonanssi aiheuttaa RF-häiriöjännitetransientteja muuntajan toisioon. Toisin kuin 50 Hz :n syöttötaajuus, suuritaajuinen jännite ei myöskään jakaudu muuntajan käämitykseen tasaisesti, vaan keskittyy pienemmälle käämikierrosmäärälle. Muuntajan normaalin toisiojännitteen ylittyessä, voi muuntajan sisällä tapahtua käämilankojen välisiä valokaaria, mikä rikkoo muuntajan. Tämän estämiseksi muuntajan toision navat ovat yhdistetty turvakipinäväliin. Lisäksi muuntajan kumpaankin toisiojännitteeseen on kytketty $1 \text{ k}\Omega$ vastus (kuva 10, s. 11), joiden tehtävä on pienentää RF-häiriöiden voimakkuutta.



Kuva 23. Turvakipinäväli purkaa ylijännitettä muuntajan toisionavoista maadoitukseen

Toisiopuolen kumpikin napa on kytketty omaan, eristettyyn pulttiin. Kun navan jännite ylittää noin 3 kV, turvakipinäväli purkaa ylijännitteen keskellä sijaitsevaan maadoitettuun pulttiin. Turvakipinävälin ilmvälit säädetään muuntajan ollessa tyhjäkäynnissä, eli ensiöpiiri kytketään irti muuntajasta. Väli säädetään arvoon, mikä on hieman suurempi kuin valokaaren aiheuttava väli. Turvakipinäväli tulisi suojata fyysiseltä näköyhteydeltä kipinäväliin, sillä kipinävälin valokaaren aiheuttama sähkömagneettinen säteily saattaa maldattaa turvakipinävälin kynnystä aktivoitua.

Paras neonvalomuuntajan suojaus saavutetaan käyttämällä Terry Fritzin kehittämää RC-alipäästösuodatinta, joka suojaa muuntajaa parhaiten RF-häiriöiltä ja erilaisilta ylijännitteiltä, esimerkiksi toroidin kipinäpurkauksen osuessa ensiökäämiin.

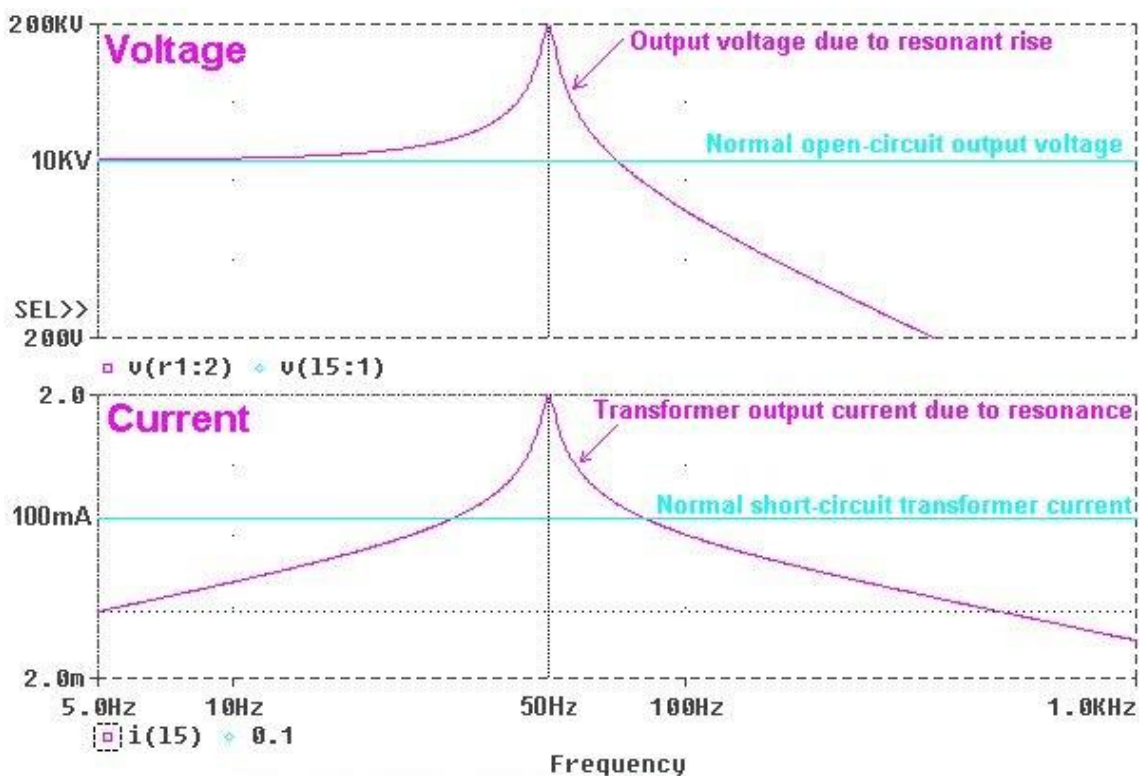


Kuva 24. Terry Fritzin kehittämän RC-suodattimen kytkentäkaavio ja havainnollistamiskuva [33]

Kuvan 24 kytkentäkaaviossa esitetyt metallioksidivaristorit (MOV) suojaavat ylijännitteeltä. Varistorit omaavat suuren resistanssin pienellä jännitteellä. Kun jännite nousee esimerkiksi kipinän osuessa ensiökäämiin, varistorien resistanssi pienenee. Varistorien laskenut resistanssi kytkee kipinän transienttijännitteen synnyttämän virran maadoitukseen, jolloin NST ei vahingoitu. Tätä suodatinta ei käytetty, koska käytetyllä alhaisella teholla toroidista purkautuvan kipinän osuminen ensiökäämiin on epätodennäköistä. [34; 35.]

5.2 Kondensaattori

Kondensaattoria tarvitaan varastoimaan energiaa ja muodostamaan LC-piiri ensiökäämin kanssa. Piirissä käytetyn kondensaattorin tulee kestää suuria, satojen ampeerien suuruisia virtapiikkejä kipinävälin oikosulkiessa kondensaattorin ensiökäämiin ja 500 kHz:n - 600 kHz:n taajuudella tapahtuvaa värähtelyä. Samalla sen tulee kuitenkin aiheuttaa vähän sähköisiä häviöitä. Kondensaattorin kapasitanssi tulee mitoittaa piirille sopivaksi. Kondensaattorin kapasitanssin ei ole suotavaa osua sellaiseen arvoon, jossa se aiheuttaa resonanssin suurjännitemuuntajan induktanssin kanssa.



Kuva 25. Kuvissa ovat teoreettiset kuvaajat jännitteelle ja virralle neonvalomuuntajan ja kondensaattorin resonanssissa 50 Hz:n taajuudella; muuntajan nimellijännite on 10 kV ja –virta 100 mA; resonanssissa jännite ja virta voivat nousta reilusti yli muuntajan ja kondensaattorin sietokyvyn [36]

Käytännössä jännite ja virta eivät nouse resonanssissa kuvan 25 mukaisesti. Kuvassa muuntaja on kytketty ensiöpiiriin, jossa ei ole kipinäväliä. Muuntajan käämityksen välillä tapahtuu läpilyöntejä jännitteen noustessa (turvakipinäväli suojaa tältä) ja muuntajan rautasydän saturoituu estäen virtaa nousemasta.

Muuntajan induktanssi on 508,4 H (kaava 11, s. 22), ja sähköverkon taajuus on 50 Hz. Resonanssin aiheuttavan kapasitanssin arvo saadaan johdettua kaavasta 5 (s. 7):

$$C_{res} = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} \quad (13)$$

C_{res} on resonanssin aiheuttavan kondensaattorin kapasitanssi

L on suurjännitemuuntajan induktanssi

f on sähköverkon taajuus.

Kaavasta kapasitanssiksi tulee 19,9 nF. Kapasitanssin tulisi olla pienempi tai suurempi kuin resonanssin aiheuttavan kapasitanssin. Koska suurjännitemuuntajan impedanssi ja induktanssi ovat paljon suurempia kuin ensiökäämin, ensiökäämin vaikutusta ei oteta huomioon kondensaattorin kapasitanssia laskiessa.

