

Mladi za napredek Maribora 2014

31. srečanje

Visokofrekvenčni resonančni transformator

Fizika

Raziskovalna naloga

0€q | 1111SŠ0T ÒP ÄÖWÔT 0P ÊÄ 0P ÖZÖWŠQ
T^} q | 1111ÄT 0EUSUÄRÖÖUÖQ
¥[| 11111111ÖÖQ PÖZÖRÄT 0EÖÖUÜ

Maribor, februar 2014

Mladi za napredek Maribora 2014

31. srečanje

Visokofrekvenčni resonančni transformator

Fizika

Raziskovalna naloga

Maribor, februar 2014

Vsebinsko kazalo

Kazalo slik	4
Kazalo tabel	4
1. Povzetek.....	5
2. Zahvala.....	5
3. Uvod.....	6
4. Metodologija dela.....	6
5. Zgradba in delovanje Teslinega transformatorja.....	7
5.1. Osnovna zgradba Teslinega transformatorja.....	7
5.2. Primarni nihajni krog.....	8
5.3. Sekundarni nihajni krog	9
6. Izpeljava enačb za dimenzioniranje sekundarne tuljave.....	12
6.1. λ -četrtnski pogoj.....	12
6.2. Izpeljava enačb z upoštevanjem λ -četrtnskega pogoja.....	13
6.3. Diskusija ali <i>kakšen je pomen izpeljanih enačb?</i>	16
6.4. Izpeljava enačb z upoštevanjem λ -četrtnskega pogoja in dodatne kapacitete	16
7. Eksperimentalna potrditev izpeljanih zvez.....	17
7.1. Testne tuljave brez dodatne kapacitete	17
7.2. Testne tuljave z dodatno kapaciteto	19
8. Izdelava Teslinega transformatorja.....	20
8.1. Sekundarna tuljava	21
8.2. Napajalnik.....	22
8.3. Kondenzator	22
8.4. Leydenski kondenzatorji	22
8.5. LCR kondenzatorji.....	24
8.6. Iskrišče.....	24
8.7. Primarna tuljava.....	26
8.8. Izdelan Teslin transformator.....	29
8.9. Stroški izdelave Teslinega transformatorja.....	30
9. Zaključek.....	32
Viri.....	33

Kazalo slik

Slika 1: Shematski prikaz zgradbe Teslinega transformatorja.	8
Slika 2: Shematski prikaz primarnega nihajnega kroga.	9
Slika 3: Odvisnost lastne kapacitete tuljave v odvisnosti od višine tuljave.	10
Slika 4: Odvisnost lastne induktivnosti tuljave od višine tuljave.	11
Slika 5: Odvisnost lastne frekvence tuljave v odvisnosti od višine tuljave.	12
Slika 6: Kombinacije frekvence in višine tuljave, ki izpolnjujejo $\lambda/4$ -pogoj.	13
Slika 7: Primerjava krivulj iz slik 5 in 6.	14
Slika 8: Meritev lastne frekvence testne tuljave.	18
Slika 9: Grafa amplitude signala v odvisnosti od frekvence za testni tuljavi.	18
Slika 10: Dodatna kapaciteta z obliko podobno elipsoidu.	20
Slika 11: Leydenski kondenzatorji.	23
Slika 12: Računalniški model iskrišča.	25
Slika 13: Izdelano iskrišče.	26
Slika 14: Shematski prikaz primarne tuljave.	27
Slika 15: Skica konstrukcije za izdelavo primarne tuljave.	28
Slika 16: Izdelana primarna tuljava.	29
Slika 17: Izdelan Teslin transformator.	29
Slika 18: Primerjava višine stolpa sekundarne tuljave in višine iskre.	30

Kazalo tabel

Tabela 1: Primerjava izračunanih in izmerjenih vrednosti za testni tuljavi.	19
Tabela 2: Stroškovnik izdelave Teslinega transformatorja.	31

1. Povzetek

Visokofrekvenčni resonančni transformator ali Teslin transformator, je naprava, ki združuje različne fizikalne pojave s področja elektromagnetizma. Obstoječa literatura o delovanju in izdelavi Teslinega transformatorja je ali površna ali pa bistveno presega srednješolski nivo. To velja še posebej za načrtovanje sekundarne tuljave, ki je bistven del transformatorja. V raziskovalni nalogi smo natančno izračunali pogoje, ki jim mora ustrezati sekundarna tuljava, pri tem pa upoštevali tudi pogosto zanemarjeno resonančno naravo transformatorja. Odkrili smo zakonitosti, ki so presenetljivo preproste in jih potrdili tudi eksperimentalno. Izpeljanih zvez v obstoječi literaturi nismo zasledili, zato verjamemo, da so v takšni obliki zapisane prvič. Z upoštevanjem teh zakonitosti smo se lotili izdelave lastnega transformatorja. V nalogi podrobno predstavimo postopek izdelave in opišemo izkušnje, ki smo jih ob tem pridobili, zato lahko služi tudi kot vodnik za izdelavo Teslinega transformatorja.

2. Zahvala

Zahvaljujemo se mentorju za trud in pomoč, g. Dejanu Krajncu za koristne informacije in nasvete, podjetju Neonart d.o.o za donacijo visokonapetostnega transformatorja, ter šoli za nakup potrebnega materiala.

3. Uvod

Namen raziskovalne naloge je raziskati zakonitosti in določiti pogoje, ki jim morajo ustrezati posamezni deli transformatorja za optimalno delovanje. Poudarek je na izpeljavi enačb, ki omogočajo dimenzioniranje sekundarne tuljave in na eksperimentalnem preverjanju le-teh. Z nalogo želimo pokazati, da je bistveni pojav za delovanje Teslinega transformatorja resonanca. Na osnovi odkritih zakonitosti želimo izdelati lastni Teslin transformator, ki bi bil blizu optimalnemu delovanju. Namen je tudi, da bi naloga služila kot vodnik za izdelavo Teslinega transformatorja, zato posamezne korake izdelave natančno opišemo. Podobnega vodnika v slovenskem jeziku nismo zasledili.

4. Metodologija dela

Raziskovalna naloga, ki jo predstavljamo, obsega teoretični del, eksperimentalno preverjanje teorije in izdelavo naprave. Najprej smo natančno preučili obstoječo literaturo. Gre za tematiko, ki je obravnavana pretežno v člankih in spletnih virih, redkejša pa je pregledna literatura v knjižni obliki. Fizika in matematika, ki smo ju uporabili pri obravnavi sekundarne tuljave, je v osnovi na srednješolskem nivoju. V primerih, ko so bile enačbe preveč zapletene, smo rešitve poiskali s spletnim orodjem Wolfram|Alpha, ki je prosto dostopno. Eksperimente, s katerimi smo preverili izpeljane zakonitosti, smo izvedli s pomočjo signalnega generatorja (GW Instek SFG-1013), osciloskopa (Hameg HM303-6) in LCR metra Voltcraft 4060. Načrtovanje in izdelava Teslinega transformatorja sta podrobno opisana v 8. poglavju.

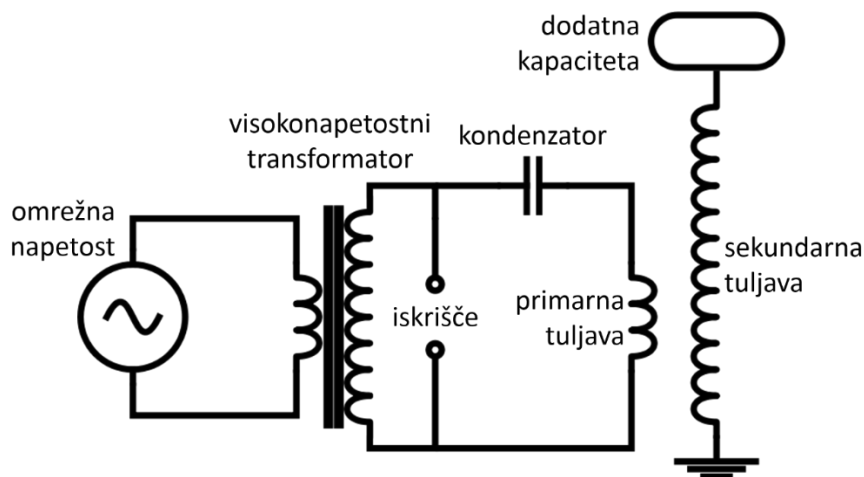
Zaradi zapletenosti enačb, ki opisujejo delovanje Teslinega transformatorja, rezultate izračunov nismo podajali z napakami. Držali smo se pravila, da rezultat zapišemo na približno toliko veljavnih mest, kot jih imajo podatki.

