

TESLIN TRANSFORMATOR

Armin Čelarević, Internacionalni univerzitet Travnik u Travniku,
celarevicarmin@gmail.com

Izvorni naučni rad

Sažetak

Nikola Tesla jedan je od najvećih pronalazača na polju elektrotehnike. Nikola Tesla je izumio transformator za stvaranje visokofrekventnih i visokonaponskih „Teslinih struja“. Napredak u elektronici pomogao je ljudima da naprave Tesline transformatore koji imaju široku primjenu u svakodnevnom životu. Tesla je eksperimentisao sa visokim frekvencijama i veoma visokim naponima. Bavio se prijenosom signala, daljinskom komandom, fluorescentnim osvjjetljenjem, prijenosom energije na daljinu i još mnogo toga. Postavio je temelje velikom broju oblasti koje su se razvile mnogo kasnije. Posvetio je svoj radi bežičnom prijenosu električne energije iz kojeg je nikao radio, i današnje savremene komunikacije, robotike itd. Teslin transformator prvi put je predstavljen na univerzitetu Columbia u SAD-u 1892. godine. U ovom radu biće prikazane različite konstrukcije Teslinog transformatora, također, biće opisan način rada Teslinog transformatora. Studenti i učenici širom svijeta uče o Teslinim teorijama koje je postavio prije gotovo 130 godina, a Teslin transformator je samo jedan od njih.

Ključne riječi: *Teslin transformator, sekundarni namotaj, rezonancija, iskrište, strujni udar*

TESLA TRANSFORMER

Abstract

Nikola Tesla is one of the greatest inventors in the field of electrical engineering. Nikola Tesla invented a transformer for creating high-frequency and high-voltage "Tesla currents". Advances in electronics have helped people make Tesla transformers that are widely used in everyday life. Tesla experimented with high frequencies and very high voltages. He dealt with signal transmission, remote control, fluorescent lighting, long-distance energy transmission and much more. He laid the foundations for a large number of fields that developed much later. He dedicated his work to the wireless transmission of electrical energy from which he worked, and today's modern communication, robotics, etc. Tesla's transformer was first presented at Columbia University in the USA in 1892. In this paper, the different constructions of the Tesla transformer will be presented, and the mode of operation of the Tesla transformer will also be described. Students and pupils all over the world learn about Tesla's theories that he put forward almost 130 years ago, and Tesla's transformer is just one of them.

Key words: *Tesla Transformer, secondary winding, resonance, spark, electric shock*

1 UVOD

Transformator je uređaj koji se koristi u svakodnevnom prijenosu električne energije na velike udaljenosti. 1891. godine Nikola Tesla je počeo raditi na uređaju koji na izlazu proizvodi visoki napon i frekvenciju. Teslin transformator, još uvijek nije u praktičnoj upotrebi. Teslin transformator sastoji se od električne zavojnice koja je načinjena od žice s malo zavoja, visokonaponskog električnog kondenzatora i iskrišta. U laboratoriju za visoki napon vrše se ispitivanja sposobnosti izolacije različite opreme na podnošenje visokih napona. U tim laboratorijima se nalaze uređaji koji proizvode visoke napone različitog talasnog oblika, kao i uređaji za generisanje struje velikih amplituda. Jedan od najpoznatijih uređaja za dobijanje visokih napona visoke učestanosti je Teslin transformator.

Kao i svi transformatori tako i Teslin transformator ima dva odvojena kola tj. primar i sekundar. Na primaru je dodan visokonaponski keramički kondenzator i koji uz induktor formira rezonantno ili LC kolo. U kolu se još također nalazi zazor tj. iskrište. Kondenzator energiju skladišti u svom električnom polju, dok kalem energiju skladišti u magnetnom polju. Povezivanjem električnog izvora na primar dobija se sistem isporučivanja naelektrisanja.