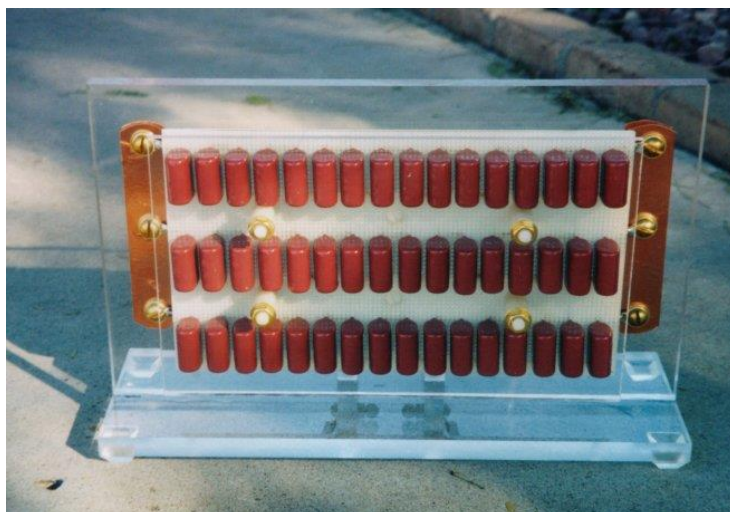
Työssä käytetään teslakäämikäyttöön soveltuvaa 11 nF:n kondensaattoria. Koska 11 nF on vähemmän kuin 19,9 nF (kaava 13), kondensaattori ehtii latautua täyteen verkkotaajuuden jokaisella puolijaksolla. Tästä seuraa, että kondensaattorin ensiöpiirille luovutettava energia jää pienemmäksi kuin suuremman kapasitanssin omaavalla kondensaattorilla.



Kuva 26. Työssä käytetty 10 nF 10 kVAC kondensaattori; kapasitanssimittarilla mitattu kapasitanssi on 11 nF ± 0,13 nF; navat yhdistävään teräslangan tarkoituksena on estää kondensaattorin mahdollinen latautuminen säilytyksessä

Kondensaattorin kanssa rinnankytkettiin 10 M Ω :n vastus, joka purkaa kondensaattorin jännitteen laitteen ollessa pois päältä. Kondensaattoriin varaama energia teslakäämin toimintajännitteellä saadaan käyttäen kaavaa 1 (s. 2). Jännitteelle U (5,75 kV) käytetään suurjännitemuuntajan toisiojännitteen huippuarvoa, joka saadaan kaavalla $U_{RMS} * \sqrt{2}$. Suurin kondensaattorin varaama energia kaavasta 1 on 0,364 J. Yli 10 J energia aiheuttaa vaaraa ihmiselle, joten kondensaattorin varauksen purkava vastus ei ole välttämätön turvallisuuden kannalta.

Toinen sopiva kondensaattorityyppi on useista pienistä kondensaattoreista koottu kondensaattoripankki, jossa sopivaksi laskettu määrä kondensaattoreita on sarjaan- ja rinnankytketty riittävän jännitekeston ja kapasitanssin saavuttamiseksi (ks. 2.2). [36; 37; 38.]

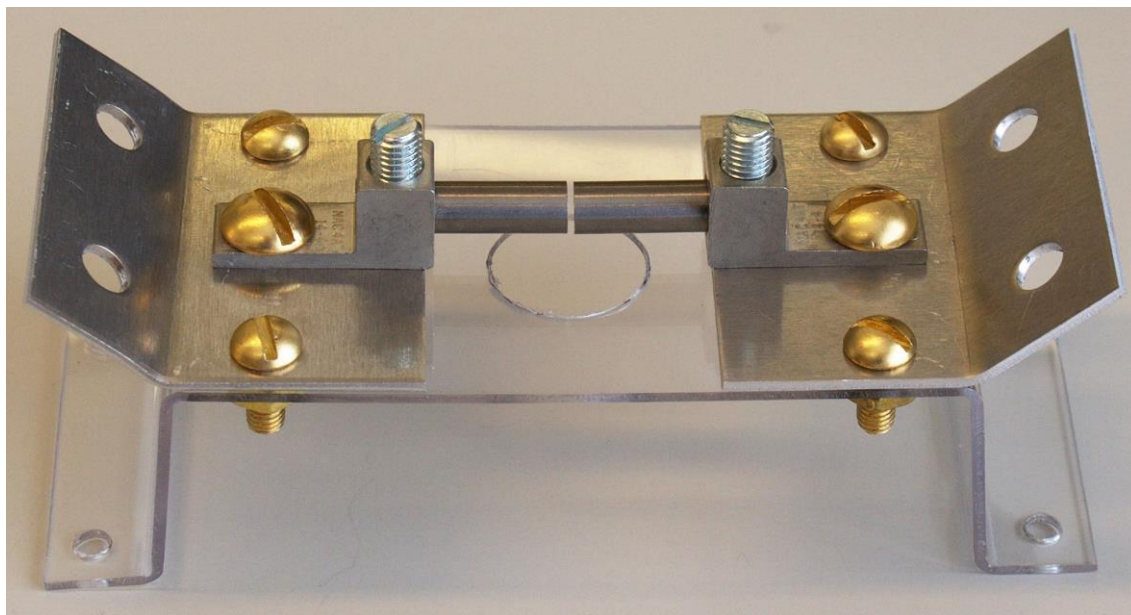


Kuva 27. Havainnekuva kondensaattoripankista [39]

5.3 Kipinäväli

Kipinäväli on eräänlainen suurjännitekytkin, joka kytkee kondensaattorin hetkellisesti ensiökäämiin. Sen muodostavat kaksi elektrodia, joiden välillä on säädettävä ilmaväli. Ilmavälin vuoksi kipinävälin resistanssi on käytännössä ääretön kunnes kondensaattorin jännite nousee, ja elektrodien välillä tapahtuu kriittisen jännitteen saavutettuaan läpilyönti. Läpilyönnin tapahtuessa elektrodien välissä olevan ilman molekyylit ionisoituvat, jolloin muodostuu lähes oikosulkuun verrattavissa oleva sähköä hyvin johtava plasmakanava. Kipinävälin yli menevä suuri sähkövirta ylläpitää plasmakanavaa.

Elektrodit ionisoituvat vähäisissä määrin ympäröivään ilmaan kipinävälin johtaessa riippuen niiden materiaalista. Elektrodiin läpilyöntijännitteen määrittää ilmavälin suuruus, elektrodiin päiden muoto, ilman sisältämä vesimäärä ja lämpötila. Läpilyöntijännitteen suuruutta muuttamalla voidaan vaikuttaa, miten suuri jännite kondensaattorissa saavutetaan ennen sen jännitteen purkautumista. Ilman dielektrinen lujuus on noin 3 kV/mm, mutta tämä arvo ei toimi käytännössä edellä mainittujen läpilyöntijännitteeseen vaikuttavien muuttujien takia.

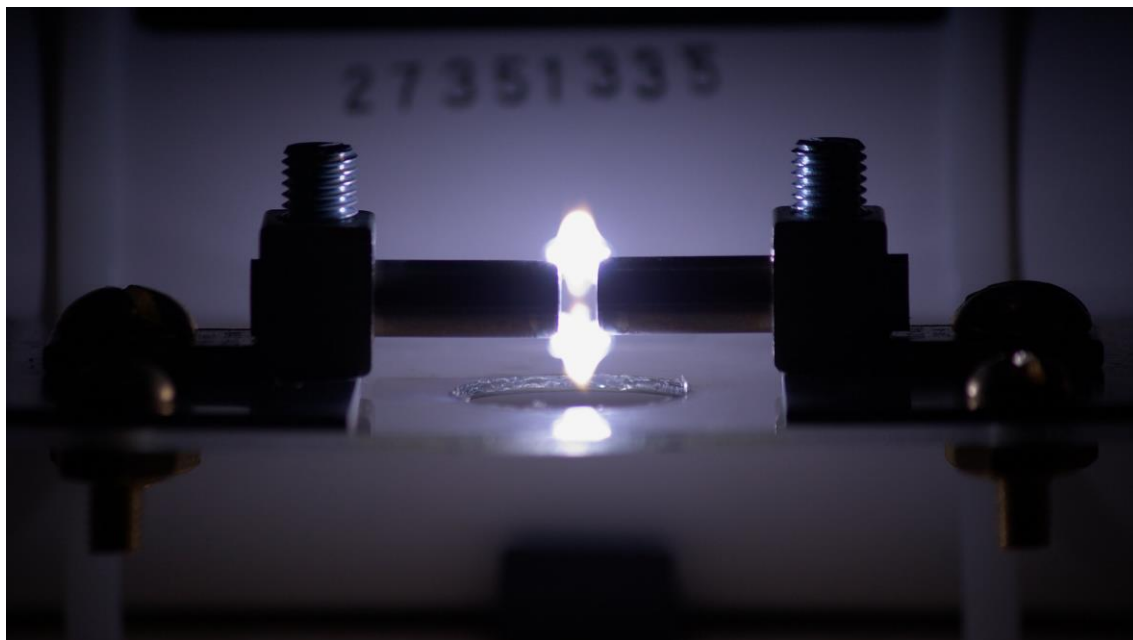


Kuva 28. Työssä käytetty konvektiojäähdytetty staattinen kipinävälikytkin; elektrodiin etäisyys toisistaan on helposti säädettävissä ruuvikiinnityksen ansiosta; kuvassa ilmavälin suuruus ei ole säädetty oikeaksi

Kipinäväli täyttää kytkimen muodossa seuraavat positiiviset ominaisuudet:

- suuri vaadittava jännitteen raja-arvo johtavaan tilaan
- suuri virrankesto johtavassa tilassa
- erittäin nopea kytkeytymisaika
- fyysisesti skaalautuva eri teholuokkiin
- kestää ylikuormitusta.