5. Zgradba in delovanje Teslinega transformatorja

5.1. Osnovna zgradba Teslinega transformatorja

Teslin transformator je visokofrekvenčni resonančni transformator z zračnim jedrom, ki ga je razvil Nikola Tesla leta 1897 (Tesla, 1897). Na tem konceptu je osnoval veliko patentov in med njegovimi številnimi revolucionarnimi idejami je tudi brezžični prenos energije na daljavo. Teslin transformator ima nekaj podobnosti s klasičnimi transformatorji, vendar je sam princip delovanja nekoliko drugačen. Navadni transformator ima močan magnetni spoj med primarnim in sekundarnim delom, sprememba napetosti pa je izključno posledica razmerja med številom ovojev primarnega in sekundarnega navitja. Jedro klasičnega transformatorja je izdelano iz mehko-magnetnega feritnega jedra, kar omogoča učinkovito delovanje le pri nizkih frekvencah. Pri visokih frekvencah klasični transformatorji ne morejo delovati, saj je dinamika obračanja magnetnega polja v materialu prepočasna. Zračno jedro Teslinega transformatorja omogoča uporabo pri zelo visokih frekvencah, sta pa primarna in sekundarna tuljava zaradi zračnega jedra slabo induktivno sklopljeni. Izjemno visoke napetosti na sekundarni tuljavi so v veliki meri posledica resonančnih pojavov in ne le razmerja med številom ovojev.

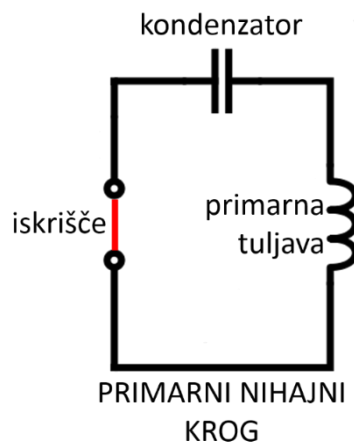
Teslin transformator sestavljata dva nihajna kroga (slika 1). Primarni nihajni krog sestavljajo tuljava, kondenzator in iskrišče, napaja pa ga visokonapetostni transformator. Sekundarni nihajni krog je le tuljava z lastno induktivnostjo in kapaciteto, ki je na enem koncu ozemljena, drug konec pa je prost, oziroma povezan z dodatno kapaciteto. Do napetosti v sekundarni tuljavi pride zaradi pojava elektromagnetne indukcije. Teslin transformator deluje optimalno, ko sta lastni frekvenci obeh nihajnih krogov enaki, saj je takrat prenos energije iz enega nihajnega kroga na drugega največji. Rečemo, da morata biti nihajna kroga v resonanci (od tod ime resonančni transformator).



Slika 1: Shematski prikaz zgradbe Teslinega transformatorja.
(vir: http://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_coil)

5.2. Primarni nihajni krog

Visokonapetostni transformator polni kondenzator. Na iskrišču dobimo napetost, ki je enaka napetosti na kondenzatorju. S časom ta napetost narašča in v nekem trenutku preseže prebojno napetost zraka U_p . Takrat v iskrišču preskoči iskra in za kratek čas postane zaradi ioniziranega zraka prevodno. Lahko rečemo, da se iskrišče obnaša kot napetostno stikalo, ki začne prevajati, ko je napetost enaka U_p . Napetost U_p lahko ocenimo iz enačbe $U_p = E_p d$, kjer je d razmik med elektrodama, E_p pa prebojna jakost zraka. Slednja je zelo občutljiva na pogoje, v katerih se eksperiment izvaja (tlak, temperatura, vlažnost). V trenutku, ko v iskrišču preskoči iskra, imamo vezje, ki je prikazano na sliki 2. Iskrišče je takrat sklenjeno in se obnaša kot prevodna žica, na kondenzatorju pa je napetost U_p . Kondenzator se začne prazniti skozi primarno tuljavo in skozi vezje steče električni tok. Lahko rečemo, da se začne energija iz kondenzatorja prelivati v energijo primarne tuljave. Ko se kondenzator povsem izprazni, je tok skozi tuljavo največji (Kladnik, 1996). Energija v tuljavi je takrat enaka začetni energiji v kondenzatorju. Nato se tok skozi tuljavo ponovno manjša, naboj na kondenzatorju pa večja. Po določenem času bo kondenzator ponovno poln, tok skozi tuljavo pa bo enak nič. S tem se je zaključil en nihaj primarnega nihajnega kroga. To nihanje se ponavlja, a ker se energija iz nihajnega kroga izgublja, v nekem trenutku napetost na iskrišču več ne preseže prebojne napetosti in iskrišče ugasne. Energijske izgube so predvsem posledica razelektritev v iskrišču.



Slika 2: Shematski prikaz primarnega nihajnega kroga.

(vir: http://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_coil)

Lastno frekvenco nihajnega kroga izračunamo z enačbo

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (\text{enačba 1})$$

kjer je L induktivnost primarne tuljave, C pa njena kapaciteta.

5.3. Sekundarni nihajni krog

Sekundarni nihajni krog predstavlja tuljava z več sto ovoji. Dodatnega kondenzatorja, kot pri primarnem krogu, ne potrebujemo, saj ima tuljava zaradi kompleksnih interakcij med samimi ovoji in okolico svojo lastno kapaciteto. Izračunamo jo z empirično formulo, ki jo je sestavil R. G. Medhurst na podlagi meritev na velikem številu tuljav (Medhurst, 1947):

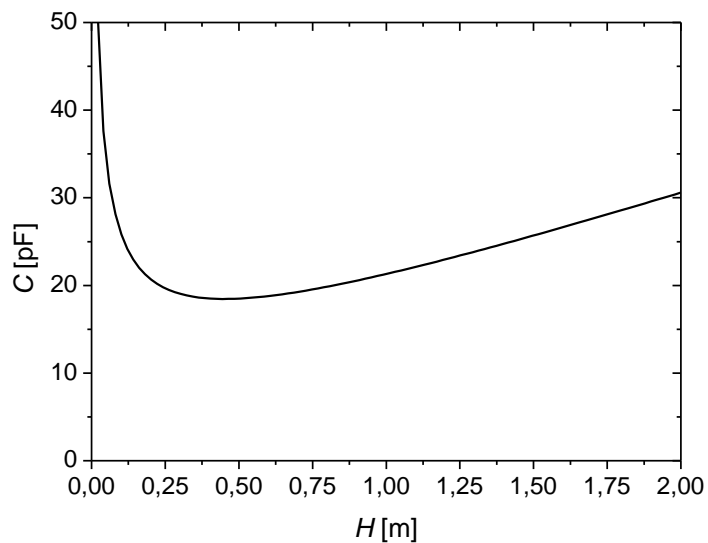
$$C = \frac{0,2856H + 0,4053R + 1,934\sqrt{\frac{R^3}{H}}}{k}. \quad (\text{enačba 2})$$

V formuli je C lastna kapaciteta tuljave v enotah pF (piko faradi), H in R pa sta višina tuljave in njen polmer. Polmer R moramo meriti od osi tuljave do sredine žice. Velja torej $R = R_0 + x/2$, kjer je R_0 notranji premer tuljave, x pa debelina žice.

Fenomenološke enačbe, ki jih v nalogi uporabljamo, so zapisane tako, da je potrebno razdalje vstavljati v enotah inch. Zato smo v enačbe dodali korekcijski faktor $k = 0,0254$

(ki je enak pretvorniku iz inchov v metre). Tako lahko v vse enačbe vstavljamo razdalje v enotah meter.

Graf na sliki 3 prikazuje, kako se lastna kapaciteta tuljave spreminja z višino tuljave, če je polmer konstanten (v tem primeru je enak 0,2 m). Z višanjem tuljave (dodajanjem navojev), kapaciteta najprej pada, nato pa preide v linearno naraščanje.



Slika 3: Odvisnost lastne kapacitete tuljave v odvisnosti od višine tuljave. (vir: avtorska slika)

Seveda ima sekundarna tuljava tudi svojo lastno induktivnost. Ker ne gre za neskončno tuljavo, ne smemo uporabiti enačbe $L = \mu_0 N^2 S / H$, temveč enačbo (Tilbury, 2008, str. 18):

$$L = \frac{N^2 R^2}{k(9R + 10H)}, \quad (\text{enačba 3})$$

kjer je N število ovojev, H in R pa sta višina in polmer tuljave. Induktivnost, ki jo dobimo, je v enotah μH (mikro henri).