Sekundarni dio se sastoji od namotaja žice i elektroda. Ovi namotaji nalaze se u istom dijelu prostora koji zauzima namotaj primarnog kola. Promjenljivo magnetno polje stvara električno koje pomjera naelektrisanja duž sekundarnog kalema. Kako magnetno polje posjeduje veliku energiju što predstavlja visokonaponsko naelektrisanje, koje se akumulira u elektrodama sekundarnog kalema i stvara iskre tj. munje. Većina kola mora da ima zatvorenu petlju, međutim kod sekundara Teslinog transformatora to ne mora. Teslin transformator u originalnom obliku može da proizvede napon između 10-12 miliona

volti. Ovakav napon je dovoljan da izazove električnu

pražnjenje u vazduhu dugo i do četrdeset metara. Kako se pravac elektrona kroz sekundarni namotaj stalno mijenja tj. napred-nazad zbog oscilatornog kola, Teslin kalem predstavlja visoko-frekventni uređaj čije se naelektrisanje elektroda mijenja od pozitivnog prema negativnom i obrnuto i po nekoliko miliona puta u sekundi. Brza promjena naelektrisanja i promjenljivo magnetno polje čine Teslin transformator snažnim emiterom elektromagnetnih talasa.

2 Transformator

Transformator se sastoji od dvije zavojnice sa zajedničkom jezgrom od feromagnetnog materijala što je najčešće željezo. Jezgra služi za prijenos magnetskog toka iz jedne zavojnice u drugu. Jezgra je sastavljena od niza pločica međusobno električno izoliranih kako bi se izbjegle vrtložne struje u jezgri. Jezgra transformatora prolazi kroz obje zavojnice i zatvara puni krug. Idealnim transformatorom nazivamo transformator u kojem nema rasipanja magnetno toka, a također nema ni gubitka u samoj jezgri. Na primarni namotaj dovodi se izmjenični napon koji uzrokuje izmjeničnu struju kroz tu zavojnicu, a samim time i promjenjiv magnetski tok koji inducira elektromagnetsku silu u sekundaru.

Faradayov zakon indukcije je osnovni zakon elektromagnetizma koji pokazuje kako se magnetsko polje ponaša s električnim krugom te kako stvara elektromagnetnu silu ili elektromagnetsku indukciju. Za dopunu Faradayovog zakona bio je potreban matematički dokaz. Za taj dokaz se pobrinula Maxwelllova jednačina koja opisuje elektromagnetnu silu u pokretu. Da bi dopuna bila sasvim potpuna, Lorentzova sila prikazuje magnetski tok kroz električni krug i daje smjer inducirane elektromotorne sile i struje iz elektromagnetske indukcije.

2.1 Konstrukcija Teslinog transformatora

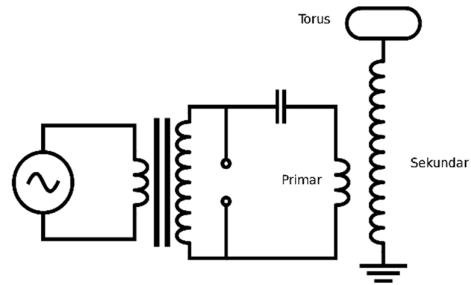
Primarni namotaj Teslinog Transformatora sastoji se od žice s relativno malim brojem namotaja, visokonaponskog električnog kondenzatora i iskrišta. Frekvencija titraja tirajnog strujnog kruga primara zavisi od električnog kapaciteta kondenzatora i induktiviteta zavojnice. Napon dobiven pomoću Teslinog transformatora iznosi od nekoliko stotina kV do nekoliko MV, gdje je frekvencija u rasponu od 50 KHz do 400 kHz.

Kolo za dobivanje ovakvih napona se sastoji iz tri međusobno povezane jedinice. Sekundarna zavojnica ima veliki broj namotaja od tanke žice. Zbog visokih frekvencija, zavojnice ne sadrže željeznu jezgru jer bi sa željeznom jezgrom gubitci energije bili veliki. Električni kondenzator se električki nabija do nekoliko kilovata napona pomoću izvora izmjenične struje.