Negatiivinen ominaisuus kytkimen muodossa on kipinävälin johtavassa tilassa pysymisen edellytyksenä toimiva valokaari, jonka ylläpito vaatii energiaa. Lisäksi kipinäväli ei toimi koko ajan tasaisesti eikä aina sammu jännitteen laskiessa.

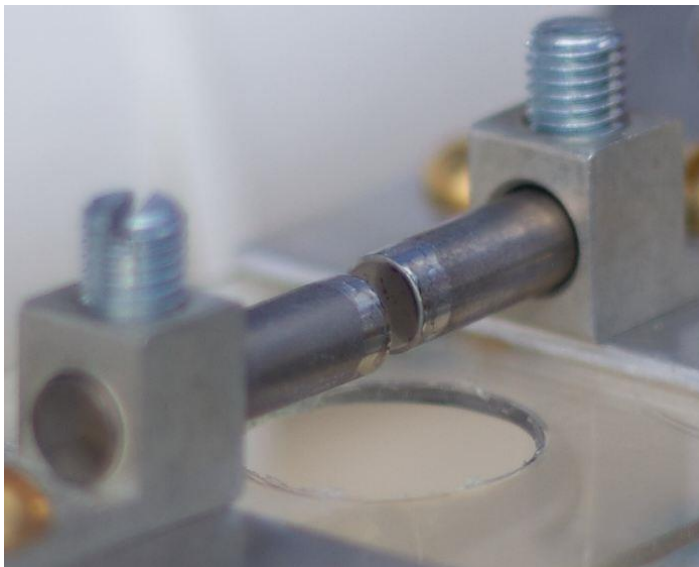


Kuva 29. Kipinäväli teslakäämin toimiessa; elektrodien materiaali on volframi sen korkean lämpötilakestävyyden takia; sulamislämpötila on 3 422 °C

Staattisella kipinävälillä tarkoitetaan, että kipinävälin elektrodit eivät liiku. Staattista kipinäväliä paremmin toimiva on sähkömoottorilla pyöritettävä kipinäväli. Sähkömoottori pyörittää sähköä johtavaa tankoa, joka sulkee elektrodit täsmälleen oikealla hetkellä tangon ollessa lähinnä elektrodeja ja avaa kipinävälin tangon etäisyyden suurentuessa elektrodeihin nähden. Pyörivän kipinävälin tulee sulkea elektrodit juuri, kun kondensaattori on latautunut, joten sen toteutus on haastavampaa.

Staattisen kipinävälin toimivuutta voidaan parantaa jakamalla kipinäväli useampaan kuin kahden elektrodin muodostamaan osioon. Myös kipinävälin aktiivinen jäähdytys esimerkiksi tuulettimella auttaa poistamaan kuumat, ionisoituneet kaasut kipinävälistä ja edesauttaa valokaaren sammumista. Tällöin myös estetään kipinävälin ionisoituneen ilman ennenaikainen plasmaksi muuttuminen, ennen kuin kondensaattori on ehtinyt latautua uudelleen tavoiteltuun jännitteeseen.

Oikean ilmavälin etsintä aloitettiin ensin yhdestä millimetristä. Liian pienellä ilmavälillä toroidin sähköpurkaukset jäivät lyhyemmiksi kuin suuremmalla ilmavälillä. Tällöin kondensaattori ei ehdi latautua tavoiteltuun jännitteeseen, vaan kipinäväli aktivoituu ennenaikaisesti, purkaen kondensaattorin varauksen. Piirin energia on verrannollinen kondensaattorin jännitteen neliöön (kaava 1, s. 2), joten kipinävälin ilmavälin suuruudella voidaan säätää teslakäämin tehoa. Liian suurella elektrodien välillä kipinävälin toiminta muuttuu epäsäännöllisemmäksi, kunnes väliä lisää suurennettaessa, kipinäväli ei sulkeudu ollenkaan. Optimaalinen väli haettiin säätämällä väliä suurimpaan arvoonsa, missä kipinäväli toimi tasaisesti sekä havainnoimalla toroidin purkausten pituutta ja intensiteettiä. Kipinäväli toimi tasaisesti vähän yli kahden millimetrin ilmavälillä.



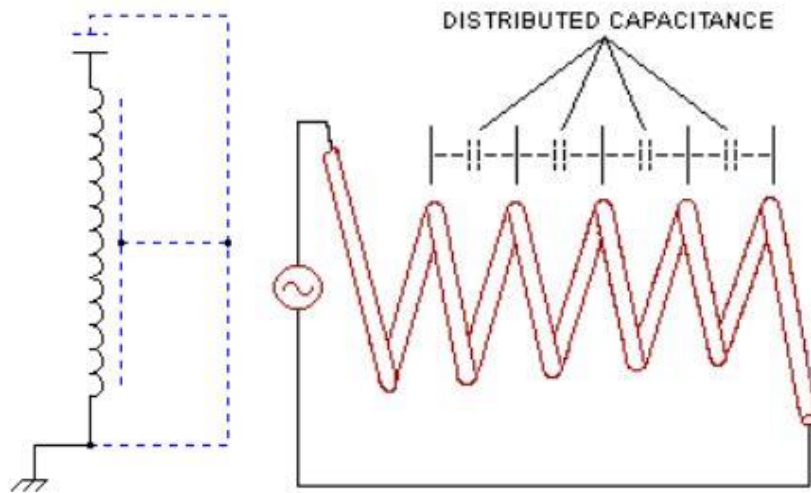
Kuva 30. Plasman aiheuttamaa korroosiota elektrodeissa

Elektrodeja tulee aika ajoin puhdistaa, jotta kipinäväli toimii hyvin. [40; 41; 42; 43.]

5.4 Toisiokäämi

Ensiön resonanssitaajuus säädetään samaksi kuin toisiokäämin (ks. kuva 43, liite 3) ja toroidin muodostaman toision resonanssitaajuus. Tämän takia ensin tarkastellaan toisiokäämiä ja toroidia sekä selvitetään toision resonanssitaajuus. Toisiokäämin resonanssitaajuuden laskemiseksi toisiokäämin induktanssi ja itseiskapasitanssi tulee selvittää.

Toisiokäämi kerää sähkömagneettista induktiota hyödyntäen ensiökäämin energiaa toroidin kanssa muodostamallaan värähtelypiirillä. Käämilangan kapasitanssi maahan nähden ja jokaisen kierroksen välillä olevan hyvin pienen kapasitanssin vaikutus resonanssitaajuuteen on merkittävä suurilla taajuuksilla.



Kuva 31. Käämilangan kapasitanssi maahan nähden ja käämilangan itseiskapasitanssi kierrosten välillä [44, s. 3]

Käämityn osuuden korkeus on 250 mm ja leveys 89 mm. Käämissä on käytetty 24 AWG, eli 0,51 mm halkaisijaltaan olevaa emalilla eristettyä kuparista käämilankaa, joka on kierretty PVC-putken ympärille. Käämissä on 443 kierrosta käämilankaa. Käämilangan pituus on

$$l = 2\pi Nr \quad (14)$$

l on käämilangan pituus

N on käämilangan kierrosmäärä

r on käämin säde.

Kaavasta saatu käämilangan pituus on 123,86 m. Käämi on päällystetty lakalla, joka estää käämilangan purkautumisen ja suojaa käämilangan välisiltä läpilyönneiltä. Käämi on ilmasydäminen solenoidi.

Induktanssi selvitetään Wheeler-Rosenbaumin kaavalla, jolla fyysiset mittausrvirheet poislukien suurin virhe on noin 0,02 %:

$$L_S = 0.002\pi dN^2 \left[\ln \left(1 + \frac{\pi d}{2h} \right) + \frac{1}{2,303 + 3,213 \frac{h}{d} + 1,784 \left(\frac{h}{d} \right)^2} \right] \quad (15)$$

L_S on käämin induktanssi mikrohenryinä

N on käämin kierrosmäärä

d on käämin leveys senttimetreinä

h on käämin korkeus senttimetreinä. [45.]

Induktanssi kaavasta on $5\,306,49 \mu\text{H} \approx 5,3 \text{ mH}$. Käämin induktanssi LC-mittarilla mitattuna on $5,37 \pm 0,05 \text{ mH}$, kun mittaustaajuus on $66,7 \text{ kHz}$. Mittarin lukemaa pidetään suuntaa-antavana. Käämin itseiskapasitanssi lasketaan R. G. Medhurstin kehittämällä kaavalla:

$$C_K = \frac{0,29}{2,54} * h + \frac{0,41}{2,54} * r + \frac{1,94}{2,54} \sqrt{\frac{r^3}{h}} \quad (16)$$

C_K on käämin itseiskapasitanssi pikofaradeina

h on käämin korkeus senttimetreinä

r on käämin säde senttimetreinä. [46.]

