

DIZAJN I PRIMJENA TESLINOG TRANSFORMATORA

Matić, David

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:623385>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-11**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
ODSJEK ZA ELEKTROTEHNIKU

Prijediplomski stručni studij Elektronika

DAVID MATIĆ

ZAVRŠNI RAD

Dizajn i primjena Teslinog transformatora

Split, travanj 2024.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Prijediplomski stručni studij Elektronika

Predmet: Osnove elektrotehnike II

ZAVRŠNI RAD

Kandidat: David Matić

Naslov rada: Dizajn i primjena Teslinog transformatora

Mentor: Tonko Kovačević

Komentor: Vjekoslav Zrno

Split, travanj 2024.

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. POVIJEST I RAZVOJ TRANSFORMATORA..... | 3 |
| 2.1 Vrste transformatora..... | 4 |
| 2.2 Princip rada transformatora..... | 7 |
| 3. TESLIN TRANSFORMATOR | 12 |
| 3.1 Tesla zavojnice s čvrstim stanjem..... | 14 |
| 3.2 Tesla zavojnice s iskrištem..... | 15 |
| 3.3 Primjena Tesline zavojnice | 15 |
| 3.3.1 Bežični prijenos električne energije..... | 16 |
| 3.3.2 Radio prijenos..... | 17 |
| 3.3.3 Znanstvena istraživanja | 17 |
| 4. DIZAJN TESLINE ZAVOJNICE | 19 |
| 5. IZVEDBA TESLINE ZAVOJNICE | 24 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 28 |
| Literatura | 29 |
| Popis slika | 30 |

Dizajn i primjena Teslinog transformatora

Sažetak:

Samim izumom Teslinog transformatora znatno je olakšan današnji život, koji doprinosi uvelike u raznim granama tehnologije i industrije. Napretkom i daljnjim istraživanjima transformatora i samom primjenom, ima široku primjenu i u svakodnevnom životu.

U ovom završnom radu opisati će se princip rada Teslinog transformatora , te na osnovu visokih napona i frekvencije, proizvodi glazbu. Također se prikazuje cijeli postupak izrade samog transformatora, koji obuhvaća praktični dio i teorijski. Govorit će se također i o povijesti transformatora, kad je napravljen prvi transformator i razvoj istih od početka.

Cilj ovog završnog rada je prikazati bitnost transformatora i dokazati koji se sve zanimljivi projekti mogu napraviti.

Ključne riječi: Teslin transformator, visoki napon, princip rada, povijest transformatora

Design and application of the Tesla transformer

Summary:

The invention of Tesla's transformer has significantly eased modern life, making significant contributions across various branches of technology and industry. With advancements and further research in transformers and their practical applications, they have a wide range of everyday uses.

This final paper will describe the working principle of Tesla's transformer connected to an Arduino board, which, based on high voltage and frequency, generates music. The entire process of building the transformer will also be demonstrated, encompassing both the practical and theoretical aspects. It will also be discussed about the history of transformers, when the first transformer was made, and their development from the beginning.

The aim of this final paper is to showcase the importance of transformers and demonstrate the interesting projects that can be undertaken using them.

Keywords: Transformer, high voltage, work principles, history of transformers

1. UVOD

Svijet znanosti i inženjerstva svjedočio je mnogim revolucionarnim izumima tijekom povijesti, svaki s vlastitom jedinstvenom funkcionalnošću. Među ovim izvanrednim izumima, Teslina zavojnica se izdvaja kao izvanredan primjer inovacije, elektriciteta i neupitne težnje za znanjem. Ime je dobila po svom izumitelju, Nikoli Tesli, a oduševljava maštovite pojedince, znanstvenike i znatiželjne umove već više od stoljeća.

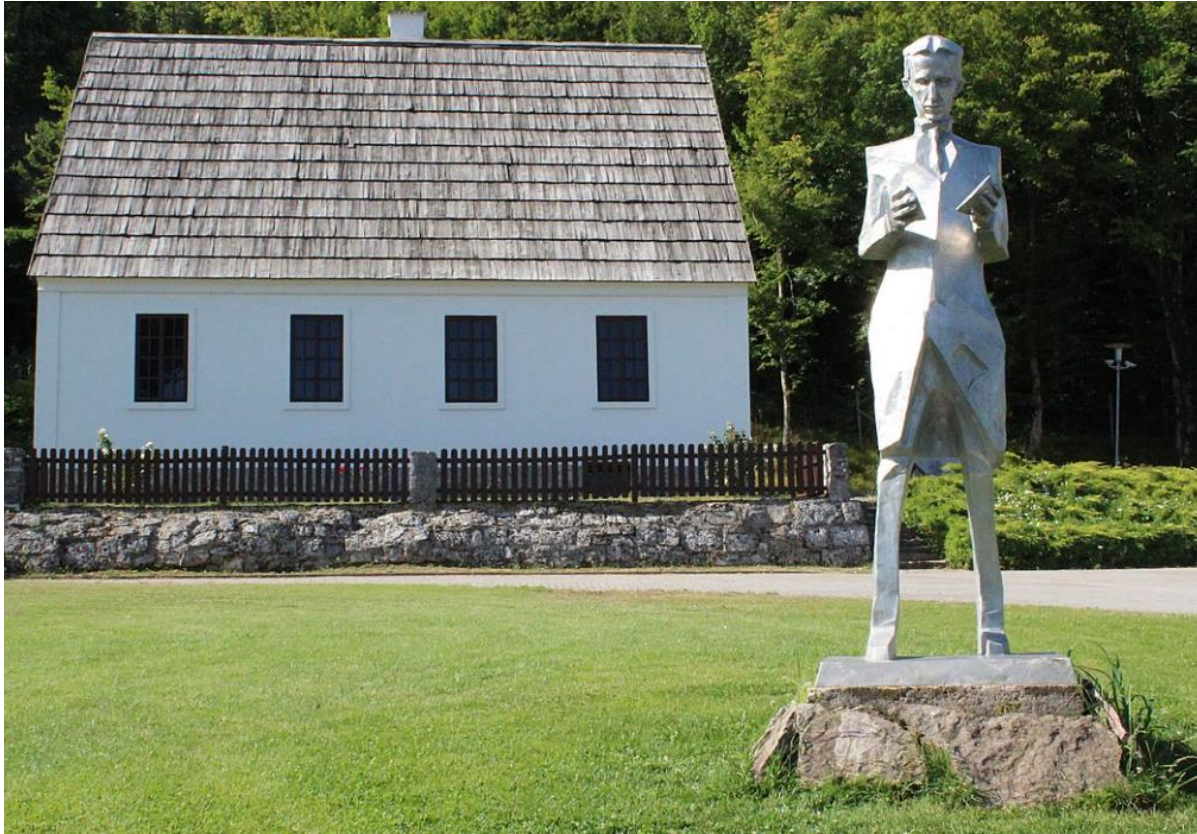
Nikola Tesla je eksperimentalno dokazao da je primjena visokofrekventne izmjenične struje (AC) ekonomičnija za električno osvjetljenje u usporedbi s konvencionalnom frekvencijom od 50 Hz. Prvi Teslin visokofrekventni generator izmjenične struje, s 400 parova polova i radnom brzinom od 3000 okretaja u minuti, proizvodio je struju frekvencije 10 kHz.

Tesla je nastavio istraživati različite metode za generiranje visokih frekvencija i napona. Jedan od pristupa je bio manipulacija razmakom u iskrištu (*Spark Gap*) unutar oscilirajućeg električnog kruga. Ovdje se generiraju električne oscilacije u frekvencijskom rasponu od 100.000 do 1.000.000 Hz, što rezultira odgovarajućim brojem prekida struje.

Karakteristika ovakvog oscilirajućeg električnog kruga je promjena smjera magnetskog polja između 100.000 i 1.000.000 puta u sekundi. Postavljanjem vodiča unutar ovog promjenjivog magnetskog polja inducira se struja visoke frekvencije i visokog napona. Na temelju ovog principa Tesla je razvio Teslin transformator.

U nastavku će se pobliže objasniti princip rada jednog od Teslinih najbitnijih izuma (Teslina zavojnica). Teslina zavojnica, na mnoge načine, simbolizira duh znanstvenog istraživanja i ljudsku težnju da se istraži ono što je moguće.

Ovaj završni rad će otkriti tajanstvenost Tesline zavojnice, pružiti uvid u njezin povijesni kontekst, komponente, osnovno djelovanje i utjecaj na različite discipline, od elektroinženjeringa do cilja ovog projekta. Nikola Tesla je bio istaknuti izumitelj i elektroinženjer čija su inovativna rješenja imala dubok i trajan utjecaj na razvoj suvremene elektrotehnike i tehnologije. Unatoč svojim revolucionarnim izumima i doprinosima elektrotehnici, Nikola Tesla je tijekom svog života često bio zapostavljen i suočavao se s financijskim izazovima. Ipak, njegovo nasljeđe je neosporno i trajno. Danas je Tesla priznat kao jedan od najvećih inovatora u povijesti, čiji su znanstveni i tehnološki doprinosi ostavili dubok i trajan utjecaj na suvremenu tehnologiju, uključujući elektroenergetiku, radiokomunikacije i druga važna tehnološka područja.