Kada je kondenzator električki nabijen, strujni krug primara se zatvara preko iskrišta. Ova se kondenzator prazni i nastaje visokofrekventno titranje odnosno to je punjenje i pražnjenje kondenzatora kroz zavojnicu. Vrlo visoki napon u Teslinom transformatoru stvara snažne iskre svjetlosti ako se na vrh sekundarne zavojnice postavi metalni prsten.

Osnovni elementi Teslinog transformatora:

- Mrežni transformator,
- Primarni kondenzator,
- Varničar,
- Primarni kalem,
- Sekundarni kalem,
- Kapacitivni završetak.



Slika 1. Shema Teslinog transformatora,
izvor: http://www.bibliotecapleyades.net/imagenes_tesla/tesla17_03.gif, (03.01.2023.)

Posebno je potrebno paziti na izolaciju i zaštitu dijelova koji se nalaze pod visokim naponom na mrežnom transformatoru i na elektronskoj cijevi. Visoki naponi visoke frekvencije na zavojnici sekundara nije opasan po život, jer Tesline struje ne mogu izazvati elektrolitska razlaganja stanica u organizmu, zbog brzog mijenjanja svog smjera. One se samo rasprostiru po površini tijela. Naučno je dokazano da tesline struje imaju pozitivno fiziološko djelovanje. Na primjer, kada rukom dodirnemo takve struje tj. napone imamo osjećaj „peckanja“ topline što nije ugodno, međutim, ukoliko imamo neki metalni predmet u ruci to ne osjećamo.

2.2 Dimenzije Teslinog transformatora

Učink Teslinog transformatora zavisi od brojnih faktora kao što su gubici u komponentama, gubici u vezama, izbor parametara komponenata i uslovi u kojima sistem radi. Svi ovi faktori na svoj način utječu na dimenzije Teslinog transformatora:

- Induktivnost primarnog i sekundarnog namotaja. Dobiveni napon je direktno proporcionalan kvadratnom korijenu količnika induktivnosti sekundara i primara.
- Aktivni gubici u primarnom namotaju
- Aktivni gubici u sekundarnom namotaju
- Parazitne kapacitivnosti između namotaja sekundara

- Rastojanje između terminala na vrhu sekundara i primarnog namotaja
- Veličina terminala. Što je veći poluprečnik krivine terminala to uslovljava veći napon praga.

Veći Teslin transformator podrazumijeva manji prijenosni odnos, ali može da podnese veće potencijale terminala, a samim tim je pogodan za dobivanje većih napona. Potrebna snaga za postizanje zadovoljavajućeg učinka Teslinog transformatora nije linearno proporcionalno veličini sekundarnog namotaja, ta zavisnost je kvadratna. Na primjer, ako Teslin transformator čija je visina sekundara dva puta veća, zahtjeva četiri puta veću snagu.

2.3 Iskrište

Iskrište ima zadatak da zatvara rezonantno kolo Teslinog transformatora kako bi se pojačale oscilacije. Postoje dvije vrste iskrišta a to su obrtna i statička.

2.3.1 Obrtno iskrište

Obrtno iskrište se sastoji od nekoliko nepokretnih i pokretnih kontakata najčešće od mesinga. Obrtna iskrišta mogu biti jednostruka i višestruka. Kod višestrukih iskrišta, luk se dijeli na više kraćih lukova i time se smanjuje njihovo zagrijavanje. Zagrijavanje nepokretnih kontakata je i dalje veliko i potrebno im je osigurati dobro rashlađivanje.