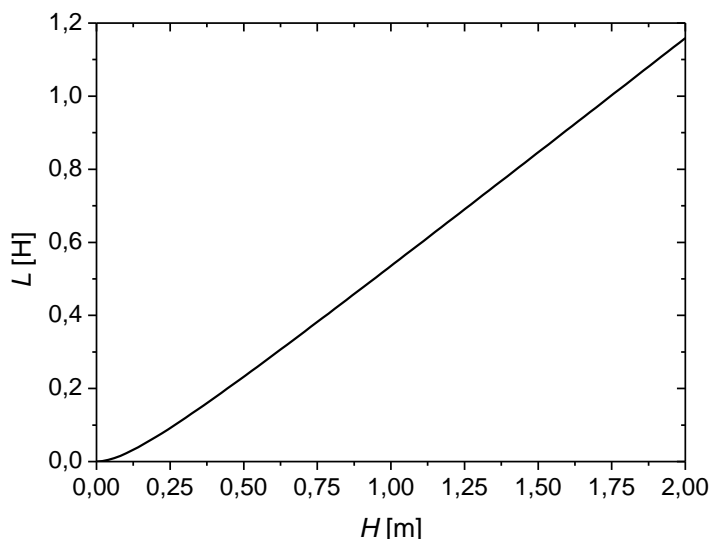
Vemo, da je višina tuljave deljena z debelino žice enaka številu ovojev,

$$N = \frac{H}{x}. \quad (\text{enačba 4})$$

Če vstavimo enačbo 4 v enačbo 3, dobimo:

$$L = \frac{H^2 R^2}{k x^2 (9R + 10H)}. \quad (\text{enačba 5})$$

Graf na sliki 4 prikazuje odvisnost induktivnosti tuljave od njene višine, če sta R in x konstantna (v tem primeru je $R = 0,2$ m in $x = 0,5$ mm).



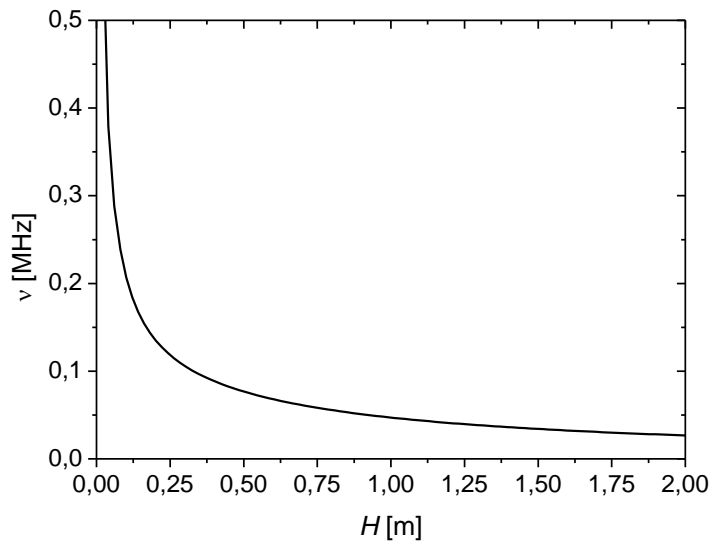
Slika 4: Odvisnost lastne induktivnosti tuljave od višine tuljave. (vir: avtorska slika)

Tuljava se zaradi lastne induktivnosti in kapacitete obnaša kot nihajni krog, katerega frekvenco opisuje enačba 1. Če združimo enačbe 1, 2 in 5 dobimo:

$$\nu = \frac{k \cdot 10^9}{2 \pi H R \sqrt{\frac{0,2856H + 0,4053R + 1,934 \sqrt{\frac{R^3}{H}}}{(9R + 10H)}}}. \quad (\text{enačba 6})$$

Faktor 10^9 smo dodali zato, da dobimo frekvenco v enotah Hz (herc).

Graf na sliki 5 prikazuje, kako je lastna frekvenca tuljave odvisna od njene višine, če sta R in x konstantna (v tem primeru je $R = 0,2$ m in $x = 0,5$ mm).



Slika 5: Odvisnost lastne frekvence tuljave ν odvisnosti od višine tuljave. (vir: avtorska slika)

6. Izpeljava enačb za dimenzioniranje sekundarne tuljave

6.1. λ -četrtnski pogoj

Po običajni žici lahko prenašamo nizkofrekvenčni signal do nekaj 100 Hz (spletni vir 1), za prenos višjih frekvenc pa moramo uporabiti dvožične vodnike, kot sta vodnik v obliki dveh vzporednih žic in koaksialni vodnik. Pri visokih frekvencah so pri običajni žici namreč energijske izgube v obliki izsevanega elektromagnetnega valovanja precejšne. V splošnem časovno in krajevno spreminjanje električnega potenciala in toka v vodniku opišemo s telegrafskima enačbama (spletni vir 2), ki upoštevata upor, kapaciteto in induktivnost vodnika.

Tudi po tuljavi se lahko širi električni signal. Obravnavati jo moramo kot večžični vodnik in dosleden matematični opis (Corum, 2001) bistveno presega srednješolski nivo. Pri dimenzioniranju sekundarne tuljave smo zato upoštevali kar pravilo, ki ga je podal že Nikola Tesla v enem izmed svojih patentov (Tesla, 1897). Zapisal je, da mora biti dolžina žice, iz katere je navita sekundarna tuljava Teslinovega transformatorja, enaka četrtni valovne dolžine »električne motnje«. To pomeni, da mora biti žica po dolžini enaka $c/(4\nu)$, kjer je c svetlobna hitrost in ν frekvenca valovanja. Takšno žico imenujemo λ -četrtnski

resonator ali antena, pogoj $l = c/(4\nu)$ pa λ -četrtnski pogoj. Kot pravi Tesla, pogoj zagotavlja, da je na koncu vodnika električni potencial največji.

6.2. Izpeljava enačb z upoštevanjem λ -četrtnskega pogoja

Vemo, da bo dolžina žice l , iz katere je izdelana tuljava, enaka

$$l = 2\pi RN \quad (\text{enačba 7})$$

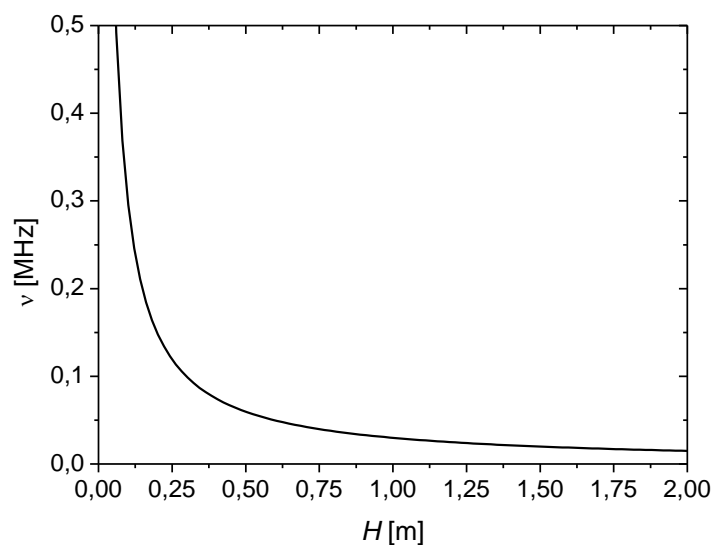
kjer je N število ovojev, $2\pi R$ pa dolžina enega ovoja. Če upoštevamo λ -četrtnski pogoj $l = c/(4\nu)$, dobimo

$$\nu = \frac{c}{8\pi RN}. \quad (\text{enačba 8})$$

Ko upoštevamo še enačbo 4, dobimo

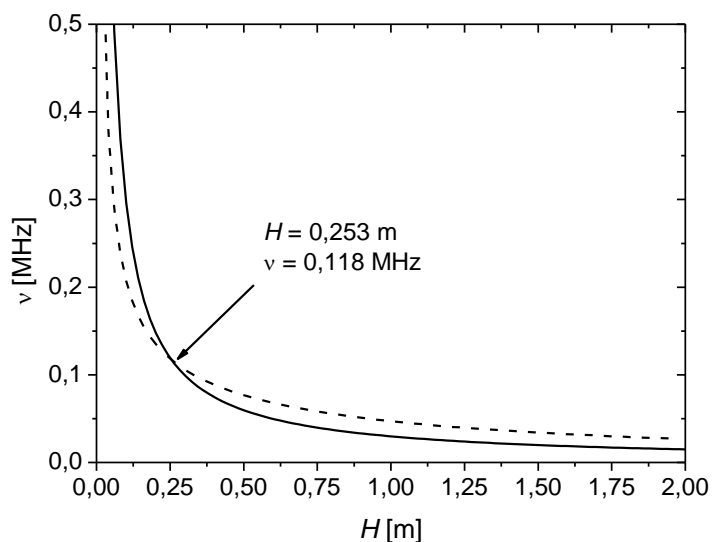
$$\nu = \frac{xc}{8\pi RH}. \quad (\text{enačba 9})$$

Ta enačba ne opisuje frekvence tuljave z danimi H , x in R , ampak nam pove le, kolikšna mora biti frekvenca pri danih H , x in R , da bo λ -četrtnski pogoj izpolnjen. Graf za izbrana $R = 0,2$ m in $x = 0,5$ mm prikazuje slika 6.