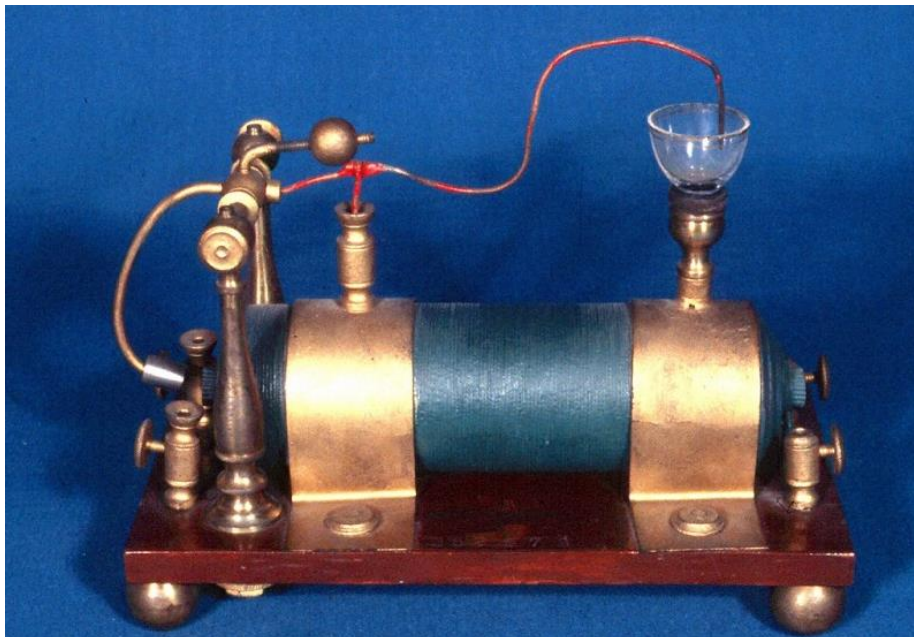


Slika 1. 1: Spomenik i rodna kuća Nikole Tesle u Smiljanu kraj Gospića (izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Spomenici_Nikoli_Tesli#/media/Datoteka:Nikola_Tesla_Smiljan_04.jpg)

2. POVIJEST I RAZVOJ TRANSFORMATORA

Od ranih početaka, koncept elektromagnetske indukcije, osnovni princip koji stoji iza transformatora, prvi je istražio Michael Faraday u 19. stoljeću. (1831.). Faradayeva eksperimentiranja s namotajima žice i mijenjanjem magnetskih polja postavila su temelje razvoju transformatora. Joseph Henry je godinu dana kasnije (1832.) otkrio izračun za indukciju te je njemu u čast posvećena mjerna jedinica henrij (H).

Otkrićem elektromagnetske indukcije napravljen je veliki korak prema otkriću prvog transformatora. Prvi transformator izumio je američki znanstvenik Charles G. Page. Bio je to uređaj koji izrađen od samo nekoliko namotaja žice. Indukcijska zavojnica Charlesa Graftona Pagea izrađena je od dva odvojena namotaja žice oko jezgre od mekanog željeza. Jedan namotaj je primarni, a drugi sekundarni namotaj. Primar je povezan s baterijom ili drugim izvorom napajanja. Kada struja teče kroz primar generira se magnetsko polje oko željezne jezgre. To magnetsko polje prolazili kroz sekundarni namotaj i inducira elektromotornu silu (EMS) odnosno napon u sekundarnom namotaju. Primjena induksijske zavojnice uglavnom se koristila u eksperimentalne i obrazovne svrhe. Nije bila dizajnirana za praktične primjene, već prije svega za ilustraciju principa elektromagnetske indukcije studentima i znanstvenicima.



Slika 2. 1: Indukcijska zavojnica Charlesa Graftona
<https://commons.princeton.edu/josephhenry/charles-page-induction-coil/>

Prvi "službeni" transformator (ne samo induksijska zavojnica), izum je mađarskih inženjera (Károly Zipernowsky, Ottó Bláthy i Miksa Déri). Oni su patentirali transformator sa zatvorenom jezgrom (ZBD) u Mađarskoj, Budimpešta.



Slika 2. 2: ZBD transformator (izvor: <https://basiceletrical.blogspot.com/2012/12/definition-of-transformer-transformer.html>)

ZBD transformator ima jezgru zatvorenog tipa izrađenu od laminiranih željeznih ploča kako bi se smanjili gubici uzrokovani vrtložnim strujama. Ovaj transformator ima dva seta namotaja, primarni i sekundarni, a oba su namotana oko te željezne jezgre. Omjer transformacije ovog transformatora određuje se brojem zavoja na tim namotajima. Radna osnova ZBD transformatora omogućuje učinkovitu promjenu napona, čime postaje ključan dio električnih sustava za distribuciju. Povećava napon za prijenos na velike udaljenosti i smanjuje ga za sigurnu i efikasnu lokalnu distribuciju.

2.1 Vrste transformatora

Transformatori se koriste za transformaciju električne struje i napona, pružajući preciznu transformaciju i adaptaciju između različitih elektroenergetskih parametara. Njihova osnovna funkcija je transformacija električnog napona i struje, što je ključno za optimizaciju performansi i funkcionalnosti električnih sustava.

Osim toga, transformatori omogućuju prenošenje oblika strujnih i naponskih impulsa niske snage, čime se osigurava očuvanje integriteta signala i precizna kontrola izlaznih parametara. Također se koriste za prilagodbu, regulaciju struje, napona i snage te modifikaciju impedancije u električnim krugovima.

Transformatori pružaju galvansku izolaciju između ulaznog i izlaznog elektroenergetskog kruga, čime se osigurava sigurnost i zaštita električnih uređaja i korisnika od potencijalnih električnih rizika, poput električnih udara i preopterećenja.

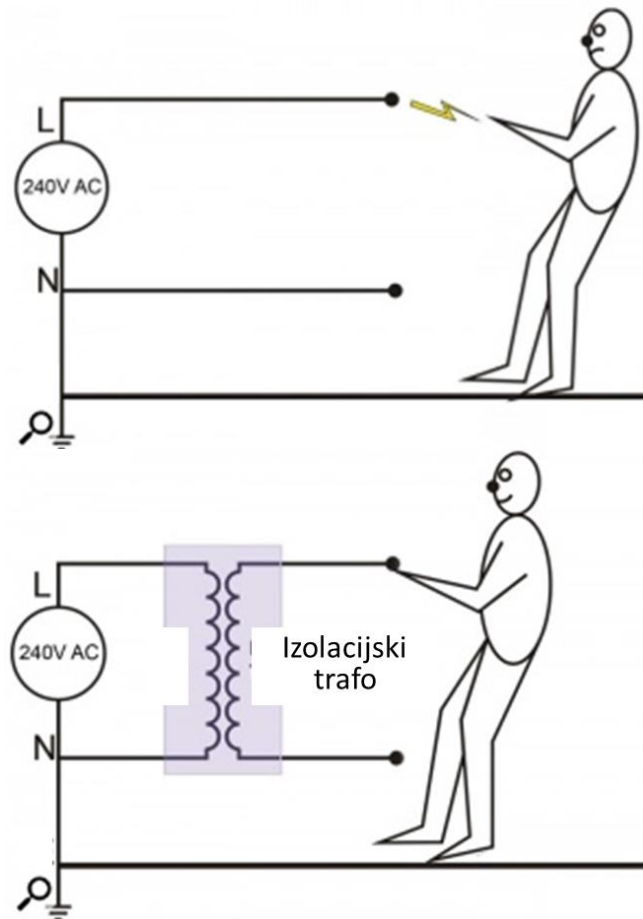
Što se tiče fizičkih karakteristika, transformatori se proizvode u širokom rasponu veličina i kapaciteta. Mogu biti vrlo kompaktni, s masom od nekoliko desetaka grama, do izuzetno velikih i teških jedinica koje mogu težiti stotine tona. Nominalne snage transformatora variraju u širokom rasponu: u kontekstu elektroničkih aplikacija i sustava, tipične vrijednosti se kreću do 300VA, dok su za energetske transformatore koji se primjenjuju u visokonaponskim prijenosnim i distribucijskim sustavima, nominalne snage od nekoliko KVA do nekoliko MVA.

Primjer: Strujni mjerni transformator (strujna kliješta) - izlazni napon je linearno ovisan o ulaznoj izmjeničnoj struji.



Slika 2. 3: Strujna kliješta

Kada je naponski omjer transformatora jednak induciranoj elektromotornoj sili na sekundarnoj strani, transformator ima omjer prijenosa 1:1. Radi se o izolacijskom transformatoru čija je primarna svrha električno izoliranje sekundarnog kruga od primarnog. Na primjer, uređaj za brijanje može se sigurno spojiti na električnu mrežu putem izolacijskog transformatora. Osim toga, ovaj tip transformatora može služiti za izdvajanje istosmjerne komponente iz signala koji uključuje i izmjenične (AC) i istosmjerne (DC) komponente.



Slika 2. 4: Izolacijski transformator – zaštita od strujnog udara

Transformatori se dijele prema frekvencijskom opsegu na: niskofrekvencijske mrežne transformatore (koriste se za napajanje elektroničkih sustava i rade na određenoj frekvenciji), audio transformatori, VHF transformatori, širokopolasni i uskopolasni frekvencijski transformatori te impulsni transformatori.

Uobičajeno, transformatori imaju dva namotaja, dok autotransformatori imaju samo jedan namotaj. U trofaznim sustavima koriste se trofazni transformatori s tri namotaja spojena u zvijezdu ili trokut.



Slika 2. 5: VE ORLICE - transformator vlastite potrošnje (tzv. kućni transformator – KT)



Slika 2. 6: Transformator 110/10 kV, 68,5 tona, 15 tona ulja

Idealni transformator

Za analizu rada transformatora koristi se idealizirani transformator koji zadovoljava sljedeće uvjete:

- jezgra ima izuzetno visoku magnetsku propustljivost, što zahtijeva vrlo malu magnetomotornu silu za stvaranje magnetskog toka,
- jezgra nema gubitaka od histereze i vrtložnih struja,
- cjelokupni tok zatvara se unutar jezgre (rasipni tok je zanemariv),
- otpor namotaja je zanemariv - nema gubitaka u bakru.