Itseiskapasitanssi kaavasta on $5,01 \text{ pF}$. Alkuperäinen kaava toimii brittiläisellä mittajärjestelmällä, kaava 16 on muunnettu toimimaan SI-yksiköillä jakamalla $2,54$:llä kaavan alkuperäiset numeroarvot. Toisiokäämin resonanssitaajuus ilman toroidia on $976,1 \text{ kHz}$ (ks. kaava 5, s. 7). [44, s. 2.]

5.5 Toroidi

Toisiokäämin päällä oleva kapasitanssia lisäävä kappale on yksi tärkeimmistä komponenteista kipinäpurkausten pituuden lisäämiseksi suurjännitemuuntajan lisäksi. Tämä kappale on yleensä pallon tai toroidin muotoinen. Voidaan yleistää, että kappaleen koon kasvaessa, lisääntyy myös sen kapasitanssi. Pallon muotoisella kappaleella sähkökenttä

jakautuu tasaisemmin kuin toroidin muotoisella kappaleella, mikä aiheuttaa toroidiin ver-
ratessa useammin tapahtuvia lyhyitä purkauksia.



Kuva 32. Työssä käytetty alumiininen toroidi

Toroidin muotoista kappaletta käytetään seuraavista syistä:

- Toroidin kapasitanssi lisätään toisiokäämin itseiskapasitanssin kanssa, jolloin toisiopiirin kokonaiskapasitanssi lisääntyy. Ilman toroidia toisiokäämin resonanssitaajuus olisi korkea ja ensiöpiirin viritys tähän taajuuteen voi olla hankalaa.
- Toroidi suojaa toisiokäämin yläkierroksia sähkökentän vaikutuksilta. Toisiokäämin yläosan käämilanka kytkeytyy fyysisesti toroidiin. Ilman toroidia toisiokäämin yläosan ja ympäröivän ilman välillä olisi suuri sähkökentän gradientti, jolloin kipinät voivat purkautua suoraan toisiokäämin yläosan käämikiirroksista. Käämin päällä oleva toroidi on samassa potentiaalissa käämin kanssa, jolloin sähkökentän gradientti poistuu ja kipinät eivät enää purkaudu käämityksestä.

- Kipinäpurkaukset tarvitsevat energialähdettä. Toisiokäämi itsessään ei pysty syöttämään pitkän kipinän tarvitsemaa virtaa suuren induktanssinsa takia. Toisiokäämin itseiskapasitanssi jakautuu käämikierroksiin, joten rajallinen määrä energiaa varastoituu purkausten saataville. Toroidin kapasitanssi aiheuttaa toisiokäämin itseiskapasitanssin jakautumisen toroidin kapasitanssiin, jolloin toroidi muodostaa hyvän energiavaraston kipinöille. Kipinät ovat selkeästi voimakkaampia toroidia käyttäessä.
- Toroidissa sähkökenttä jakautuu voimakkaammin sen reunoille. Toroidin kaarevuussäteen kasvaessa, vaadittava potentiaaliero ympäröivän ilman kanssa plasmasäikeiden muodostumiseksi kasvaa, jolloin purkaukset tapahtuvat harvemmin, mutta suuremmalla intensiteetillä.

Toroidin voidaan ajatella olevan osa kondensaattoria, missä toroidi on yksi levy, ilma toimii väliaineena ja toinen levy on maa. Toroidin leveys on 20,5 cm ja korkeus 5,5 cm. Toroidin muotoisen esineen kapasitanssi saadaan kaavalla

$$C_T = \frac{2,8}{2,54} * \left(1,2781 - \frac{D2}{D1}\right) * \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * (D1 - D2) * \left(\frac{D2}{2}\right)}{4 * \pi}} \quad (17)$$

C_T on toroidin kapasitanssi pikofaradeina

$D1$ on toroidin leveys senttimetreinä

$D2$ on toroidin korkeus senttimetreinä. [47.]

Kaavasta toroidin kapasitanssiksi tulee 8,96 pF. Alkuperäinen kaava toimii brittiläisellä mittajärjestelmällä, kaava 17 on muunnettu toimimaan SI-yksiköillä jakamalla 2,54:llä kerroin 2,8. [48; 49.]



Kuva 33. Toroidista lähtevien purkausten pituutta voi lisätä purkamalla toroidin varaus hyödyn-
täen pistemäistä esinettä; kuvassa esine on toroidin päälle asetettu teräsviila; 1,6 sekunnin
valotusaika

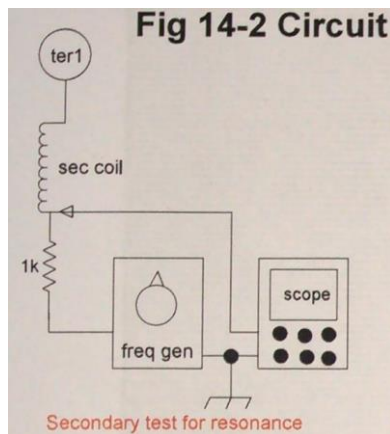
5.6 Toisiopiirin laskettu ja mitattu resonanssitaajuus

Toisiokäämin ja toroidin kapasitanssit lasketaan yhteen rinnakkaisten kapasitanssien kaavalla (ks. 2.2), jolloin saadaan toision kapasitanssi: $C_S = C_K * C_T = 13,97 \text{ pF}$. Nyt kun toisiokäämin induktanssi ($5\,306,49 \text{ }\mu\text{H}$) ja toision kapasitanssi ($13,97 \text{ pF}$) ovat tiedossa, arvot sijoitetaan resonanssitaajuuden kaavaan

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_S}} \quad (18)$$

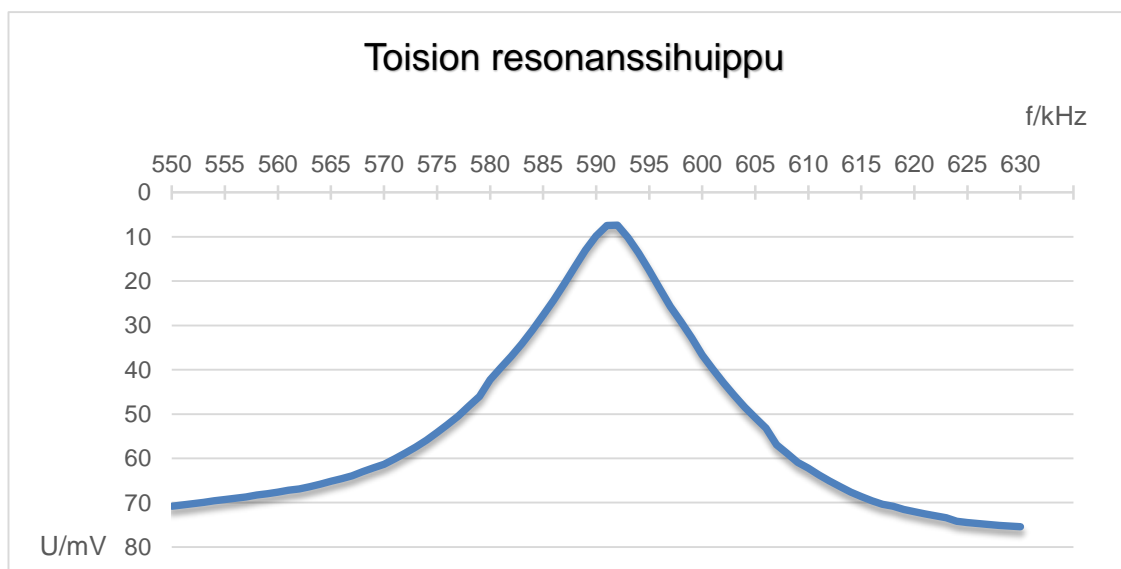
josta toision resonanssitaajuudeksi saadaan $584,5 \text{ kHz}$.

Toision resonanssitaajuutta mitattaessa toroidi on kiinnitetty toisiokäämiin. Toision lähiympäristön tulisi olla tyhjä, muutoin resonanssitaajuus vääristyy.



Kuva 34. Kytentäkaavio toisiopiirin resonanssitaajuuden selvittämiseksi [liite 1]

Funktiogeneraattorin lähtötaajuutta säätämällä on tarkoitus hakea kohta, jossa oskilloskoopin mitaaman signaalin amplitudi notkahtaa pienimpään arvoonsa.