Slika 6: Kombinacije frekvence in višine tuljave, ki izpolnjujejo $\lambda/4$ -pogoj. (vir: avtorska slika)

Kolikšna dejansko je frekvenca pri višini H , nam opisuje enačba 6. Če v grafa iz slik 5 in 6 združimo, vidimo, da se krivulji sekata (slika 7). To presečišče, določa vrednost višine tuljave (z danima x in R), pri kateri je pogoj $l = c/(4v)$ izpolnjen.



Slika 7: Primerjava krivulj iz slik 5 in 6. (vir: avtorska slika)

Z željo, da določimo presečišče krivulj tudi matematično, smo naredili sledeč izračun.

Presečišče krivulj določimo tako, da enačimo enačbi 6 in 9:

$$\frac{kx}{2\pi H R \sqrt{\frac{0,2856H + 0,4053R + 1,934\sqrt{\frac{R^3}{H}}}{(9R + 10H)}}} \cdot 10^9 = \frac{xc}{8\pi R H} \quad (\text{enačba 10})$$

Izraz strnemo v obliko:

$$\frac{4k}{c \sqrt{\frac{0,2856H + 0,4053R + 1,934\sqrt{\frac{R^3}{H}}}{(9R + 10H)}}} \cdot 10^9 = 1 \quad (\text{enačba 11})$$

Iz enačbe 9 izrazimo še H in ga vstavimo v enačbo 11:

$$\frac{4k}{c \sqrt{\frac{0,2856 \left(\frac{xc}{8\pi Rv}\right) + 0,4053R + 1,934 \sqrt{\frac{R^3}{\left(\frac{xc}{8\pi Rv}\right)}}}{\left(9R + 10\left(\frac{xc}{8\pi Rv}\right)\right)}}} \cdot 10^9 = 1. \quad (\text{enačba 12})$$

Vpeljemo novo spremenljivko $U = \sqrt{v/x}$ in izraz preoblikujemo v sledečo polinomske enačbo:

$$5,600 \cdot 10^{-4} U^3 R^3 - 0,6284 U^2 R^2 - 1,029 \cdot 10^7 = 0. \quad (\text{enačba 13})$$

Rešitve enačbe smo poiskali s spletnim orodjem Wolfram|Alpha (spletni vir 4). Izkaže se, da obstaja samo ena realna rešitev te enačbe:

$$U = \frac{3071}{R}. \quad (\text{enačba 14})$$

Od tod sledi, da je

$$v = \frac{3071^2}{R^2} x \quad (\text{enačba 15})$$

in

$$R = 3071 \sqrt{\frac{x}{v}}. \quad (\text{enačba 16})$$

Iz enačbe 15 lahko izračunamo frekvenco, pri kateri se krivulji na sliki 7 sekata. Z izbiro $R = 0,2$ m in $x = 0,5$ mm dobimo frekvenco $\nu = 0,118$ MHz, kar je enako vrednosti, ki smo jo določili z grafa.

Če želimo določiti še višino tuljave, za katero se krivulji sekata, moramo v enačbo 15 vstaviti enačbo 9. Dobimo izraz

$$H = 3884 \sqrt{\frac{x}{v}} \quad (\text{enačba 17})$$

in vrednost za višino, ki je enaka $H = 0,253$ m. Ta se ujema z vrednostjo, ki smo jo določili z grafa na sliki 7.

Opazimo, da imata enačbi 16 in 17 podobno obliko, razlikujeta se le v konstanti pred korenem. Če delimo izraza za H in R , dobimo izraz, ki povezuje le ti dve količini:

$$\frac{H}{R} = 1,265. \quad (\text{enačba 18})$$

6.3. Diskusija ali kakšen je pomen izpeljanih enačb?

Enačbe 16, 17 in 18 bistveno poenostavijo načrtovanje sekundarne tuljave Teslinega transformatorja. *Kljub natančnem pregledu literature o Teslinih transformatorjih, teh enačb nismo zasledili, zato verjamemo, da v takšni obliki še niso bile zapisane.*

Iz enačbe 18 sledi, da mora biti višina sekundarne tuljave nižja od premera tuljave. *V pogovoru z Dejanom Krajncem, ki je strokovnjak na področju visokofrekvenčnih aplikacij, smo izvedeli, da je že Nikola Tesla trdil, da mora biti sekundarna tuljava nizka in široka. Enačba 18 to potrjuje.*

Iz enačbe 16 vidimo, da je z izbiro debeline žice in polmera tuljave lastna frekvenca, pri kateri bo λ -četrtnski pogoj izpolnjen, enolično določena. Ali obratno, ko smo izbrali debelino žice in lastno frekvenco tuljave, smo določili polmer tuljave, pri katerem bo λ -četrtnski pogoj izpolnjen.

Iz enačbe 18 tudi sledi, da morajo biti vse tuljave z enakim polmerom navite do enake višine, ne glede na debelino žice, da bo λ -četrtnski pogoj izpolnjen. Z spreminjanjem debeline žice bomo po enačbi 17 spremenil le lastno frekvenco, vendar bodo v vseh primerih tuljave zadovoljile λ -četrtnski pogoj.

6.4. Izpeljava enačb z upoštevanjem λ -četrtnskega pogoja in dodatne kapacitete

Iz enačbe 18 vidimo, da je teoretično optimalna tuljava nizka in široka. Ker na sekundarni tuljavi pričakujemo zelo visoke napetosti, je tako nizka tuljava neprimerna, saj lahko iskre udarijo v tla, ali še huje, v primarno tuljavo (kar bi uničilo kondenzator v primarnem krogu). Z vezavo dodatne kapacitete v obliki votlega prevodnika na vrhu tuljave

dosežemo, da je tuljava, ki izpolnjuje λ -četrtnski pogoj, bistveno višja. Iz enačbe 1 vidimo, da večja kapaciteta pomeni manjšo frekvenco, manjša frekvenca pa pomeni večje valovne dolžine. Da izpolnimo λ -četrtnski pogoj, moramo tako naviti več žice, kar pomeni, da bo tuljava višja.

Z upoštevanjem dodatne kapacitete dobi enačba 1 obliko

$$v = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C + C_1)}}, \quad (\text{enačba 19})$$

kjer je C_1 kapaciteta votlega prevodnika. Enačba za lastno frekvenco tuljave z dodatno kapaciteto ima tako obliko

$$v = \frac{kx}{2\pi HR \sqrt{\frac{0,2856H + 0,4053R + 1,934\sqrt{\frac{R^3}{H}} + k C_1 10^{12}}{(9R + 10H)}}} \cdot 10^9. \quad (\text{enačba 20})$$

Na enak način kot zgoraj (enačbe 10-12) izpeljemo polinomsko enačbo:

$$5,600 \cdot 10^{-4} U^3 R^3 - 0,6284 U^2 R^2 - 1,029 \cdot 10^7 + k C_1 \cdot 10^{12} U^2 R = 0. \quad (\text{enačba 21})$$

Zadnji člen v enačbi je posledica dodatne kapacitete. Tudi ta enačba ima samo eno realno rešitev za U , vendar je ta predolga, da bi jo lahko tukaj zapisali. S spletnim orodjem Wolfram|Alpha (spletni vir 4) pa je možno za konkretne podatke enačbo numerično rešiti.

7. Eksperimentalna potrditev izpeljanih zvez

7.1. Testne tuljave brez dodatne kapacitete

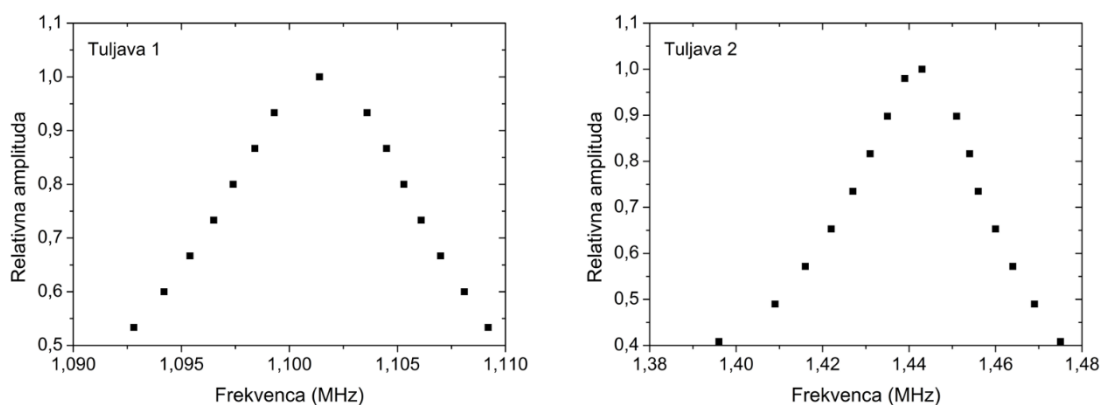
Želeli smo preveriti veljavnost izpeljanih zvez, zato smo izdelali dve testni tuljavi, katerih lastne frekvence smo izmerili s pomočjo signalnega generatorja in osciloskopa (slika 8). Na spodnji konec tuljave smo priklopili en pol signalnega generatorja, drugi pol pa na ozemljitev sonde osciloskopa. Sondo smo nato položili v bližino tuljave, tako da se nista dotikata. S signalnim generatorjem smo vzbujali tuljavo s sinusno napetostjo določene

frekvence, na osciloskopu pa smo opazovali signal, ki ga oddaja tuljava. Frekvenco signala na generatorju smo spreminjali, dokler na osciloskopu nismo izmerili najvišje amplitude signala. Takrat smo zadeli lastno frekvenco tuljave.