2.2 Princip rada transformatora

Za princip rada transformatora bitan je Faradayev zakon. Faradayev zakon elektromagnetske indukcije glasi: "Promjena magnetskog polja kroz zatvorenu petlju izaziva pojavu električne struje u toj petlji." Ovaj zakon je ključan princip u elektromagnetizmu i objašnjava kako se električna struja može generirati putem promjene magnetskog polja, ili obrnuto. Ovo je temelj razumijevanja elektromagnetske indukcije i ključno za brojne tehnološke primjene, kao što su generatori električne energije, transformatori i elektromagnetski motori. Faradayev zakon elektromagnetske indukcije može se matematički izraziti formulom:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

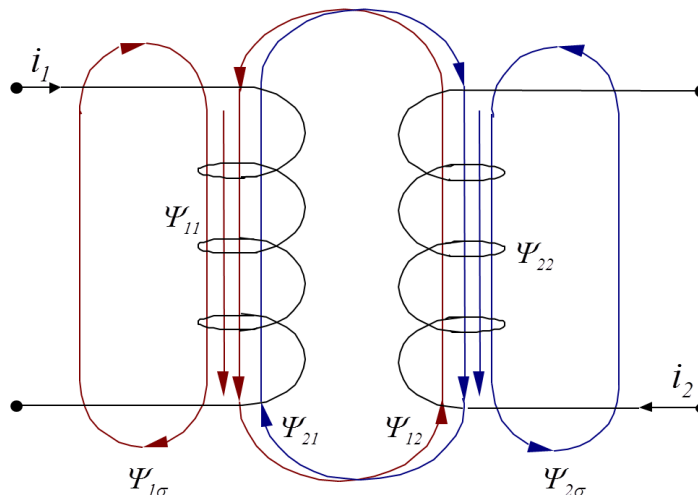
Jednadžba 2.1: Inducirana elektromotorna sila

gdje su:

- e – inducirana elektromotorna sila (EMS), odnosno inducirani napon u voltima (V)
- $d\Phi$ - promjena magnetskog toka kroz površinu poprečnog presjeka zavojnice,
- dt - promjena vremena.

Svojstva transformatora proizlaze iz principa međusobne indukcije između dva svitka postavljenih paralelno, što omogućava prožimanje njihovih magnetskih tokova.

Potrebno je ponoviti koncept međuinaktivne sprege. Analizirat ćemo međusobne odnose između dva induktivno povezana svitka s odgovarajućim brojevima namotaja (N_1) i (N_2) te induktivnostima (L_1) i (L_2). Ulazni krug opremljen prvim svitkom nazivamo primarnim krugom, skraćeno "primar". Izlazni krug odnosi se na krug opremljen sekundarnim svitkom, skraćeno "sekundar". Magnetski tokovi generiraju se u svitcima zbog protjecanja struja (I_1) i (I_2):



Slika 2. 7: Magnetski tokovi primara i sekundara

Svaki namotaj primara kroz koji protječe struja (I_1) generira magnetski tok (Φ_{11}), dok svaki namotaj sekundara kroz koji protječe struja (I_2) generira magnetski tok (Φ_{22}). Ovi magnetski tokovi su definirani kao:

$$\Phi_{11} = \Phi_{12} + \Phi_{1\sigma}$$

$$\Phi_{21} = \Phi_{22} + \Phi_{2\sigma}$$

U navedenim relacijama, tok Φ_{12} predstavlja dio toka primara koji obuhvaća i namotaje sekundara. Preostali tok $\Phi_{1\sigma}$ je rasipni tok primara. Analogno je Φ_{21} dio toka sekundara koji obuhvaća i namotaje primara, a preostali tok $\Phi_{2\sigma}$ je rasipni tok sekundara.

Rasipni tokovi čine glavni magnetski tok:

$$\Phi_g = \Phi_{12} - \Phi_{21}$$

Ukupni magnetski tok generiran primarnom strujom i povezan s primarnim namotajem Ψ_{11} je:

$$\Psi_{11} = N_1 \Phi_{11} = L_1 I_1$$

Isto vrijedi i za ukupni tok generiran u sekundarnom namotaju Ψ_{22} :

$$\Psi_{22} = N_2 \Phi_{22} = L_2 I_2$$

Ukupni tok kroz sekundarni namotaj Ψ_{12} uzrokovan tokom Φ_{12} je proporcionalan struji I_1 koja ga je proizvela, pri čemu je faktor proporcionalnosti međuinuktivitet M_{12} . Stoga vrijedi:

$$\Psi_{12} = N_2 \Phi_{12} = M_{12} I_1$$

Isto tako, ukupni tok kroz primarni namotaj uzrokovan tokom Φ_{21} proporcionalan je struji I_2 :

$$\Psi_{21} = N_1 \Phi_{21} = M_{21} I_2$$

Utvdili smo kakva je i kako se definira veza između namotaja transformatora. U idućem koraku istražiti ćemo na koji način transformator obavlja svoju osnovnu funkciju transformacije električnih veličina i kako se ona prikazuje.

Ako želimo transformirati napon U_1 na veći ili manji napon, spojiti ćemo ga na primarni svitak sa N_1 namotaja. Tok koji se stvara u namotaju primarnog svitka, kroz kojeg proizlazi izmjenična struja, mijenja se u prema promjenama struje, odnosno prema sinusoidnom zakonu:

$$\Phi_{11} = \Phi_{11m} \sin \omega t$$

Trenutačna vrijednost inducirane elektromotorne sile (EMS) na primarnom namotaju bit će prema zakonu elektromagnetske indukcije:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi_{11}}{dt} = -N_1 \Phi_{11m} \omega \cos \omega t = N_1 \Phi_{11m} \omega \sin(\omega t - 90^\circ)$$

Amplituda EMS-e je:

$$E_{11m} = N_1 \Phi_{11m} \omega$$

a njena efektivna vrijednost:

$$E_1 = \frac{E_{11m}}{\sqrt{2}} = \frac{N_1 \Phi_{11m} 2\pi f}{\sqrt{2}} = 4,44f N_1 \Phi_{11m}$$

Ova EMS održava ravnotežu s primijenjenim naponom, odnosno: $U_1 \approx E_1$.

Izmjenični tok koji je generiran u primarnom namotaju djelomice obuhvaća i sekundarni namotaj. Ovaj djelomični tok Φ_{12} inducira elektromotornu silu e_2 suprotnog smjera u sekundarnom namotaju:

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = N_2 \Phi_{12m} \omega \sin(\omega t - 90^\circ)$$

Analogno prethodnom postupku, odredi se njezina efektivna vrijednost:

$$E_2 = \frac{E_{12m}}{\sqrt{2}} = 4,44f N_2 \Phi_{12m}$$

Omjer elektromotornih sila primarnog i sekundarnog namotaja tada je:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44f N_1 \Phi_{11m}}{4,44f N_2 \Phi_{12m}} = \frac{N_1 \Phi_{11m}}{N_2 \Phi_{12m}}$$

Za transformator s feromagnetskom jezgrom, rasipanje toka je zanemarivo malo, faktor sprege je $k \approx 1$, odnosno $\Phi_{12} = \Phi_{11}$. Omjer induciranih EMS ima vrlo jednostavan oblik:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Ovo je ključni izraz koji opisuje temeljnu karakteristiku transformatora: inducirane EMS na primarnoj i sekundarnoj strani su proporcionalne odgovarajućim broju namotaja. Dakle, ako je $N_1 > N_2$ primarni namotaj je visokonaponski, a sekundarni niskonaponski, što omogućava transformaciju s višeg na niži napon. Suprotno je u slučaju $N_1 < N_2$ gdje niži napon na primaru transformiramo u viši napon na sekundaru. Teoretski, mogli bismo postići bilo koji omjer napona. Međutim, u praksi postoje ograničenja povezana s generiranim gubicima, koji su u izvedenom izrazu zanemareni. Također, postoje i ograničenja u izradi transformatora, kao što je na primjer, kvaliteta izolacije.

Ako transformator nije opterećen, odnosno kada je krug sekundara otvoren, napon na njegovim krajevima je približno jednak EMS E_2 ($U_2 \approx E_2$). Također, kod zračnog transformatora relativno mali djelatni otpor namotaja svitaka, može se zanemariti. U tom slučaju, napon priključen na primarni svitak približno je jednak EMS samoindukcije ($U_1 \approx E_1$). Stoga, omjer ulaznog (primarnog) napona U_1 i izlaznog (sekundarnog) napona U_2 približno odgovara omjeru EMS samoindukcije:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Odnos broja namotaja primarnog i sekundarnog namotaja naziva se prijenosni omjer ili odnos transformacije, n , pa vrijedi:

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

Zanemarimo li gubitke u prijenosu snage s primarni na sekundarni namot ($P_1 \approx P_2$) tada je:

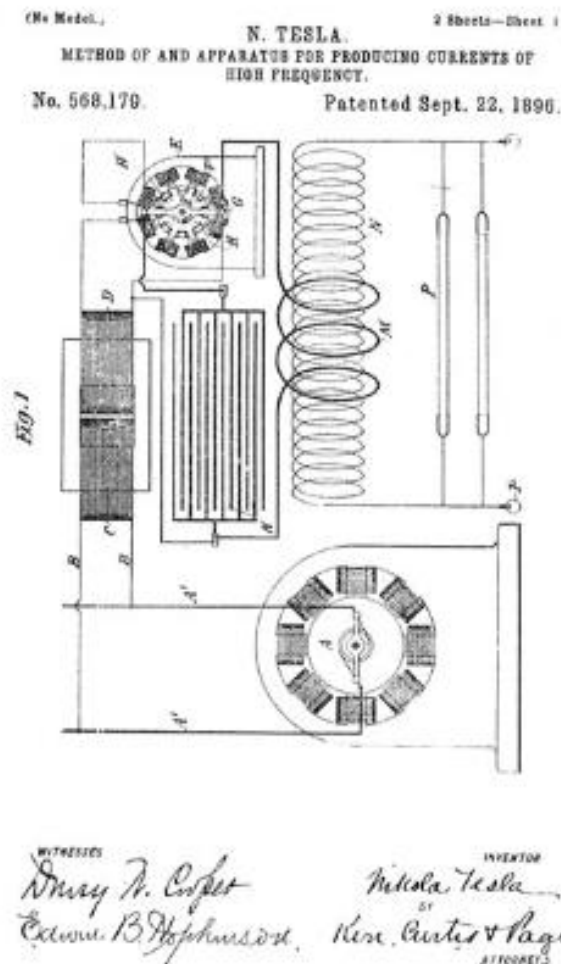
$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

stoga se može odrediti i omjer struja primarne i sekundarne strane:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{n}$$

3. TESLIN TRANSFORMATOR

Rezonantni transformator je uređaj dizajniran za generiranje visokih napona pri visokoj frekvenciji. Iako se temelji na istom principu kao i obični transformator, ima nekoliko karakterističnih razlika. Umjesto magnetske jezgre, postiže se učinkovita indukcija između primarnog i sekundarnog namota tako da je sekundarni smješten unutar primarnog. Primarni namot ima manji broj navoja, dok je sekundarni opremljen većim brojem. Osim toga, primarni namot je integriran u elektronički oscilator, iako je originalno koristio krug s iskrom i kondenzatorom. Za optimalno djelovanje, primarni i sekundarni krug moraju biti u rezonanciji. Na sekundarnom namotu generira se visoki napon, što rezultira stvaranjem moćnog elektromagnetskog polja visoke frekvencije u okolini. Ovaj uređaj nosi ime po svom izumitelju, Nikoli Tesli.