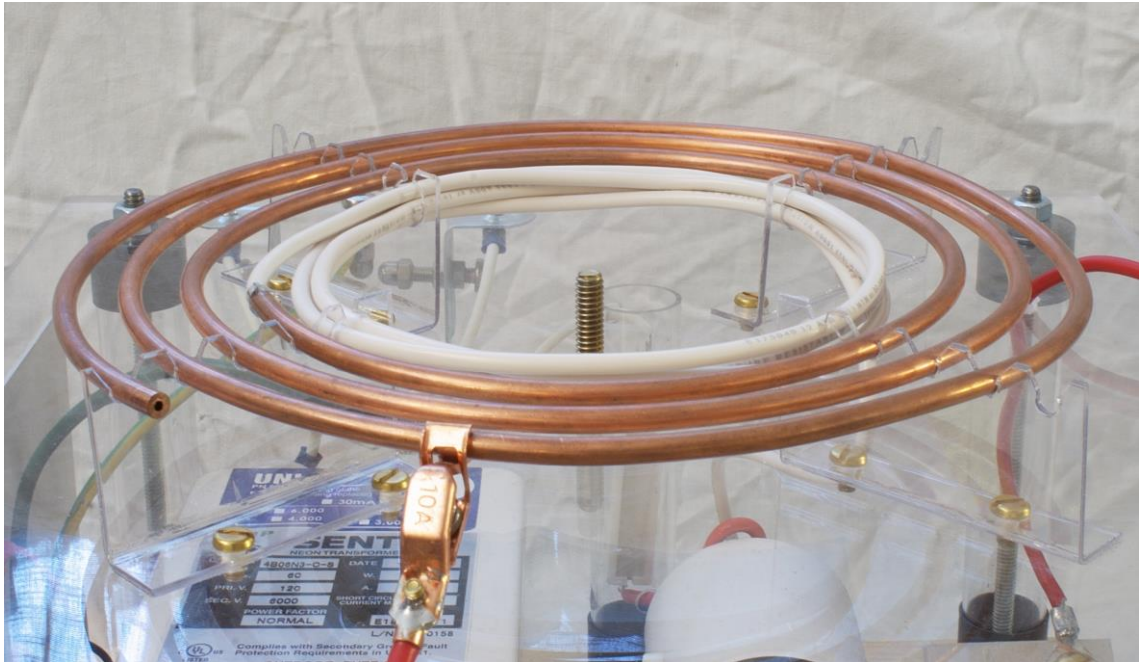


Kuva 35. Kaaviossa on toision resonanssitaajuuden huippu; jännitteen arvot ovat käänteiset; resonanssi tapahtuu noin 591 kHz:n taajudella

Toision oskilloskoopilla mitattu kaistanleveys on 3,5 kHz (ks. 2.7). Hyvyysluku Q saadaan kaavalla 6 (s. 8), josta tulee 169.

5.7 Ensiökäämi

Ensiökäämi kondensaattorin kanssa muodostaa yhdessä LC-värähtelypiirin. Käämi luo magneettikentän, joka kytkeytyy toisiokäämiin. Käämissä tulee välttää jyrkkiä kaarteita koronasäteilyn välttämiseksi.

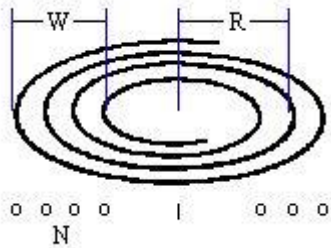


Kuva 36. Ensiökäämi; etualalla näkyy induktanssin säädön mahdollistava väliottohauenleuka

Käämi koostuu noin 210 cm:n pituisesta Arkhimedeen spiraalimuotoon taivutetusta 4,8 mm halkaisijaltaan olevasta kupariputkesta ja noin 150 cm:n pituisesta halkaisijaltaan 2,05 mm olevasta kuparijohdosta, joka on kierretty vyyhdiksi. Vyyhdin ei tarvitse olla kierretty täysin symmetrisesti. Arkhimedeen spiraalissa sisäkkäiset kierrokset ovat yhtä etäällä toisistaan. Kupariputkea on 4 kierrosta ja johdivyyhtiä on 3,5 kierrosta.

Käämin ulkohalkaisija on 20,9 cm ja sisähalkaisija noin 12 cm. Kupariputkien väli on keskimäärin noin 8 mm, jolla vältetään käämin väliset läpilyönnit laitteen toimiessa. Muut metallit, esimerkiksi teräs, eivät ole hyviä korkeataajuisessa käytössä niiden suuremman impedanssin takia.

Käämi koostuu kahdesta eri geometrialtaan olevasta kokonaisuudesta, Arkhimedeen spiraalista ja spiraalin kehän sisällä olevasta johdinvyyhdistä (ks. kuva 36, ed. s.).



Kuva 37. Arkhimedeen spiraalin kaavaa selventävä kuva [46]

Käämin leveys W on 4,3 cm, säde R on 8,5 cm ja kierrosmäärä N on neljä. Arkhimedeen spiraalin muotoisen kupariputken induktanssin kaava mikrohenryinä on:

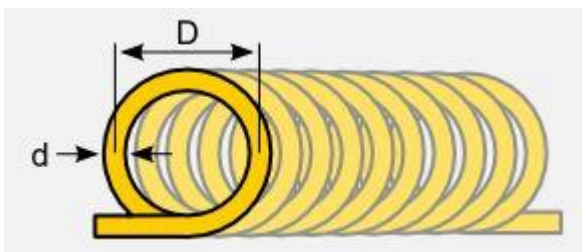
$$L_{\text{spiraali}} = \frac{0,374(NR)^2}{8R+11W} \quad (19)$$

N on spiraalin kierrosmäärä

R on spiraalin säde senttimetreinä

W on spiraalin leveys senttimetreinä. [46.]

Kaavasta spiraalin suurimmaksi induktanssiksi tulee 3,75 μH .



Kuva 38. Johdinvyyhdin kaavaa selventävä kuva [50]

Vyyhdin leveys D on 120 mm ja johtimen halkaisija d on 2,05 mm.

Johdivyyhdin induktanssin kaava mikrohenryinä on:

$$L_{vyyhti} = N^2 \mu \left(\frac{D}{2}\right) * \left(\ln\left(\frac{8*D}{d}\right) - 2\right) \quad (20)$$

N on vyyhdin kierrosmäärä

μ on ilman permeabiliteetti ($\approx 4\pi * 10^{-7}$ H/m)

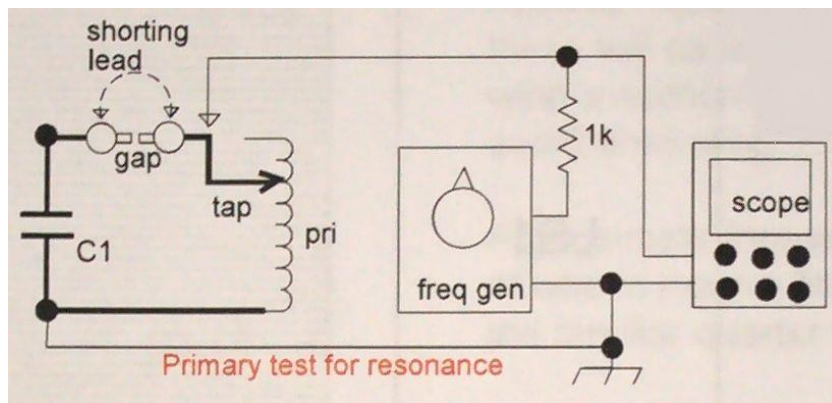
D on vyyhdin halkaisija

d on johtimen halkaisija. [50.]

Kaavasta vyyhdin induktanssiksi tulee 3,83 μH . Käämin suurin väliottosäädön mahdollistama kokonaisinduktanssi $L_p = L_{spiraali} + L_{vyyhti}$ on 7,58 μH . Induktanssimittarilla käämin induktanssiksi mitattiin 8,93 $\mu\text{H} \pm 0,09 \mu\text{H}$ mukaan lukien väliottojohtimen induktanssi. Väliottojohtimen induktanssia on vaikea laskea, koska sen pieninkin asennon vaihto vaikuttaa resonanssitaajuuteen huomattavasti. Tämän takia ensiökäämin resonanssitaajuus selvitetään mittaamalla (ks. 5.8). [43; 51.]