Slika 8: Meritev lastne frekvence testne tuljave. (vir: avtorska slika)

Grafa na sliki 9 prikazujeta amplitudi nihanja obeh tuljav v odvisnosti od frekvence. Vrhova na grafih sta pri lastnih frekvencah tuljav. Vrh krivulje smo poiskali natančneje kot prikazujeta grafa.



Slika 9: Grafa amplitude signala v odvisnosti od frekvence za testni tuljavi. (vir: avtorska slika)

Induktivnosti tuljav smo izmerili z LCR metrom Voltcraft 4060. Za izdelavo testnih tuljav smo uporabili izolirano bakreno žico premera 0,459 mm (po podatkih proizvajalca). Prva tuljava je imela polmer $R_1 = 6,273$ cm, druga pa $R_2 = 5,553$ cm.

V Tabela 1 je prikazana primerjava izračunih in izmerjenih vrednosti višine, induktivnosti in lastne frekvence tuljav. Prikazana je tudi primerjava med $\frac{1}{4}$ valovne dolžine izračunane iz izmerjene frekvence (ki je enaka dolžini žice, če velja λ -četrtnski pogoj) in dolžino žice, izračunano iz geometrije tuljave.

Tabela 1: Primerjava izračunanih in izmerjenih vrednosti za testni tuljavi.

	Izračunana vrednost	Izmerjena vrednost
TULJAVA 1		
višina H (enačba 18)	79 mm	80 mm
induktivnost L (enačba 5)	3,41 mH	3,41 mH
lastna frekvenca ν (enačba 15)	1,100 MHz	1,101 MHz
$\frac{1}{4}$ valovne dolžine (iz izmerjene frekvence)		68,05 m
dolžina žice l (enačbi 4 in 7)	68,70 m	
TULJAVA 2		
višina H (enačba 18)	70 mm	70 mm
induktivnost L (enačba 5)	2,35 mH	2,32 mH
lastna frekvenca ν (enačba 15)	1,404 MHz	1,443 MHz
$\frac{1}{4}$ valovne dolžine (iz izmerjene frekvence)		51,94 m
dolžina žice l (enačbi 4 in 7)	53,20 m	

Ujemanje izračunanih in izmerjenih vrednosti je izjemno, zato verjamemo, da zveze, ki smo jih izpeljali, zelo dobro opišejo realne tuljave.

7.2. Testne tuljave z dodatno kapaciteto

Če želimo uporabiti enačbi 20 in 21, moramo poznati kapaciteto votlega prevodnika na vrhu sekundarne tuljave. V primeru, ko je prevodnik krogelne oblike, lahko kapaciteto izračunamo iz enačbe $C_1 = 4\pi\epsilon_0 r$, kjer je r polmer krogle (spletni vir 4). V nasprotnem primeru, moramo C_1 določiti eksperimentalno. Iz enačb 1 in 19 lahko izrazimo dodatno kapaciteto C_1 :

$$C_1 = \frac{\nu_1^2 - \nu_2^2}{4L\pi^2\nu_1^2\nu_2^2}, \quad (\text{enačba 22})$$

kjer je ν_1 frekvenca tuljave brez dodatne kapacitete, ν_2 pa frekvenca tuljave z dodatno kapaciteto. Induktivnost tuljave lahko izmerimo/izračunamo, frekvenci pa lahko določimo s pomočjo signalnega generatorja in osciloskopa, kot je opisano zgoraj.

Za dodatno kapaciteto smo uporabili skledi iz legiranega jekla, ki smo jih obrnili in staknili tako, da sta tvorili elipsoidu podobno telo (slika 10). Kapaciteto tako izdelanega votlega prevodnika smo ocenili iz enačbe $C_1 = 4\pi\epsilon_0 r$, kjer smo za polmer vzeli srednjo vrednost med največjo (= 12 cm) in najmanjšo (= 6 cm) dimenzijo prevodnika ($r = 9$ cm) in dobili $C_1 \approx 10$ pF.



Slika 10: Dodatna kapaciteta z obliko podobno elipsoidu. (vir: avtorska slika)

Elipsoid smo povezali z vsako izmed dveh testnih tuljav, izmerili frekvence in izračunali C_1 . Pri prvi tuljavo smo dobili vrednost $C_1 = 8,3$ pF, pri drugi pa $C_1 = 8,6$ pF, kar se ujema z oceno opisano zgoraj.

Isti elipsoid smo preizkusili tudi z drugimi tuljavami, ki smo jih izdelali, in ugotovili, da je izračunana kapaciteta C_1 večja, če je frekvenca tuljave, na katero je priklopljena, večja. Pojava zaradi časovne omejitve nismo mogli podrobneje raziskati.

8. Izdelava Teslinega transformatorja

Po izpeljavi zvez za dimenzioniranje sekundarne tuljave in njihovi eksperimentalni potrditvi, smo se lotili izdelave lastnega Teslinega transformatorja. Kako dobro transformator deluje, ugotavljamo po občutku, saj med njegovim delovanjem meritve zaradi visokih napetosti niso izvedljive. Tako delovanje ocenimo na podlagi dolžine isker, zvoku, neželenem prebijanju itd.

Načrtovanja Teslinega transformatorja se moramo lotiti postopno in sistematično. Najprej smo na podlagi izpeljanih zvez dimenzionirali sekundarno tuljavo z dodatno

kapaciteto (z upoštevanjem λ -četrtnskega pogoja). S tem je bila določena lastna frekvenca transformatorja. Izbrali smo kapaciteto kondenzatorja v primernem krogu in nato izdelali ustrezno primarno tuljavo.

8.1. Sekundarna tuljava

Za izdelavo sekundarne tuljave Teslinega transformatorja smo uporabili plastično kanalizacijsko cev s polmerom $R_0 = 8,0$ cm in bakreno žico s premerom $x = 0,459$ mm (po podatkih proizvajalca). Za izračun parametrov tuljave potrebujemo tudi dodatno kapaciteto C_1 . Kot rečeno, ugotovili smo, da je izračunana kapaciteta večja, če je frekvenca tuljave večja. Ker izbrana R_0 in x določata tuljavo z nižjo frekvenco od frekvence testnih tuljav (enačba 16), je tudi kapaciteta C_1 , izračunana iz enačbe 22, manjša. Da se nam ne bi zgodilo, da bi navili prenizko tuljavo, smo se odločili, da višino tuljave izračunamo kar s podatkom $C_1 = 8,6$ pF. Tako dobimo višjo tuljavo, ki jo lahko po potrebi še odvijemo, če pa bi dobili prenizko tuljavo, pa je seveda ne bi mogli več podaljšati.

Izbrane parametre za sekundarno tuljavo smo vstavili v enačbo 21 in jo s programom Wolfram|Alpha numerično rešili. Rešitev enačbe je $U = 22928$. Z upoštevanjem zveze $U = \sqrt{v/x}$ smo izračunali frekvenco tuljave, ki znaša $v = 241$ kHz, z enačbo 9 pa višino tuljave, ki znaša $H = 28,3$ cm.

Tuljavo smo navili do izračunane višine H . Izmerili smo njeno lastno frekvenco, ki je bila (kot pričakovano) nižja od izračunane, saj smo uporabili preveliko vrednost za C_1 . Tuljavo smo postopoma odvijali in na vsakem koraku primerjali njeno izmerjeno frekvenco z izračunano. Preverjali smo tudi, ali tuljava ustreza λ -četrtnskemu pogoju. Po nekaj korakih je tuljava izpolnjevala oba pogoja. Tako smo dobili sekundarno tuljavo z višino $H = 25,5$ cm in lastno frekvenco $v = 265$ kHz.

Sekundarno tuljavo smo zaradi varnosti ozemljili tako, da smo njen spodnji konec z žico povezali s kovinsko palico, ki smo jo porinili neposredno v zemljo. Če bi tuljavo ozemljili preko vtičnice, bi se lahko med delovanjem Teslinega transformatorja, poškodovale naprave, ki so priključene na hišno električno omrežje.