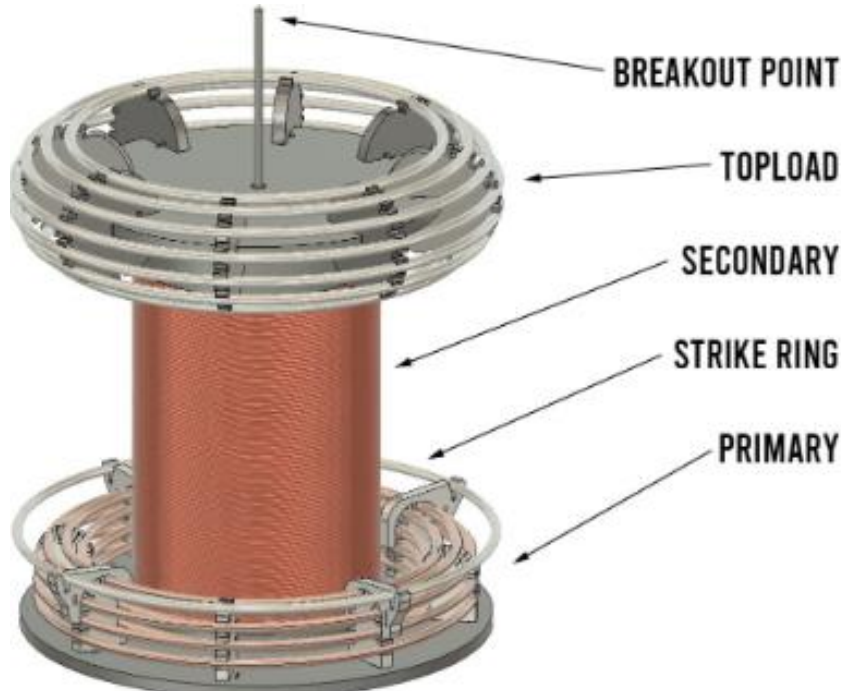
Slika 3. 1. - Patentirani nacrt Teslinog visoko-frekvencijskog transformatora (izvor: <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/teslin-transformator>)

Teslin transformator ili zavojnica imala je ključnu ulogu u prikazu karakteristika visokofrekvencijske izmjenične struje (AC). Tesla je svojim eksperimentima pripomogao u dokazivanju da je prijenos električne energije putem AC-a izvediv, što je kasnije dovelo do širokog prihvaćanja AC struje kao standarda za distribuciju električne energije.

Teslin doprinos u radu s zavojnicom imao je ključnu ulogu u razvoju bežičnog prijenosa električne energije. Vizionarski je zamislio svijet u kojem bi električna energija mogla putovati kroz zrak, što bi eliminiralo potrebu za kompliciranim kabelima za prijenos. Iako njegova ambiciozna vizija nije bila u potpunosti ostvarena za njegova života, postavila je temelje za kasniji razvoj bežičnih tehnologija i potaknula daljnja istraživanja u ovom području.

Teslina zavojnica doprinijela je ranom razvoju radijske tehnologije. Teslini eksperimenti s visokofrekventnim signalima i upotreba Tesla zavojnice u njegovom dizajnu odašiljača za radio utjecali su na rad drugih izumitelja, uključujući Guglielma Marconija, koji je kasnije dobio priznanje za izum radija.

Tesline zavojnice su vrijedni alati u edukativne svrhe. Pomažu u objašnjavanju i demonstraciji temeljnih načela elektriciteta, magnetizma, elektromagnetizma i rezonancije. Ove edukativne prezentacije često se koriste u nastavi fizike i u znanstvenim muzejima kako bi privukle i inspirirale učenike i širu javnost.



Slika 3. 2 - Teslina zavojnica (izvor: <https://arcattack.com/resources/how-a-tesla-coil-works/>)

3.1 Tesla zavojnice s čvrstim stanjem

Princip rada Teslinih zavojnica s čvrstim stanjem (eng. *Solid-State Tesla Coil*) bazira se na istim fundamentalnim principima kao i tradicionalne Tesline zavojnice, s ključnom razlikom u upotrebi čvrsto-stanovitih komponenata poput tranzistora i kondenzatora umjesto iskrišta. Kao i tradicionalne Tesline zavojnice, Tesline zavojnice s čvrstim stanjem (SSTC) sastoje se od dviju zavojnica: primarne i sekundarne zavojnice. Primarna zavojnica povezana je s izvorom električne energije, obično putem oscilacijskog kruga. Ova primarna zavojnica obično ima malen broj zavoja debljeg žice.

U SSTC-ima, umjesto tradicionalnog iskrišta, primjenjuje se čvrsto-stanoviti mehanizam za prekidanje struje. Ovaj mehanizam često uključuje upotrebu visokonaponskih tranzistora kao što su IGBT tranzistori. Oscilacijski krug kontrolira ove tranzistore i omogućava brzo prekidanje strujnog toka u primarnoj zavojnici. Za optimalno djelovanje, primarna i sekundarna zavojnica moraju biti podešene kako bi oscilirale pri istoj frekvenciji. Ova frekvencijska usklađenost pojačava električne oscilacije, rezultirajući značajnim povećanjem napona u sekundarnoj zavojnici. Sekundarna zavojnica, koja obično ima mnogo više namotaja od tanje žice nego primarna zavojnica, je mjesto gdje se generira visokonaponski izlaz. Funkcionira kao transformator koji povećava napon dok smanjuje struju.

Prekidanje struje tranzistora u primarnom krugu rezultira generiranjem visoko-frekvencijske izmjenične struje (AC). Ta visoko-frekvencijska izmjenična struja zatim se prenosi na sekundarnu zavojnicu putem elektromagnetske indukcije. Izmjenična struja visoke frekvencije u sekundarnoj zavojnici stvara električna pražnjenja, iskre i lukove.

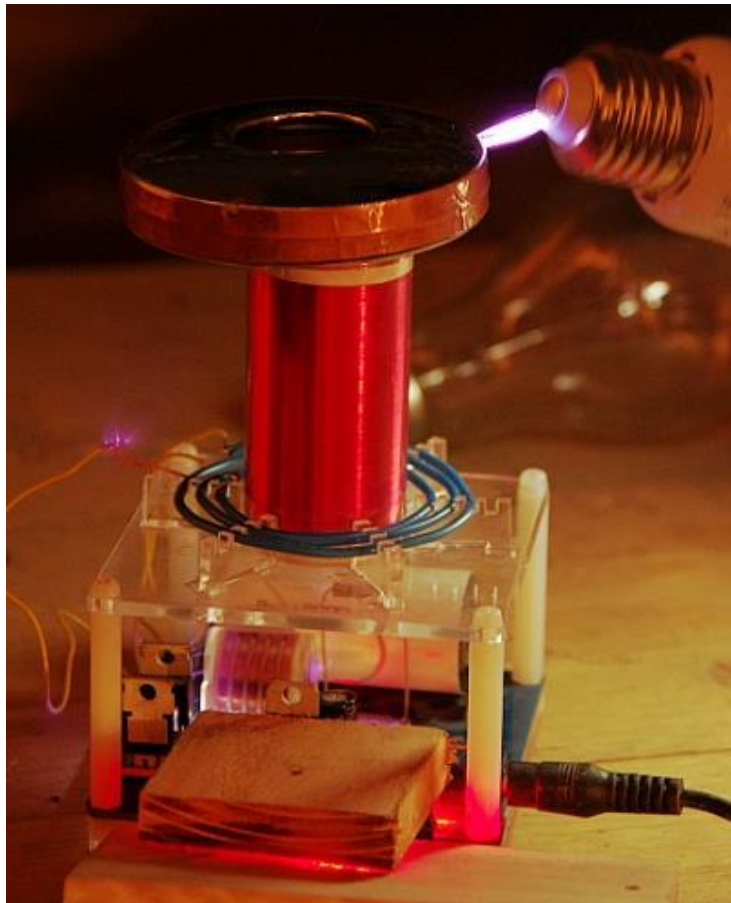


Slika 3. 3. - Teslina zavojnica s čvrstim stanjem (izvor: <https://www.electronixandmore.com/projects/tesla/medsstc.html>)

3.2 Tesla zavojnice s iskrištem

S obzirom da su ove zavojnice manje zastupljenije te u samom projektu se radi sa zavojnicom s čvrstim stanjem, spomenuti ćemo samo osnovni princip rada iste. Ova zavojnica koristi iskrište kao mehanizam prekidača za kontrolu električnog pražnjenja i prijenos energije između primarne i sekundarne zavojnice. Sličnih je elemenata kao i zavojnica s čvrstim stanjem, ali osnovna razlika je u prekidačkom mehanizmu.

Zavojnice sa iskrištem su manje učinkovite i generiraju više topline zbog prirode rada iskrišta koje se uključuje i isključuje. Zahtijevaju često održavanje i podešavanje iskrišta kako bi održali rad. Mogu biti riskantnije zbog mogućnosti nekontroliranih iskri i lukova. Zahtijevaju pažljivo rukovanje i sigurnosne mjere opreza. Također, takve zavojnice su veće i teže te imaju jači zvuk iskrišta.