5.8 Ensiöpiirin mitattu resonanssitaajuus

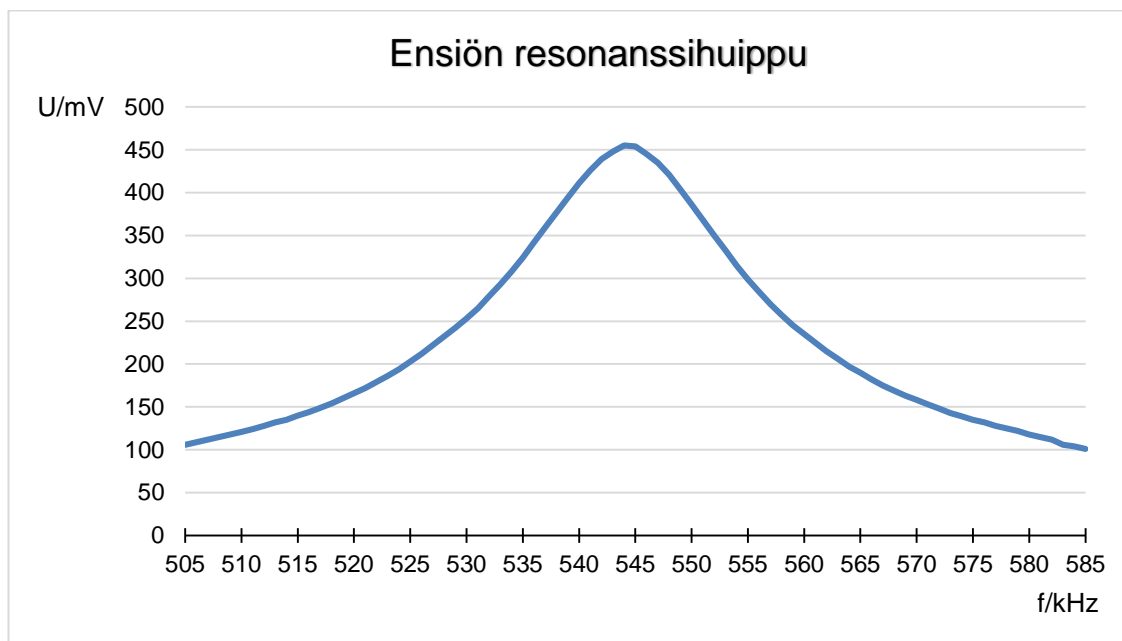
Väliottosäädön mahdollistama resonanssitaajuusalue mitataan oskilloskoopilla.



Kuva 39. Kytkentäkaavio ensiöpiirin resonanssitaajuuden selvittämiseksi [liite 1]

Väliottosäädön mahdollistama ensiön mitattu resonanssitaajuus kuvan 39 mukaisella kytkennällä on välillä 485 - 710 kHz.

Toision resonanssi tapahtuu 591 kHz:n taajuudella (ks. kuva 35, s. 36), joten ensiökäämin induktanssin säätövara riittää. Käämin induktanssi säädettiin arvoon, jossa kipinän pituus oli suurin.



Kuvio 1. Kaaviossa on ensiön resonanssitaajuuden huippu, kun kipinän pituus on suurin; resonanssi tapahtuu 545 kHz:n taajuudella

Toroidista purkautuva kipinä lisää toisiopiirin kapasitanssia, laskien toisiopiirin resonanssitaajuutta. Tämän takia ensiön resonanssitaajuus säädetään hiukan alhaisemmaksi kuin toision. Kun kipinän pituus oli suurin, ensiön resonanssitaajuus oli säädetty 7,8 % pienemmäksi kuin toision resonanssitaajuus.

Ensiön oskilloskoopilla mitattu kaistanleveys on 19 kHz (ks. 2.7), jolloin hyvyysluku kaavasta 6 (ks. s. 8) on noin 29. Ensiön alhainen hyvyysluku (29) verrattuna toision hyvyyslukuun (169) kertoo, että ensiön häviöt ovat suuremmat kuin toisiolla. [52.]

5.9 Sähköverkon suojaus

Työssä käytetään valmista suodatinkomponenttia, joka pienentää verkkoon kohdistuvia häiriöitä. Herkkiä sähkölaitteita ei tarvitse pienitehoisen laitteen kanssa irrottaa sähköverkosta.



Kuva 40. Sähköverkkoa häiriöiltä suojaava RLC-suodatin

6 Pohdintaa

Työn tavoitteena oli rakentaa toimiva teslakäämi. Laitteen toiminnan mahdollistavien resonanssipiirin toiminnan ymmärtäminen oli tärkeässä osassa. Komponenttien toimintaa tutkittiin teoreettisten laskelmien ja käytännön mittausten avulla. Teoreettisten laskelmien ja mitattujen tuloksien havaittiin olevan hyvin yhteneväiset.

Hyvin toimivan teslakäämin määritykseksi asetettiin noin 30 cm:n pituinen kipinä. Erästä valokuvasta mitattu kipinän pituus oli noin 28 cm, joten tavoite saavutettiin. Odotettavissa olisi todennäköisesti vieläkin suurempia havaittuja kipinän pituuksia, sillä laitteen käyttöaika jäi vähäiseksi, eikä suurin kipinän pituus ollut kipinöitä valokuvatessa päätavoite.

Lähteet

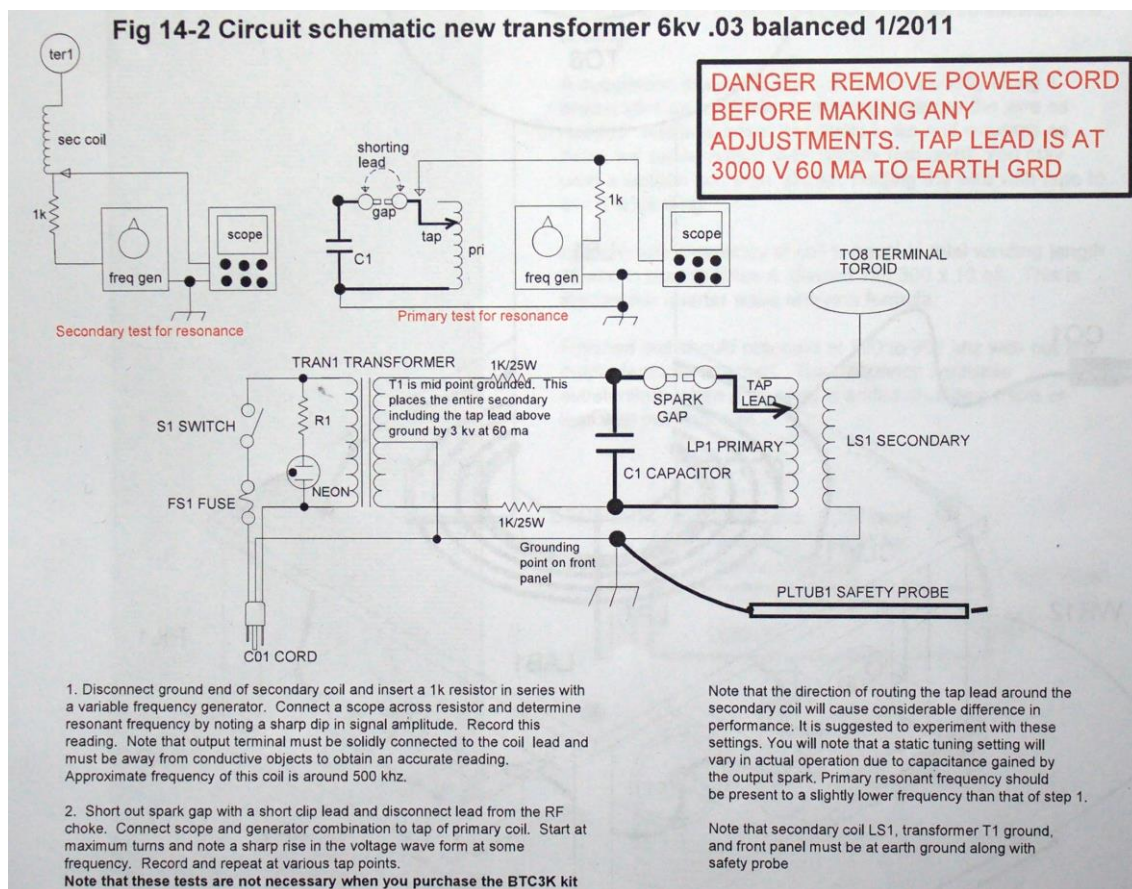
- 1 Tesla inside the lab. Verkkodokumentti. <http://www.pbs.org/tesla/ins/lab_tes-coil.html>. Luettu 20.10.2014.
- 2 Pate, Richard. 2012. Tesla coil spark gap technology. Verkkodokumentti. <<http://home.earthlink.net/~drestinblack/sparkgap.htm>>. Luettu 20.10.2014
- 3 Englanninkielinen wikipedia. Inductor. Verkkodokumentti. <<http://en.wikipedia.org/wiki/Inductor>>. Luettu 20.10.2014.
- 4 Electronics Tutorials. Series resonance circuit. Verkkodokumentti. <<http://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/series-resonance.html>>. Luettu 20.10.2014.
- 5 Leppäkorpi, Lasse. 2006. Elektroniikan peruskurssi. Verkkodokumentti. <https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-66.2120/materiaali/S-66_2120_lu-ento_06.pdf>. Luettu 20.10.2014
- 6 Englanninkielinen wikipedia. LC circuit. Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/LC_circuit>. Luettu 20.10.2014.
- 7 Allaboutcircuits. Q and bandwidth of a resonant circuit. Verkkodokumentti. <http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_6/6.html>. Luettu 20.10.2014.
- 8 Gerekos, Chris. 2012. Impedance. Verkkodokumentti. <http://www.hazardousphysics.com/main/zeus/The_Zeus_Tesla_Coil_2.html#lc-imp>. Luettu 20.10.2014.
- 9 Englanninkielinen wikipedia. Q factor. Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/Q_factor>. Luettu 20.10.2014.
- 10 Techlib. Q-Factor. Verkkodokumentti. <<http://www.techlib.com/reference/q.htm>>. Luettu 20.10.2014.
- 11 Englanninkielinen wikipedia. Bandwidth (signal processing). Verkkodokumentti. <[http://en.wikipedia.org/wiki/Bandwidth_\(signal_processing\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Bandwidth_(signal_processing))>. Luettu 20.10.2014.
- 12 Englanninkielinen wikipedia. Resonant inductive coupling. Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/Resonant_inductive_coupling>. Luettu 7.11.2014.
- 13 Tilbury, Mitch. 2008. The ultimate tesla coil design and construction guide. New York: McGraw-Hill.