8.2. Napajalnik

Za izdelavo Teslinega transformatorja najprej potrebujemo visokonapetostni električni izvor. Uporabimo lahko transformatorje za neonske znake, za katodne cevi, mikrovalovne pečice ipd. Odločili smo se za uporabo transformatorja za neonske znake (neonski transformator), saj omogoča visoke napetosti, ima tokovno omejitev in je zelo stabilen. Neonski transformatorji so namenjeni dolgotrajnemu delovanju in so temeljito preizkušeni. Zato so najvarnejša izbira visokonapetostnega izvora. Seveda pa tudi pri delu s takšnim izvorom obstajajo določene nevarnosti, še posebej, če nanj priključimo še kondenzator, ki kopiči in nato sprosti velike količine električne energije. Izdelave in testiranja Teslinega transformatorja smo se zato lotili s potrebno previdnostjo.

Uporabili smo neonski transformator z nazivno napetostjo 8 kV (izmenična napetost) s tokovno omejitvijo 50 mA, kar zagotavlja 400 W moči. Transformator predstavlja zaključeno napajalno enoto, ki smo jo uporabili v nespremenjenem stanju. Zato je v našem načrtu predstavljal konstanto, kateri smo prilagodili druge komponente.

Rabljen neonski transformator nam je velikodušno podarilo podjetje Neonart d.o.o., za kar se jim iskreno zahvaljujemo.

8.3. Kondenzator

Naslednja pomembna komponenta je visokonapetostni kondenzator. Na tržišču je veliko na prvi pogled primernih kondenzatorjev, ki pa v resnici ne ustrezajo ekstremnim pogojem, katerim so izpostavljeni med delovanjem Teslinega transformatorja. Poleg visokih napetosti morajo prenesti tudi visoke frekvence nad 100 kHz in pulzno delovanje, kar pomeni, da morajo velikokrat na sekundo doseči svoj poln energijski potencial. Tega kondenzatorji, ki niso izdelani za ta namen, ne zdržijo. To smo izkusili tudi sami, saj smo v začetku uporabili vezje folijskih kondenzatorjev, ki so po karakteristikah ustrezali vsem pogojem, niso pa bili izdelani za visokofrekvenčne aplikacije. Kondenzatorji so ob prvem zagonu pregoreli.

8.4. Leydenski kondenzatorji

Zaradi slabih izkušenj s folijskimi kondenzatorji smo se odločili za doma izdelano različico kondenzatorja, ki ne morejo pregoreti. Tako imenovan leydenski kozarec smo izdelali iz kozarca za vlaganje, ki smo ga ovili z aluminijasto folijo in napolnili z nasičeno raztopino

soli (slika 11). Stena steklenega kozarca tako predstavlja dielektrik med dvema prevodnikoma. V prevodnikih se pod napetostjo nabere naboj. Z LCR metrom smo izmerili, da je kapacitivnost tako izdelanega kondenzatorja približno 0,7 nF, lahko pa smo jo z dodajanjem in odvzemanjem elektrolita spreminjali. Z vzporedno vezavo 15 kondenzatorjev smo dosegli kapacitivnost približno 10 nF, kar je bil naš cilj. Leydenski kondenzator preživi zelo visoke napetosti in frekvence, so pa njegova slabost ravno velike energijske izgube pri teh ekstremnih pogojih. Natančna kapacitivnost doma izdelanih kondenzatorjev se ne da izračunati (lahko se izmeri), še huje pa je, da se kapaciteta med delovanjem zaradi neželenih razelektritev močno spreminja.



Slika 11: Leydenski kondenzatorji. (vir: avtorska slika)

Med preizkušanjem leydenskih kondenzatorjev smo ugotovili, da ni vseeno, na kateri (čeprav vedno vzporedni) način jih povežemo. Najboljše rezultate smo dobili, ko smo leydenske kozarce postavili na plast aluminijaste folije in tako dobro sklenili zunanje prevodnike vseh kondenzatorjev, vse elektrolite v kozarcih pa povezali z enim »matičnim« elektrolitom, v katerega smo vstavili tudi elektrodo (slika 11).

Teoretično bi lahko elektrolite povezala med seboj zaporedno (še vedno bi imeli vzporedno vezavo kondenzatorjev), vendar se je to izkazalo kot bistveno slabša rešitev. Med delovanjem je namreč prihajalo do velikega števila prebijanj.

Ob zagonu končanega Teslinega transformatorja se je izkazalo, da leydenski kondenzatorji niso primerni za uporabo pri visokih frekvencah. Delovanje transformatorja je bilo bistveno slabše od pričakovanega. Efektivna kapaciteta kondenzatorjev je bila očitno precej nižja od tiste, ki smo jo izmerili z LCR metrom (pri enosmerni napetosti). Razlog je verjetno ta, da ioni v elektrolitu niso dovolj mobilni, da bi lahko sledili hitremu spreminjanju električnega polja.

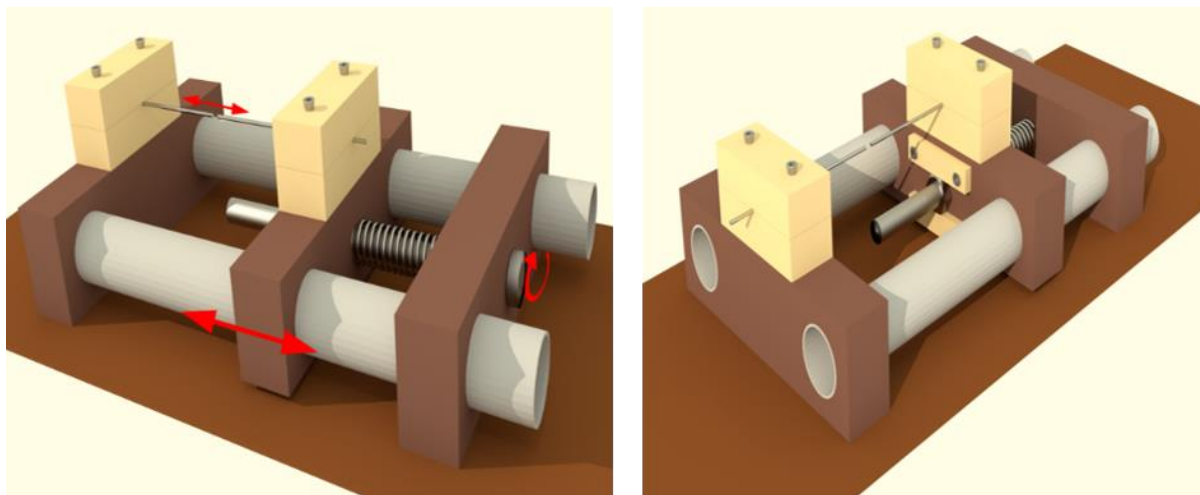
8.5. LCR kondenzatorji

Po ugotovitvi, da leydenski kondenzatorji niso najboljša izbira, smo se odločili za manj ekonomično, vendar bolj učinkovito rešitev, in sicer za polipropilenske LCR kondenzatorje, ki so izdelani za uporabo v visokonapetostnih in visokofrekvenčnih aplikacijah. Natančno smo preučili karakteristike kondenzatorjev iz izračunali koliko jih potrebujemo in kako jih moramo vezati. Kondenzatorji imajo kapacitivnost $C_1 = 47$ nF, uporabljamo pa jih lahko do 1,5 kV enosmerne napetosti in 450 V efektivne napetosti pri izmeničnem toku. Efektivna napetost visokonapetostnega transformatorja znaša 8 kV. Odločili smo se, da zaporedno vežemo 20 kondenzatorjev, kar ustreza efektivni napetosti 9 kV. Vezje kondenzatorjev smo tako zaradi varnosti napetostno predimenzionirali. Serija 20 zaporedno vezanih kondenzatorjem ima kapacitivnost $C_1/20 = 2,35$ nF, zato smo vzporedno vezali 6 takšnih serij in dobili skupno kapacitivnost 14,1 nF. Uporabili smo torej 120 kondenzatorjev. Izbrani kondenzatorji imajo 20 % toleranco, kar je razlog, da se dejanska kapacitivnost nekoliko razlikuje od izračunane. Z LCR metrom smo izmerili 13,8 nF. Pri izdelavi vezja kondenzatorjev je potrebno paziti le, da jih razporedimo dovolj narazen in tako preprečimo preskok iskre med kondenzatorji.

8.6. Iskrišče

Kot opisano v uvodnem poglavju, deluje iskrišče v vezju kot napetostno stikalo in mora biti zato izdelano natančno in stabilno. Zaradi preprostosti smo se odločili za statično iskrišče, torej za dve elektrodi, ki sta med seboj oddaljeni za neko razdaljo. Eden od problemov, ki se pojavi, je izjemno visoka temperatura, ki jo morajo prenesti elektrode. Drug, prav tako nezanemarljiv problem, je oksidacija elektrod, ki lahko po določenem času delovanja poviša napetost potrebno za preskok iskre in tako poruši uglašenost Teslinega transformatorja. Da bi se izognili tem problemom, smo za elektrodi iskrišča uporabili volframove paličice, ki se drugače uporabljajo za varjenje.