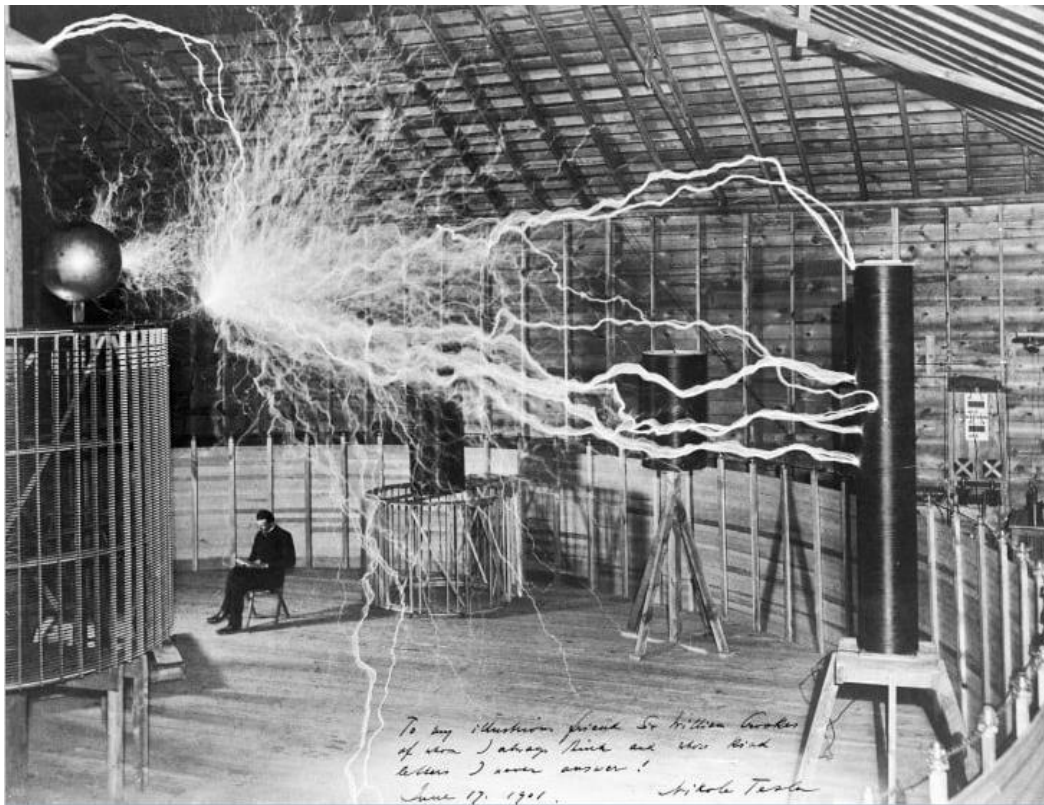
Slika 3. 4. - Teslina zavojnica sa iskrištem (izvor: <http://handsmagic.cc/sqtc06/>)

3.3 Primjena Tesline zavojnice

Sami izum Nikole Tesle koristi se i danas u razne svrhe. Kroz povijest je njegova zavojnica uvelike imala značajane primjene. Glavne primjene Tesline zavojnice očituju se u:

3.3.1 Bežični prijenos električne energije

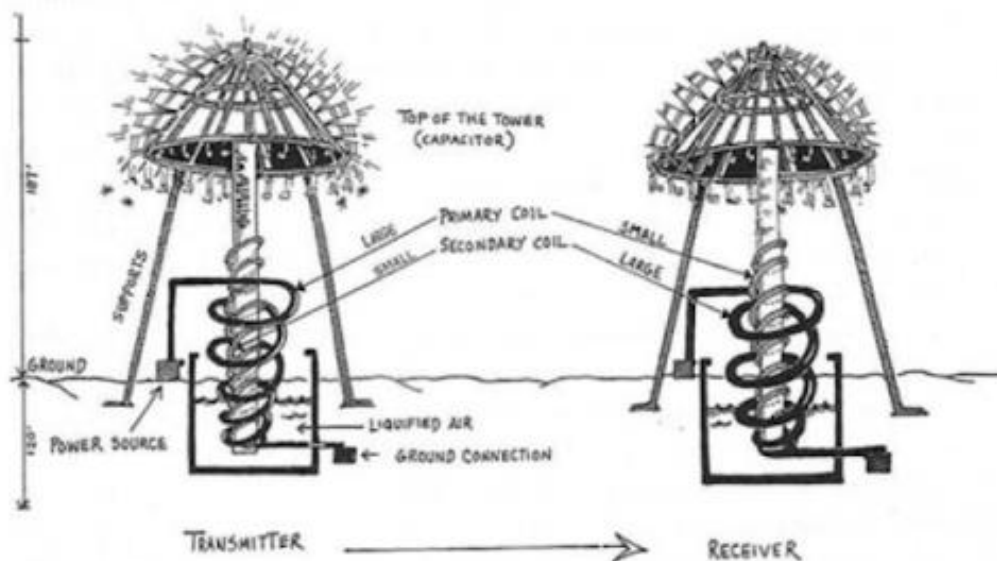
Nikola Tesla je sa svojim najvećim projektom, Wardencllyffe Tower, želio dokazati mogućnost bežičnog prijenosa električne energije. Središnju ulogu u ovom projektu imala je Tesla zavojnica. Tesla je bio uvjeren da će korištenjem Zemlje kao prirodnog provodnika i emitiranjem električnih struja kroz atmosferu moći efikasno prenositi energiju na velike udaljenosti. No, zbog nedostatka financijskih sredstava, projekt nije bio dovršen, te je toranj na kraju srušen. Unatoč tome, Tesline inovativne ideje su postavile osnove za daljnji razvoj bežične tehnologije i rezonantnog prijenosa energije.



Slika 3. 5. - Nikola Tesla i tzv. pojačavajući prijenosnik (izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla#/media/Datoteka:Nikola_Tesla,_with_his_equipment_Wellcome_M0014782.jpg)

3.3.2 Radio prijenos

Nikola Tesla sanjao je o svijetu u kojem bi se bežična komunikacija ostvarivala pomoću njegove Tesla zavojnice. Vjerovao je da bi njegove visokofrekventne radio valove mogli prenositi i primati na velikim udaljenostima, što bi moglo omogućiti globalnu bežičnu komunikaciju. Iako Tesla nije uspio ostvariti svoju viziju svjetskog bežičnog komunikacijskog sustava za vrijeme svog života, njegove inovativne ideje i eksperimenti postavili su osnove za razvoj suvremenih radio i bežičnih tehnologija.

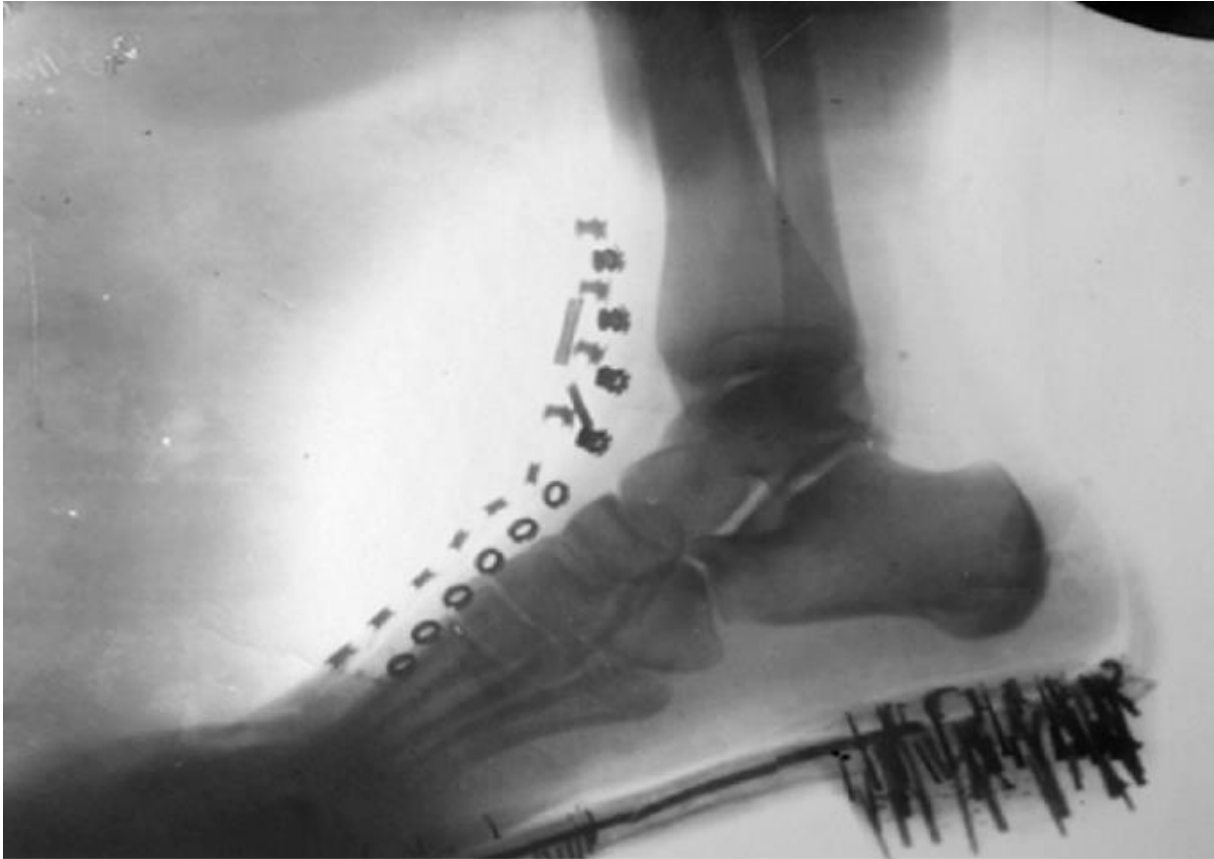


Slika 3. 6. - Princip rada bežične komunikacije (izvor: https://www.researchgate.net/figure/Tesla-Wireless-Power-Transmission_fig6_265565291)

3.3.3 Znanstvena istraživanja

Nikola Tesla eksperimentirao je s visokofrekventnim strujama u pokušaju rješavanja problema rasvjete i prijenosa električne energije na daljinu. U svom istraživanju primijetio je da visokofrekventne struje nisu štetne za ljudski organizam. Ova otkrića objavio je 1891. godine u časopisu "*Electrical World*". Izvođeci eksperimente s propuštanjem visokofrekventne struje kroz vlastito tijelo, Tesla je uočio mogućnost zagrijavanja tkiva tijela ovim strujama bez ikakve opasnosti. Zainteresiran za fiziološke učinke elektriciteta, Tesla je surađivao s liječnicima W. J. Duganom i S. H. Monellom na temu elektroterapije. Također je konstruirao poseban uređaj za liječenje visokofrekventnim strujama, koji se danas nalazi u Muzeju Nikole Tesle u Beogradu. Ova tehnologija, poznata kao teslinizacija, danas se primjenjuje u medicinskoj dijatermiji za liječenje raznih zdravstvenih problema, uključujući reumatske bolesti, upale te u ginekologiji i kirurgiji.