- 14 Atkinson, Chip; Phillips, Ed; Rzeszotarski, Mark; Stephens, R.W. 1996. Tesla coil safety information. Verkkodokumentti. <<http://www.pupman.com/safety.htm>>. Luettu 20.10.2014.
- 15 Duke University. Safety warning. Verkkodokumentti. <<http://www.phy.duke.edu/~rgb/Class/safety.html>>. Luettu 20.10.2014.
- 16 Englanninkielinen wikipedia. Skin effect. Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect>. Luettu 20.10.2014.
- 17 Beaty, Warren. 2012. Debunking some tesla myths. Verkkodokumentti. <<http://amasci.com/tesla/teslafaq.html>>. Luettu 20.10.2014.
- 18 Kluge, Stefan. 2009. Stefan's Tesla-Pages (safety page). Verkkodokumentti. <<http://www.teslathon.de/stefan/tc/safety.htm>>. Luettu 20.10.2014.
- 19 Englanninkielinen wikipedia. The "skin effect". Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_coil#The_.27skin_effect.27>. Luettu 20.10.2014.
- 20 Santa Cruz institute for particle physics. Safety. Verkkodokumentti. <<http://scipp.ucsc.edu/edu/tesla/teslacoil/safety.html>>. Luettu 7.11.2014.
- 21 Suomenkielinen wikipedia. Oskillaattori. Verkkodokumentti. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Oskillaattori>>. Luettu 20.10.2014.
- 22 Burnett, Richard. Operation of the tesla coil. Verkkodokumentti. <<http://www.richieburnett.co.uk/operation.html>>. Luettu 20.10.2014.
- 23 Suomenkielinen wikipedia. Ampèren laki. Verkkodokumentti. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Amp%C3%A8ren_laki>. Luettu 20.10.2014.
- 24 Young, Wayne. 2013. Tesla coil resonance. Verkkodokumentti. <<https://www.flickr.com/photos/30974264@N02/9041258653/>>. Luettu 20.10.2014.
- 25 Burnett, Richard. Quenching. Verkkodokumentti. <<http://www.richieburnett.co.uk/operatn2.html#quenching>>. Luettu 20.10.2014.
- 26 Anderson, Barton B. 2000. The classic tesla coil. Verkkodokumentti. <<http://www.tb3.com/tesla/tcoperation.pdf>>. Luettu 20.10.2014.
- 27 Wireless power consortium. Qi coupling factor. Verkkodokumentti. <<http://www.wirelesspowerconsortium.com/technology/coupling-factor.html>>. Luettu 7.11.2014.

- 28 Bæverfjord, Bjørn. 2010. Spark gap tesla coil power sources. Verkkodokumentti. <http://wiki.4hv.org/index.php/Spark_Gap_Tesla_Coil#Power_Sources>. Luettu 20.10.2014.
- 29 Munich, Adam. Neon transformers. Verkkodokumentti. <<http://adam-munich.com/neon-sign-transformers/>>. Luettu 7.11.2014.
- 30 Gouda, Sameh. 2013. 50 Hz Appliance & 60 Hz power supply and vice versa. Verkkodokumentti. <<http://electricity2all.blogspot.fi/2013/05/can-we-connect-50-hz-appliance-to-60-hz.html>>. Luettu 20.10.2014.
- 31 Oversteet, Ross. 2003. High voltage power supply units. Verkkodokumentti. <http://www.capturedlightning.org/hot-streamer/ross/projects/AC_coil/psu.html>. Luettu 7.11.2014.
- 32 Englanninkielinen wikipedia. Voltage divider. Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/Voltage_divider>. Luettu 7.11.2014.
- 33 Steffan's tesla coil page. Verkkodokumentti <http://www.twotowers.com/tesla/tes-sie_1_tesla_coil.html>. Luettu 7.11.2014.
- 34 Beaty, William. 1994. Tesla coil builders' hints. Verkkodokumentti. <<http://amasci.com/tesla/tc.html>>. Luettu 20.10.2014.
- 35 Englanninkielinen wikipedia. Varistor. Verkkodokumentti. <<http://en.wikipedia.org/wiki/Varistor>>. Luettu 7.11.2014.
- 36 Burnett, Richard. Resonant charging. Verkkodokumentti. <<http://www.richieburnett.co.uk/resonant.html#resonant>>. Luettu 7.11.2014.
- 37 Phillips, Ed. 2003. NST power rating con. Verkkodokumentti. <<http://www.tesla-coil.com/nst-power-rating.htm>>. Luettu 7.11.2014.
- 38 Electrical Safety Committee. 1991. Capacitor safety. Verkkodokumentti. <<http://www.stephstuff.com/esafe/bulletins/capSafety.html>>. Luettu 20.10.2014.
- 39 Verkkodokumentti. <http://www.drsparksite.com/images/800_mmc.jpg>. Katsottu 7.11.2014.
- 40 Hong, Alice. 2000. Dielectric strenght of air. Verkkodokumentti. <<http://hypertext-book.com/facts/2000/AliceHong.shtml>>. Luettu 20.10.2014.
- 41 Burnett, Richard. Static gaps. Verkkodokumentti. <<http://www.richieburnett.co.uk/static.html>>. Luettu 20.10.2014.

- 42 Burnett, Richard. Tesla coil components. Verkkodokumentti. <<http://www.richieburnett.co.uk/parts.html>>. Luettu 20.10.2014.
- 43 Mehlhose, Herbert. Tesla coil design. 1999. Verkkodokumentti. <http://home.wtal.de/herbs_teslapage/design.html>. Luettu 20.10.2014.
- 44 Behrend, Matt. How a tesla coil works. Verkkodokumentti. <<http://taylor-ledge.com/reference/Machines/TeslaCoil.pdf>>. Luettu 20.10.2014.
- 45 Weaver, Robert. 2012. Numerical methods for inductance calculation. Verkkodokumentti. <<http://electronbunker.ca/CalcMethods3b.html>>. Luettu 20.10.2014.
- 46 Stolz, Mark. Formula page. Verkkodokumentti. <<http://tesla-coils4christ.org/TCFormulas/TCFormulas.htm>>. Luettu 20.10.2014.
- 47 Bell, Steve. 2007. Capacitance of toroid. Verkkodokumentti. <http://deepfried-neon.com/tesla_f_calctoroid.html>. Luettu 20.10.2014.
- 48 Burnett, Richard. Parts2. Verkkodokumentti. <<http://www.richieburnett.co.uk/parts2.html>>. Luettu 20.10.2014.
- 49 Gerekos, Chris. 2012. Top load. Verkkodokumentti. <http://www.hazardousphysics.com/main/zeus/The_Zeus_Tesla_Coil_3.html#secondary-topload>. Luettu 20.10.2014.
- 50 EEWeb. Coil inductance. Verkkodokumentti. <<http://www.eeweb.com/toolbox/coil-inductance/>>. Luettu 20.10.2014.
- 51 Suomenkielinen wikipedia. Spiraali. Verkkodokumentti. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Spiraali>>. Luettu 20.10.2014.
- 52 Gustavson, Stefan. 2013. Tuning your oneTesla. Verkkodokumentti. <http://webstaff.itn.liu.se/~stegu/onetesla/onetesla_tuning_guide_draft.pdf>. Luettu 20.10.2014.

Kytentäkaavio



Kuva 41. Rakennussarjan valmistajan kytkentäkaavio; www.amazing1.com

Tärkeimmät kaavat

Spiral Coil Inductance

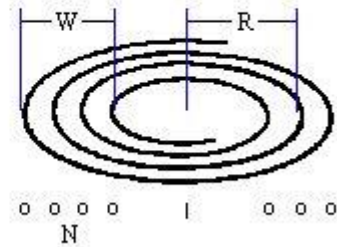
$$L = \frac{(NR)^2}{8R + 11W}$$

L = inductance of coil in microhenrys (μH)

R = average radius of the coil in inches

N = number of turns

W = width of the coil in inches



Coil Inductance Model.