Naslednja pomembna lastnost iskrišča je variabilnost, torej možnost spreminjanja razmika med elektrodama. S tem lahko določamo prebojno napetost, posledično pa čas polnjenja in napetost na kondenzatorju. Razmik med elektrodama iskrišča moramo natančno nastaviti, zato smo izdelali mehanizem, ki ga prikazujeta računalniška modela na sliki 12.



Slika 12: Računalniški model iskrišča. (vir: avtorska slika)

Osnova mehanizma so trije oporni kvadri iz smrekovega lesa, ki so povezani z dvema vodiloma, za katera smo uporabili aluminijasti cevi. Zunanja kvadra sta pritrjena, medtem ko je sredinski kvader malenkost dvignjen in se lahko premika. Vijak je v zunanjem kvadru pritrjen tako, da se lahko vrti, premikanje v smeri vodil pa mu onemogoča vzmet. V sredinskem kvadru je vijak pritrjen z navojem, kar omogoča da se valj ob vrtenju vijaka premika v smeri vodila. Z vrtenjem vijaka lahko tako spreminjamo razmik med elektrodama, vzmet in aluminijasta vodila pa omogočajo zvezno in natančno premikanje v obeh smereh. Koncept je preprost, vendar se je izkazal za natančnega, varnega in zanesljivega (slika 13).

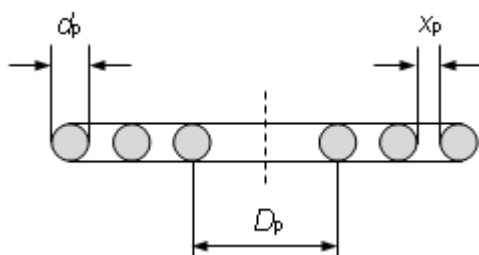


Slika 13: Izdelano iskrišče. (vir: avtorska slika)

8.7. Primarna tuljava

Primarno navitje Teslinega transformatorja sestavlja manjše število ovojev debelejšega prevodnika. Najbolje je uporabiti mehko bakreno cev, ki jo lahko brez težav zvijemo v želeno obliko. Pri visokih frekvencah, pri katerih deluje Teslin transformator, pride do posebnega pojava imenovanega kožni pojav. Teorija pravi, da pri višjih frekvencah tok potuje predvsem po površini prevodnika in ne več po njegovi notranjosti. Posledično potrebujemo čim večjo površino prevodnika, ki pa je lahko v notranjosti votel. Uporaba cevi je bistveno cenejša in enostavnejša kot uporaba polnega vodnika.

Odločili smo se, da bomo za primarno tuljavo izdelali enoslojno navitje v ravnini (slika 14) iz mehke bakrene cevi s zunanjih premerom $d_p = 0,8$ cm. Tuljava ima tako obliko spirale. Potrebno je določiti razmik med posameznimi navoji, ki mora za enostavnejši izračun induktivnosti ostati konstanten vzdolž celotne spirale. Pomembno je tudi, da se ovoji med sabo ne stikajo, saj bakrena cev ni izolirana. Odločili smo se za razmik 2 cm med središčinama sosednjih navojev, torej je x_p (glej sliko 14), znašal 1,2 cm.



Slika 14: Shematski prikaz primarne tuljave. (vir: Pančur, 2011)

Notranji premer primarnega navitja je navzdol omejen s premerom sekundarne tuljave, ki znaša 16 cm, k tej razdalji pa smo prišteli še varnostno razdaljo 10 cm. Notranji premer navitja je tako znašal $D_p = 26$ cm.

Teslin transformator je uglasen takrat, ko sta frekvenci primarnega in sekundarnega kroga enaki. Z lastno frekvenco sekundarne tuljave je zato določena tudi frekvenca primarnega kroga. Ker smo kapacitivnost kondenzatorja izbrali, smo morali primarno tuljavo izdelati tako, da smo dobili ustrezno lastno frekvenco primarnega kroga. Iz enačbe 1 smo izračunali, da mora biti induktivnost primarne tuljave približno 25 μH . Iz enačbe za induktivnost spiralnega navitja, ki nam da induktivnost v enotah μH (Pančur, 2011, str. 15)

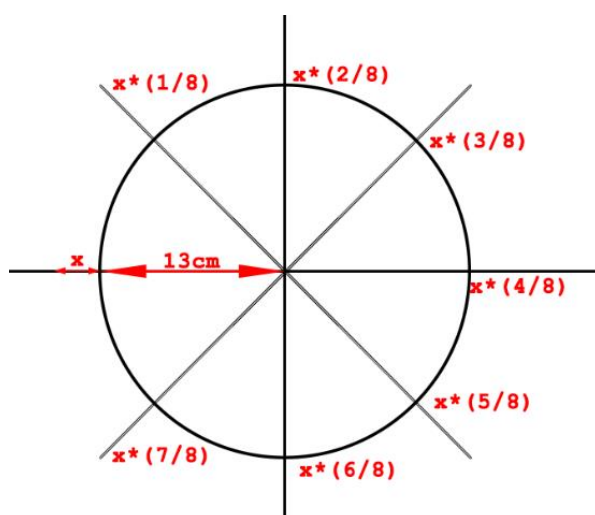
$$L_p = \frac{N_p^2 \cdot A^2}{k(30A - 11D_p)}, \quad (\text{enačba 23})$$

kjer je A korekcijski faktor

$$A = \frac{D_p + N_p(d_p + x_p)}{2}, \quad (\text{enačba 24})$$

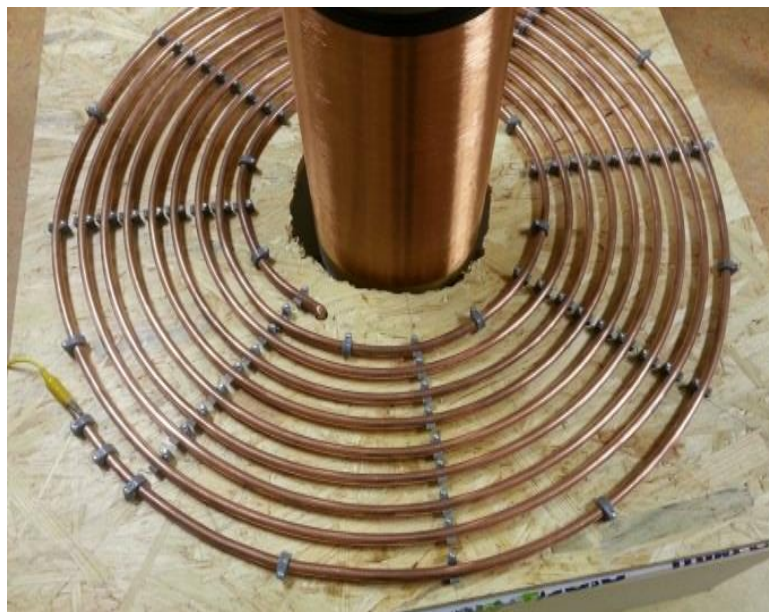
izračunamo, da to ustreza $N_p = 7$ ovojev pri danem premeru cevi in razdalji med ovoji. Odločili smo se, da bomo tuljavo podaljšala za 2 dodatna ovoja, saj imamo tako možnost spreminjati induktivnost tuljave v obe smeri. Dolžino primarne tuljave, in posledično njeno induktivnost, lahko namreč preprosto spreminjamo s premikanjem priklopne elektrode vzdolž spirale.

Izdelave primarne tuljave smo se lotili postopno in z vnaprej podrobno izdelanim načrtom. Na kvadratno iverno ploščo s stranico 70 cm smo najprej narisali notranji premer navitja, torej krožnico s polmerom 13 cm. Iz središča smo nato narisali premice, ki krožnico delijo na osem enakih krožnih lokov, kot je razvidno iz slike 15. Na sliki predstavlja oznaka x ($= 1,2$ cm) razmik med posameznimi ovoji. Označili smo osem pomožnih točk, s pomočjo katerih smo izrisali spiralo. Točka na prvi premici leži na krožnici, točka na drugi premici leži na razdalji $1/8 x$ od krožnice, točka na tretji premici na razdalji $2/8 x$ od krožnice itd. Krivulja, ki jo narišemo skozi pomožne točke je pravilna spirala, ki jo nadaljujemo preprosto tako, da je vsak naslednji ovoj od prejšnjega oddaljen za 1,2 cm.