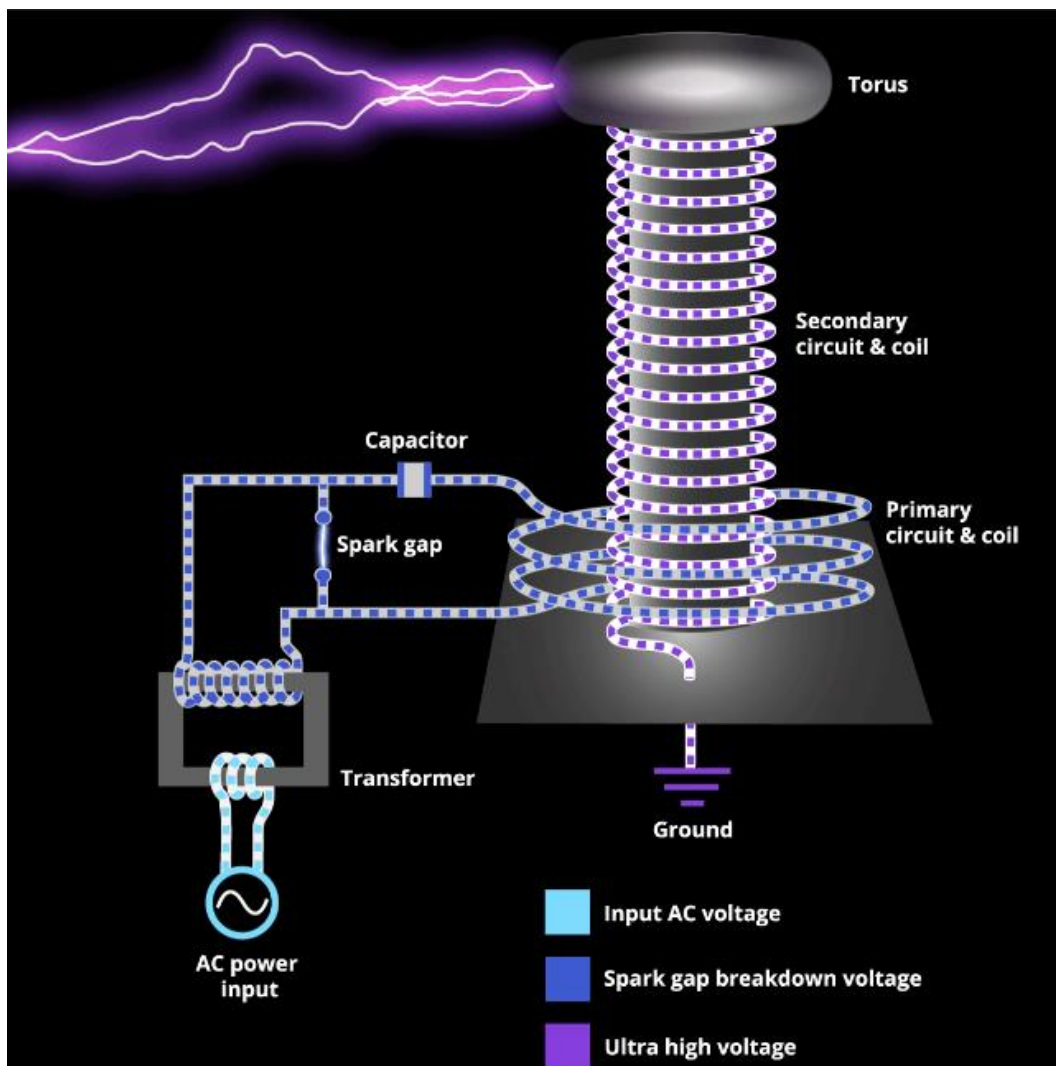
Eksperimentirajući s visokofrekventnom strujom, Nikola Tesla uočio je da te struje potiču proizvodnju ozona u zraku . U niskim koncentracijama, ozon ima osvježavajuće svojstvo te baktericidno djelovanje. S obzirom na svoje znanje o baktericidnim svojstvima ozona, Tesla je razvio jedan od prvih ozonskih generatora ili ozonizatora. Ovaj izum patentirao je 1896. godine (slika 5.3.), a 1900. osnovao je tvrtku "*Tesla Ozone Company*" koja je proizvodila te ozonske generatore i prodavala ih liječnicima. Danas se ozonizatori koriste za pročišćavanje i osvježavanje zraka u prostorima opremljenima klima-uređajima.



Slika 3. 7. - Slika lubanje koju je napravio Tesla (izvor: https://www.researchgate.net/figure/A-shadowgraph-of-a-human-foot-with-a-shoe-on-Tesla-made-this-image-in-1896-with-X-rays_fig3_310435351)

4. DIZAJN TESLINE ZAVOJNICE

Princip rada Teslinog transformatora prikazan je na slici 4.1.



Slika 4. 1: Princip rada Teslinog transformatora

1. Izmjenična struja (AC) se dovodi na primarni krug transformatora. Transformator povećava napon i smanjuje struju u primarnom krugu.
2. Snaga koja teče kroz primarni namotaj generira magnetsko polje, što rezultira indukcijom većeg napona u sekundarnom namotaju zbog većeg broja zavoja u sekundarnom namotaju u odnosu na primarni.
3. Kondenzator i iskrište usklađuju krug rezonantno. Kada se postigne rezonantna frekvencija, snaga oscilira između dva kruga s pojačavajućim učinkom. To pojačava napon u sekundarnom namotaju na izuzetno visoke razine.
4. Izuzetno visoki napon u sekundarnom namotaju uzrokuje ionizaciju zraka oko toroida. To stvara vizualne iskre i pucketave zvukove.

Slijedi opis dizajna Teslinog transformatora. Primarna zavojnica je namotana na PVC cijev promjera 12 cm, koristeći žicu promjera 2 mm i sastoji se od tri zavoja. Sekundarna zavojnica je namotana na cijev promjera 4,4 cm, koristeći žicu promjera 0,2 mm i ima 900 zavoja. Radi visokih naponskih opterećenja, sekundarna zavojnica je premazana izolacijskim lakom. Primarni kondenzator ima kapacitet od 100 uF i nazivnu naponsku izdržljivost od 35V. Toroidalno oblikovano tijelo izrađeno je od plastike i postavljeno je na vrhu sekundarne zavojnice.

Komponente se pažljivo montiraju postupno, počevši od manjih prema većim radi praktičnosti. Prvo se leme SMD komponente (komponente s površinskim montiranjem), a potom THD komponente (komponente s rupičastim montiranjem). MOSFET prekidači postavljaju se na odgovarajuće hladnjake, uz primjenu termalne paste kako bi se učinkovito odvodila višak toplinske energije i osigurao stabilan rad.

Primarni rezonantni krug sastoji se od primarnog namota i primarnog kondenzatora. Rezonantna frekvencija ovog kruga može se podesiti promjenom induktiviteta, odnosno variranjem broja zavoja ili kapaciteta primarnog kondenzatora. Slično je i s sekundarnim rezonantnim krugom. No, zbog tehničkih izazova vezanih uz promjenu broja zavoja na sekundarnom namotu, glavni način prilagodbe je modifikacija kapaciteta sekundarnog kruga.

Napajanje ima izlaz od 48V/2A, pri čemu je snaga jednaka:

$$P = U * I = 48 * 2 = 96W$$

U ovom modelu Tesline zavojnice, povratna veza se uspostavlja sa sekundarnog namota kako bi se održala stabilna rezonancija sekundarnog kruga. Međutim, radi postizanja maksimalne efikasnosti i najvećeg izlaznog napona, ključno je uskladiti rezonanciju i u primarnom krugu, odnosno raditi na istoj frekvenciji kao i sekundarni krug.

Za izračun induktiviteta zavojnice potrebno je uzeti u obzir broj namotaja same zavojnice, propusnost zraka, koja je konstanta te duljinu zavojnice od početka do kraja namotaja. Stoga induktivitet zavojnice možemo izračunati prema sljedećoj formuli:

$$L = \frac{\mu_0 * N^2 * P}{l}$$

gdje je:

- μ_0 – propusnost zraka koja je konstanta, a iznosi $4\pi * 10^{-7}$ H/m
- N – broj namotaja
- A – površina poprečnog presjeka zavojnice izražena u metrima kvadratnim
- l – ukupna duljina zavojnice.