The inductance of the wire a coil is:

$$L_{loop} \approx N^2 \mu_o \mu_r \left(\frac{D}{2} \right) \cdot \left(\ln \left(\frac{8 \cdot D}{d} \right) - 2 \right)$$

Medhurst

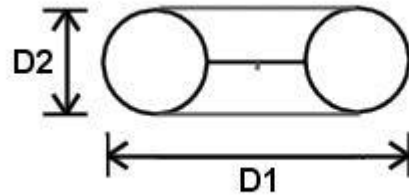
$$C = 0.29 L + 0.41 R + 1.94 \sqrt{\frac{R^3}{L}}$$

C = self capacitance in picofarads

R = radius of secondary coil in inches

L = length of secondary coil in inches

Toroidi



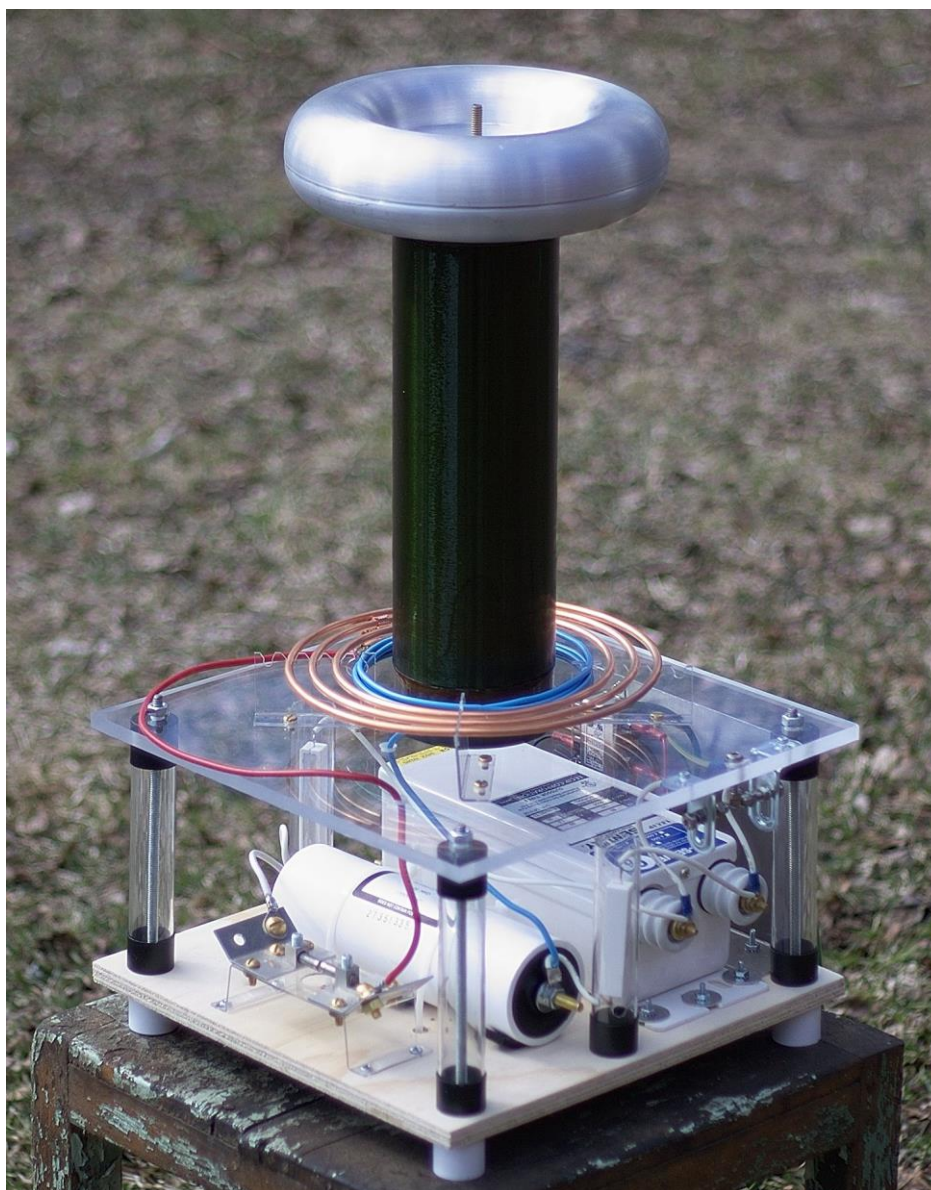
$$C = 2.8 \times \left(1.2781 - \frac{D2}{D1}\right) \times \sqrt{\frac{2 \times \pi^2 \times (D1 - D2) \times \left(\frac{D2}{2}\right)}{4 \times \pi}}$$

Wheeler-Rosenbaum

Wheeler's continuous formula was first made known to me by Rodger Rosenbaum [18] who analysed and modified it, reducing the maximum error to about 0.02%, by adjusting the constants in the denominator of the right side of the formula. His version is as follows:

$$L_S = .002\pi dN^2 \left[\ln\left(1 + \frac{\pi d}{2\ell}\right) + \frac{1}{2.303 + 3.213\ell/d + 1.784(\ell/d)^2} \right] \quad (32)$$

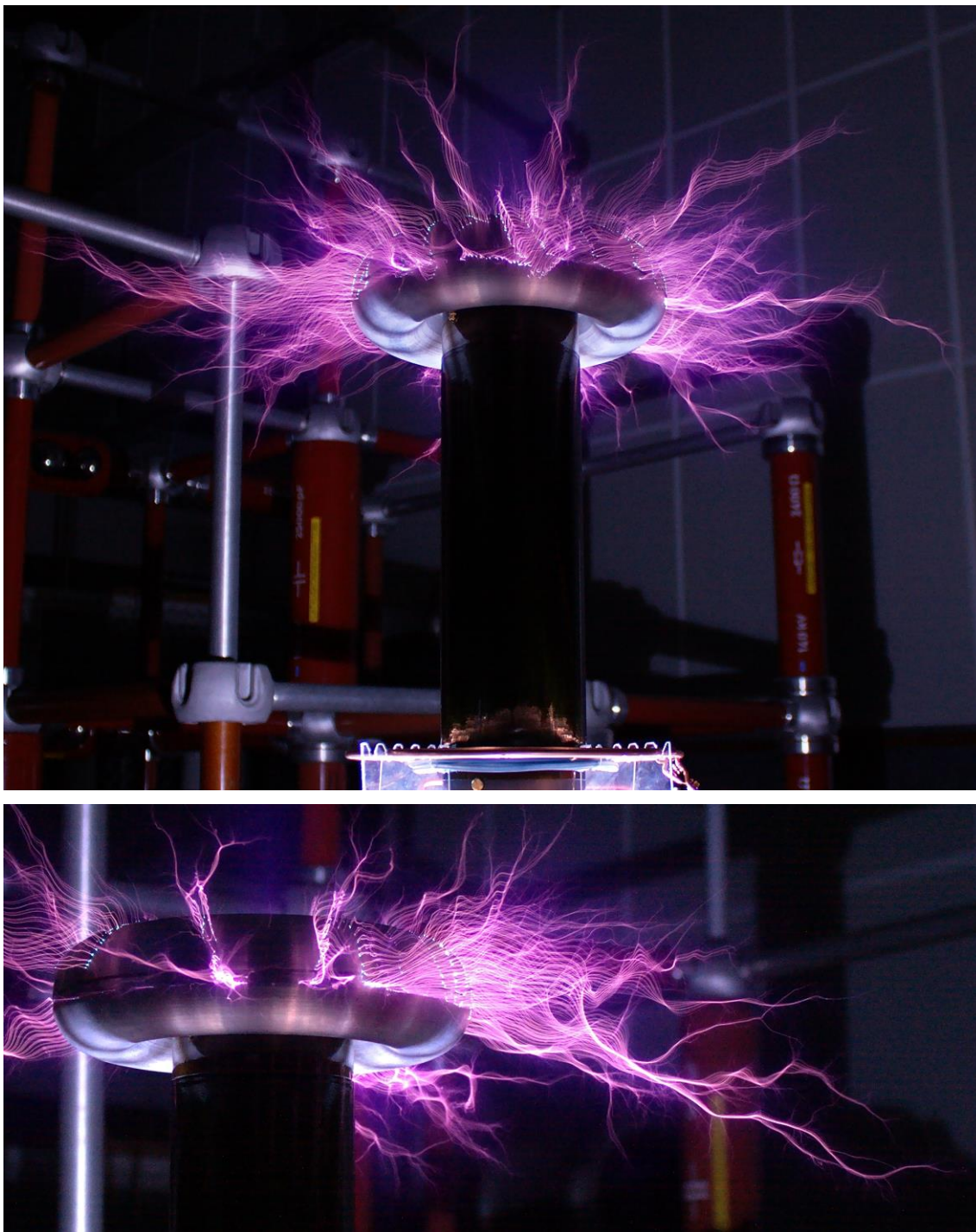
Valokuvia



Kuva 42. Valmis teslakäämi



Kuva 43. Toisiokäämi



Kuva 44. Kuvia kipinöistä