Slika 15: Skica konstrukcije za izdelavo primarne tuljave. (vir: avtorska slika)

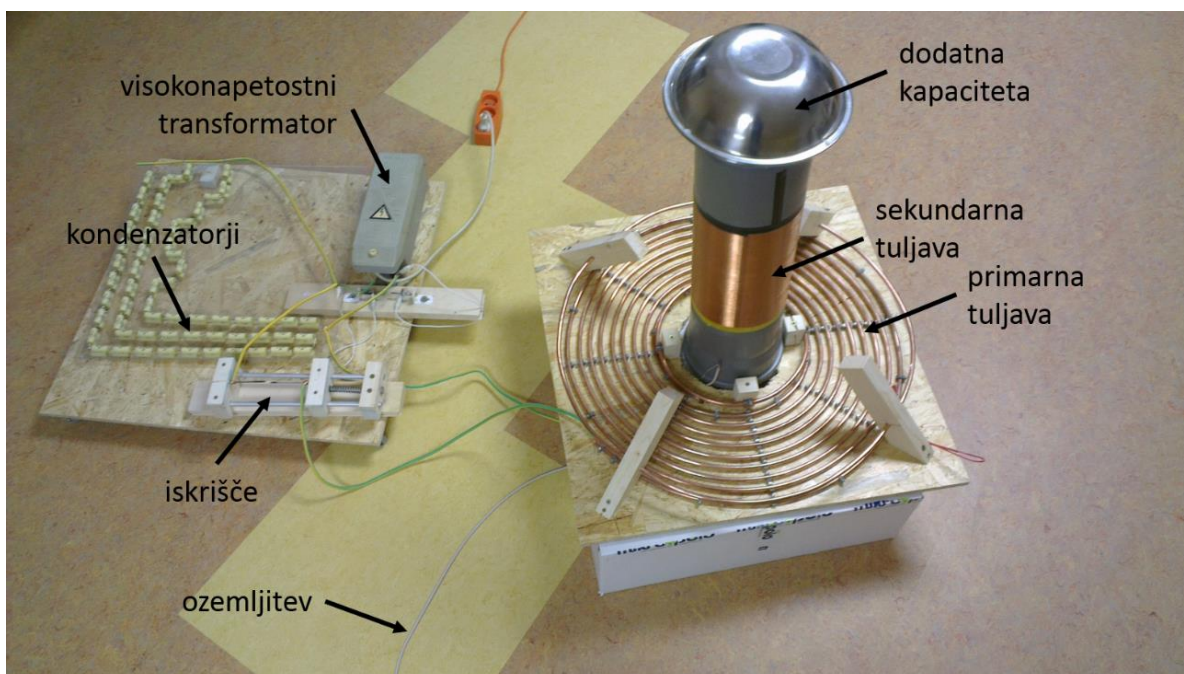
V presečišču narisane spirale s premicami smo pritrdili držala za bakreno cev (skupno 81), v katera smo zaporedoma pritrjevala cev. Dobili smo torej spiralno primarno navitje iz bakrene cevi s premerom 0,8 cm, ki ima notranji premer 26 cm in šteje 9 navojev (slika 16).



Slika 16: Izdelana primarna tuljava. (vir: avtorska slika)

8.8. Izdelan Teslin transformator

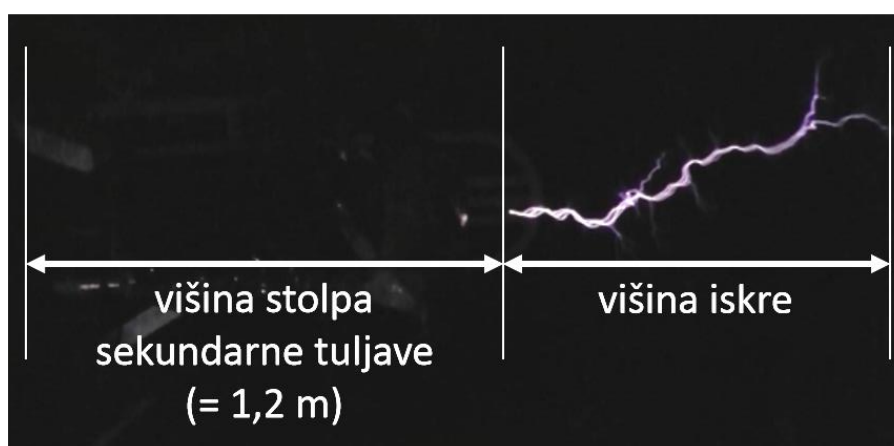
Po postopku, opisanem v tem poglavju, smo izdelali Teslin transformator, ki ga prikazuje slika 17.



Slika 17: Izdelan Teslin transformator. (vir: avtorska slika)

Delovanje transformatorja bomo demonstrirali na zagovoru raziskovalne naloge, tukaj pa na sliki 18 prikažemo le primerjavo med višino stolpa sekundarne tuljave in višino iskre (slika je zasukana za 90°). Iz slike vidimo, da je dolžina iskre približno 1 m. Če predpostavimo, da je prebojna jakost zraka 3 MV/m, lahko ocenimo napetost na dodatni kapaciteti sekundarne tuljave na 3 MV (Pančur, 2011, str. 15).

Če bi bila pri Teslinem transformatorju ojačitev napetosti posledica razmerja števila ovojev primarne in sekundarne tuljave, bi dobili na sekundarni tuljavi bistveno nižjo napetost od ocenjenih 3 MV. Naša sekundarna tuljava ima približno 550 ovojev, primarna tuljava pa približno 7 ovojev. Faktor ojačitve je tako približno 80. Pri napetosti 8 kV na primarnem krogu bi dobili na sekundarnem krogu le 640 kV (ob tem smo predpostavili, da je med tuljavama idealna sklopitev, kar v resnici niti približno ne drži). Tak izračun je le groba ocena, ki pa jasno kaže, da je bistven pojav pri delovanju Teslinega transformatorja resonanca med obema nihajnjima krogoma.



Slika 18: Primerjava višine stolpa sekundarne tuljave in višine iskre. (vir: avtorska slika)

8.9. Stroški izdelave Teslinega transformatorja

Večina komponent, ki sestavljajo Teslin transformator, je preprostih in jih lahko izdelamo iz cenovno dostopnih materialov. Najdražji komponenti sta visokonapetostni transformator in kondenzator v primarnem krogu. Tabela 2 prikazuje približni stroškovnih izdelave Teslinega transformatorja.

Tabela 2: Stroškovnik izdelave Teslinega transformatorja.

Komponenta	Cena
visokonapetostni transformator	200 EUR
kondenzatorji v primarnem krogu	100 EUR
bakrena cev za primerno tuljavo	50 EUR
bakrena žica za sekundarno tuljavo	20 EUR
plastična cev za sekundarno tuljavo	10 EUR
volframove paličice za iskrišče	10 EUR
manjši material (vijaki, iverna plošča, pleksi steklo, posodi iz legiranega jekla, ...)	30 EUR
SKUPAJ:	420 EUR

9. Zaključek

V raziskovalni nalogi smo izpeljali zveze, ki določajo optimalne dimenzije sekundarne tuljave. Pri tem smo upoštevali pogoj, da mora biti dolžina žice, iz katere je navita tuljava, enaka $c/(4v)$, kjer je c svetlobna hitrost, v pa frekvenca tuljave. Dobili smo presenetljivo preproste zveze, za katere verjamemo, da v takšni obliki še niso bile zapisane. Eksperimenti, ki smo jih izvedli se izredno dobro ujemajo s teorijo, zaradi česar verjamemo, da enačbe, ki smo jih izpeljali, zelo dobro opišejo realne tuljave. Izdelali smo lastni Teslin transformator in pri tem upoštevali izpeljane zakonitosti za sekundarno tuljavo. Ustrezno smo načrtovali in izdelali tudi ostale dele Teslinega transformatorja in postopek izdelave natančno opisali. Zapisali smo tudi izkušnje, ki smo jih pridobili med izdelavo transformatorja. Menimo, da lahko naloga služi kot vodnik za izdelavo transformatorja. Transformator, ki smo izdelali smo uglasili in preizkusili. Dobro delovanje transformatorja kaže na to, da je bil naš postopek načrtovanja in izdelave ustrezen.

V prihodnje nameravamo več pozornosti nameniti tudi drugim delom Teslinega transformatorja, npr. gašenju iskrišča, obliki dodatne kapacitete na vrhu sekundarne tuljave, obliki primarne tuljave itd.

Viri

K. L. Corum, J. F. Corum, Microwave Rev., št. 7, str. 36 (2001)

R. Kladnik, Pot k maturi iz fizike, DZS, Ljubljana (1996)

R. G. Medhurst, Wireless Engineer, št. Februar, str. 35 (1947)

G. Pančur, Primeri uporabe Teslinega transformatorja, FNM, Maribor (2011)

N. Tesla, patent št.: 593138, Patentni urad ZDA (1897)

M. Tilbury, The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide, McGraw-Hill, New York (2008)

(spletni vir 1) [3. 2. 2014, 21.38] Dostopno na URL naslovu:

http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_line

(spletni vir 2) [3. 2. 2014, 22.31] Dostopno na URL naslovu:

http://en.wikipedia.org/wiki/Telegrapher%27s_equations

(spletni vir 3) [7. 2. 2014, 12.29] Dostopno na URL naslovu:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/capsph.html#c2>

(spletni vir 4) [11. 2. 2014 12.40] Dostopno na URL naslovu:

<http://www.wolframalpha.com/>