Budući da zavojnica ima promjer $D = 4.4$ cm, iz toga radijus iznosi $r = \frac{D}{2} = \frac{4.4}{2} = 2.2$ cm zatim možemo izračunati površinu poprečnog presjeka:

$$A = \pi * r^2 = \pi * (2.2)^2 = 15.2 \text{ cm}^2 = 0.00152 \text{ m}^2$$

Pa se iz toga računa ukupni induktivitet zavojnice:

$$L = \frac{4\pi * 10^{-7} * (900)^2 * 0.00152 \text{ m}^2}{0.27 \text{ m}}$$

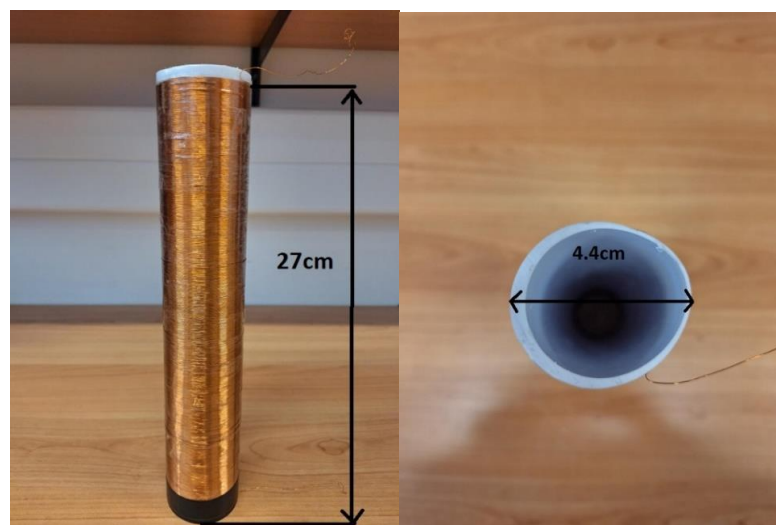
$$L = \frac{4\pi * 10^{-7} * 810\,000 * 0.00152 \text{ m}^2}{0.27 \text{ m}}$$

$$L = 0.00573 \text{ H ili } 5.73 \text{ mH}$$

Tablica 4.1. – Prikaz specifikacija zavojnice

| | |
|--------------------------------------|-------------------|
| Broj zavoja(sekundar): | $N_2 = 900$ |
| Duljina zavojnice (cm): | 27 cm |
| Ukupna duljina žice(l): | 140 m |
| Ulazni napon (U): | 48V |
| Radna snaga (P): | 96W |
| Otpor zavojnice (R): | 8.43 Ω |
| Promjer zavojnice (cm): | 4.4 cm |
| Težina žice (kg): | 0,134 kg |
| Materijal žice: | Bakrena žica |
| Induktivitet zavojnice (izračunati): | 5.73 mH |
| Induktivitet zavojnice (izmjereni): | 5.52 mH |
| Specifični otpor žice: | $0.017 * 10^{-6}$ |

Tablica 4.1. prikazuje specifikacije zavojnice koja se izvodi u projektu te njihove vrijednosti.



Slika 4. 2: Dimenzije zavojnice

Slika 4.2. prikazuje duljinu i promjer zavojnice.

Kako bismo bili sigurni koliko induktivitet ima zavojnica, izmjerili smo isti u laboratoriju na Odjelu.

Slika 4.3 prikazuje izmjereni induktivitet zavojnice.



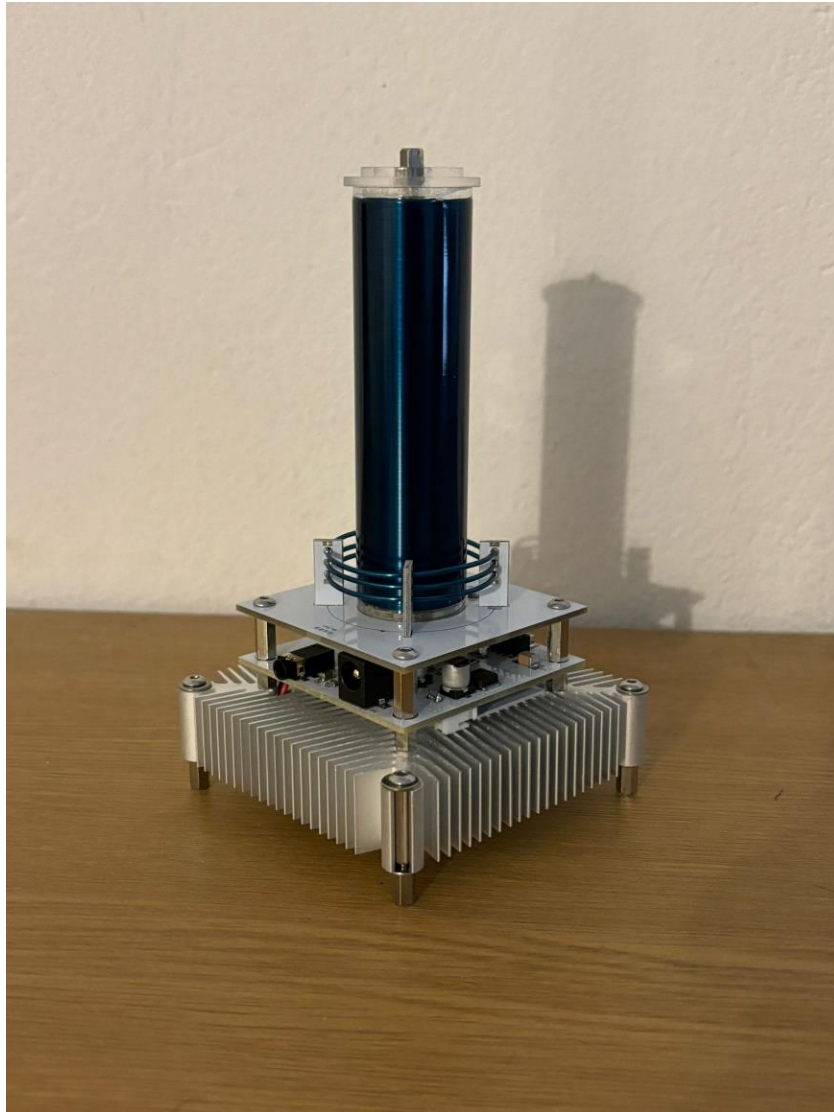
Slika 4. 3: Multimetrom izmjereni induktivitet

Međutim da bismo izračunali otpor zavojnice $R = \rho \frac{l}{S}$ potrebno nam je znati ukupnu duljinu žice (u metrima), površinu poprečnog presjeka žice te broj namotaja. Ali sve te nepoznanice imamo pa je lako izračunati otpor.

$$R = 0.0178 * 10^{-6} \frac{140m}{0.3mm^2\pi}$$
$$R = 8.43 \Omega$$

5. IZVEDBA TESLINE ZAVOJNICE

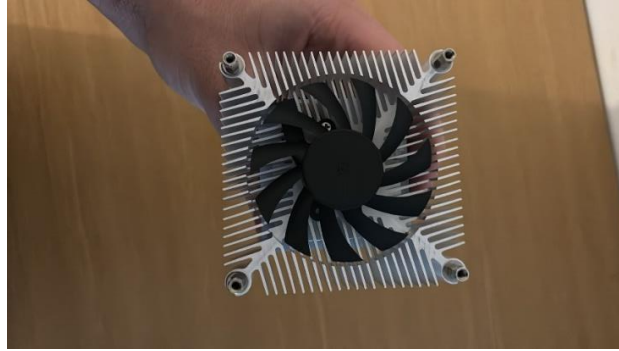
Ovdje je prikazana izvedba Tesline zavojnice prikazane na slici 5.1. Naime ova Teslina zavojnica je naručena u kitu sa stranice Amazon. Zavojnica je sastavljena u laboratoriju na Odjelu.



Slika 5. 1. - Muzikalna Teslina zavojnica

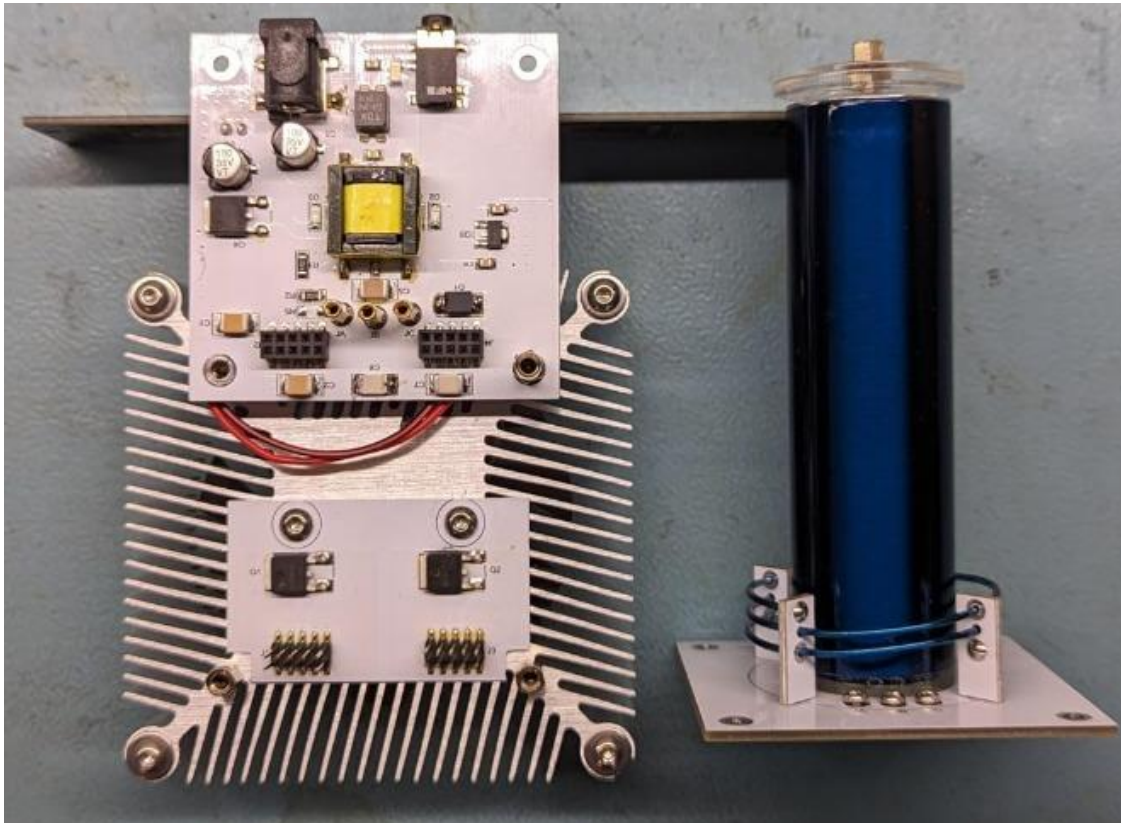
Teslina zavojnica ima snažan ventilator koji se automatski uključuje prilikom rada. Također, donja strana zavojnice je opremljena velikim aluminijskim hladnjakom za efikasno odvođenje topline. Zbog ovakvog učinkovitog hlađenja, Teslina zavojnica može raditi dulje vremena bez problema s pregrijavanjem, što poboljšava njezinu trajnost i radne karakteristike.

Na slici 5.2. prikazani su hladnjak i ventilator korišteni u projektu.

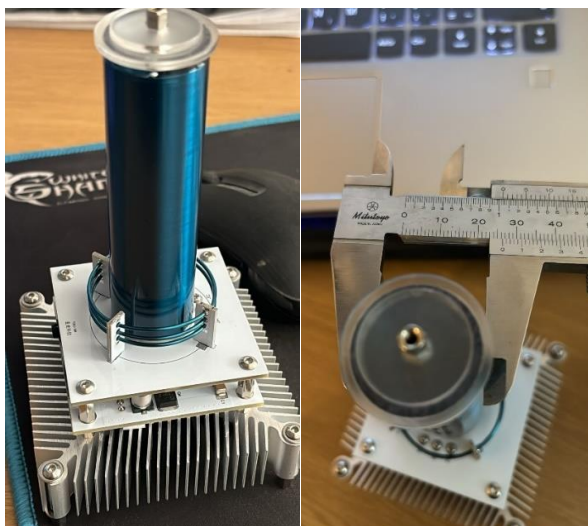


Slika 5. 2: Hladnjak i ventilator

Primarni rezonantni krug je namješten da radi na istoj rezonantnoj frekvenciji kao sekundarni rezonantni krug. Parametri primarne i sekundarne zavojnice su konstantni. Da bi se postigla rezonancija, odnosno maksimalna amplituda izlaznog napona, vrijednosti primarnog i sekundarnog kondenzatora prilagođavaju se. Pri namještanju je ključno osigurati pravilno funkcioniranje MOSFET prekidača u skladu s ulaznim i izlaznim naponima. Ulazni napon MOSFET-a određuje se kao napon između *Gate* i *Source* elektroda, dok se izlazni napon definira kao napon između *Drain* i *Source* elektroda. Na slici 5.3 su prikazane sastavne komponente cijelog projekta.



Slika 5. 3: Komponente sustava



Slika 5. 4: Dimenzije zavojnice

Teslina zavojnica je sposobna generirati visokofrekventno i visokonaponsko elektromagnetsko polje. Kada se plin unutar lampe izloži ovom polju, dolazi do ionizacije plina i emitiranja svjetlosti. Udaljenost između zavojnice i lampe te intenzitet svjetla ovise o jakosti električnog polja i koncentraciji plina u lampi. Ova tehnologija je primjenjiva za osvjetljenje neon lampi, žarulja s niskom potrošnjom, fluorescentnih lampi i bljeskalica. Također je moguće izvesti bežične prijenose energije te generirati rotirajuće električne iskre.



Slika 5. 5: Iskrište zavojnice

Svaki put kada zavojnica izvrši pražnjenje, dolazi do vibracije zraka. Promjenom frekvencije pražnjenja mijenja se i frekvencija vibracija, što rezultira različitim tonovima koje konvencionalna Tesla zavojnica s iskrištem ne može reproducirati. Ugrađena je elektronička pločica za gašenje luka koja regulira rad Tesla zavojnice. Putem te pločice moguće je kontrolirati frekvenciju pražnjenja. U slučaju ulaznog glazbenog signala, reprodukcija glazbe je omogućena. Audio signal modulira radni napon Tesline zavojnice kroz integrirani sklop. Ulazom glazbenog signala, radni napon Tesla zavojnice oscilira u ritmu glazbe, što utječe na intenzitet zagrijavanja zraka iskrama. Ova interakcija rezultira vibracijom zraka u skladu s glazbenim signalom, proizvodeći zvučni val glazbe. Osim što posjeduje razne reprodukcijske funkcije, ova zavojnica je i sofisticirani elektronički uređaj pogodan za edukaciju, dekorativne i zabavne svrhe.

6. ZAKLJUČAK

Transformatori su ključni za suvremeni način života, a nemoguće ih je efikasno zamijeniti drugim uređajima, posebno u prijenosu električne energije. Za jednostavniji i bežični prijenos energije Teslin transformator predstavlja važan korak. Nikola Tesla je demonstrirao da se električna rasvjeta može ekonomičnije ostvariti upotrebom izmjenične struje visoke frekvencije, umjesto standardne 50 Hz frekvencije.

U drugom poglavlju rada govori se o samoj povijesti transformatora. Funkcioniranje transformatora bazira se na principu elektromagnetske indukcije. Ukratko, kada se magnetski tok kroz provodnu petlju promijeni tijekom određenog vremenskog intervala, u njoj se stvara inducirani napon, odnosno struja. Ova struja stvara novi magnetski tok koji se suprotstavlja promjeni prvotnog toka prema Lenzovom pravilu.

U trećem poglavlju opisane su princip rada i primjene Teslinog transformatora kroz povijest. U četvrtom poglavlju opisan je dizajn Tesline zavojnice, a u petom dan je primjer izvedbe. Teslina zavojnica može se koristiti u edukacijske svrhe i za zabavu, kao i za razna istraživanja u radiokomunikacijama i medicini.

Literatura

1. Malešić, Lj.: *Osnove elektrotehnike II: Rezonancija*, Split 2018.
2. Malešić, Lj.: *Osnove elektrotehnike II: Transformatori*, Split 2018.
3. Čavka, I. *Najznačajnija otkrića Nikole Tesle*, završni rad, Sveučilište u Splitu, pomorski fakultet u Splitu 2020. [posjećeno 20.ožujka.2024.]
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_coil
5. <https://www.instructables.com/How-To-Make-A-Musical-Solid-State-Tesla-Coil-SSTC/>
6. Salopek, I.; Žauhar, G.: Teslini doprinosi medicini, *Acta medico-historica Adriatica*, AMHA 2006.,189 – 198 str. [posjećeno 23.ožujak. 2024.]
7. <https://edisontechcenter.org/Transformers.html> (posjećeno 21.ožujak. 2024.)
8. Ivanić, D.: Teslin transformator, završni rad, Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet u Rijeci, 2015. [posjećeno 22. kolovoz 2024.]
9. <https://enciklopedija.hr/clanak/transformator> (posjećeno 23. ožujak 2024.)
10. Radovanović, D.: *Električni strojevi*, Industrijsko obrtnička škola, Pula
11. <https://teslauniverse.com/nikola-tesla/articles/teslas-tower-wardenclyffe>

Popis slika

| | |
|--|----|
| Slika 1. 1: Spomenik i rodna kuća Nikole Tesle u Smiljanu kraj Gospića (izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Spomenici_Nikoli_Tesli#/media/Datoteka:Nikola_Tesla_Smiljan_04.jpg) | 2 |
| Slika 2. 1: Indukcijska zavojnica Charlesa Graftona (https://commons.princeton.edu/josephhenry/charles-page-induction-coil/) | 3 |
| Slika 2. 2: ZBD transformator (izvor: https://basicelectrical.blogspot.com/2012/12/definition-of-transformer-transformer.html) | 4 |
| Slika 2. 3: Strujna kliješta | 5 |
| Slika 2. 4: Izolacijski transformator – zaštita od strujnog udara | 6 |
| Slika 2. 5: VE ORLICE - transformator vlastite potrošnje (tzv. kućni transformator – KT) | 6 |
| Slika 2. 6: Transformator 110/10 kV, 68,5 tona, 15 tona ulja | 7 |
| Slika 2. 7: Magnetski tokovi primara i sekundara | 8 |
| Slika 3. 1. - Patentirani nacrt Teslinog visoko-frekvencijskog transformatora (izvor: https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/teslin-transformator) | 12 |
| Slika 3. 2 - Teslina zavojnica (izvor: https://arcattack.com/resources/how-a-tesla-coil-works/) | 13 |
| Slika 3. 3. - Teslina zavojnica s čvrstim stanjem (izvor: https://www.electronixandmore.com/projects/tesla/medsstc.html) | 14 |
| Slika 3. 4. - Teslina zavojnica sa iskrištem (izvor: http://handsmagic.cc/sgtc06/) | 15 |
| Slika 3. 5. - Nikola Tesla i tzv. pojačavajući prijenosnik (izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla#/media/Datoteka:Nikola_Tesla,_with_his_equipment_Welcome_M0014782.jpg) | 16 |
| Slika 3. 6. - Princip rada bežične komunikacije (izvor: https://www.researchgate.net/figure/Tesla-Wireless-Power-Transmission_fig6_265565291) | 17 |
| Slika 3. 7. - Slika lubanje koju je napravio Tesla (izvor: https://www.researchgate.net/figure/A-shadowgraph-of-a-human-foot-with-a-shoe-on-Tesla-made-this-image-in-1896-with-X-rays_fig3_310435351) | 18 |
| Slika 4. 1: Princip rada Teslinog transformatora | 19 |
| Slika 4. 2: Dimenzije zavojnice | 22 |
| Slika 4. 3: Multimetrom izmjereni induktivitet | 23 |
| Slika 5. 1. - Muzikalna Teslina zavojnica | 24 |
| Slika 5. 2: Hladnjak i ventilator | 25 |
| Slika 5. 3: Komponente sustava | 25 |
| Slika 5. 4: Dimenzije zavojnice | 26 |
| Slika 5. 5: Iskrište zavojnice | 26 |