Pokretni kontakti se pokreću pomoću elektromotora a izbor njihove brzine se vrši tako da se dobiju najbolje varnice. Trajanje varnice treba da bude dvije do tri vremenske konstante primarnog rezonantnog kola. Ako postoji duže trajanje to rezultira nepotrebnim opterećenjem mrežnog transformatora. Najbolji trenutak zatvaranja primarnog kola je kada je napon na kondenzatoru najveći. Sinhronizovani rad varničara sa mrežom dobiva se pogonom pokretnih kontakata sinhronim motorom. Broj pokretnih kontakata treba da bude

jednak broju polova sinhronog motora. Na primjer, za dvopolni motor treba da budu dva pokretna kontakta. Ploča sa nepokretnim kontaktom treba da ima mogućnost zaokretanja za ugao ($\sim 90^\circ$) električnih stepeni. Razmak između pokretnih kontakata treba da bude dovoljan da se luk ne razvlači previše. Razmak između pokretnih i nepokretnih kontakata treba da bude što manji, ali takav da se obezbjedi siguran prolaz pokretnih kontakata bez direktnog dodira.

2.3.2 Statičko iskrište

Statičko iskrište nema pokretnih dijelova. Ovo iskrište je pogodno kada se kondenzator puni iz strujnog izvora. To može biti tranzistorski DC/DC pretvarač. Može se također koristiti naponska kaskada kojom se lako dobiva napon na kondenzatoru do 20 kV. Primarni kondenzator se puni iz strujnog izvora i njegov napon raste određenom brzinom. Kada se dostigne napon proboja na iskrištu kondenzator se brzo počne prazniti kroz prigušene oscilacije primara. Napona primarnog kondenzatora brzo pada na nisku vrijednost i luk na iskrištu se ugasi. Inducirani impuls je jako snažan jer se sva stvorena električna energija trenutačno ispušta u strujni krug.

Kada dođe do probijanja napona praznina opet postaje izolator sve dok se kondenzator ponovo ne napuni i dok ne dođe do sljedećeg proboja. Ovaj proces se ponavlja više hiljada puta u jednoj sekundi.



Slika 1. Iskrište, izvor:

<https://www.fer.unizg.hr/images/50000705/image002.jpg>. (04.01.2023.)

2.4 Sekundarni namotaj Teslinog transformatora

Sekundarni namotaj je najosjetljiviji i najslabiji element Teslinog transformatora, kako za konstrukciju tako i za izradu. Sastoji se od izolacionog tijela na kojem je namotaj namotan i velikog broja namotaja žice. U većini slučajeva postavlja se vertikalno. Donji izvod namotaja je uzemljen a gornji se završava kapacitivnom elektrodom i na njoj se dobija visoki napon koji je ujedno izlazni napon Teslinog transformatora. Od ovog namotaja se očekuje da razvije što veći napon, pod uslovom da je namotan na tijelu od kvalitetnog izolacionog materijala. U praksi se kao izolacioni materijal najviše i najčešće koristi PVC. Zbog velike dužine žice od koje je namotan, kod sekundarnog namotaja dolazi do izražaja i raspodjeljenost parametara i ponaša se kao četvrt talasna antena. To znači da dužina žice treba da bude jednaka četvrtini talasne dužine rezonantnih oscilacija. Ako se uzme u obzir da brzina prostiranja električnog impulsa kroz namotaj jednaka brzini svjetlosti tada vrijedi izraz:

$$X_{cu} = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f_2}$$

gdje su:

X_{cu} – dužina žice

λ – talasna dužina

c – brzina svjetlosti

Ovo može biti jedan od parametara kome se teži pri konstrukciji sekundarnog namotaja. Ono što je potrebno odabrati jeste prečnik žice, broj namotaja, dužina i prečnik kalema i dimenzije kapacitivnog završetka sekundarnog kalema. Uslov je da se za izračunatu dužinu žice dobije odgovarajuća frekvencija.

Najvažnije električne karakteristike sekundarnog kalema su induktivnost,

kapacitivnost i aktivna otpornost, koje određuju rezonantnu otpornost. Kapacitivnost sekundarnog kalema sastoji se iz tri dijela. Prvi dio je kapacitivnost samog kalema, drugi dio je kapacitivnost gornje elektrode i treći je međuzavojna kapacitivnost.

Sekundarni namotaj Teslinog transformatora ima velike dimenzije i njegova sopstvena kapacitivnost prema okolini nije zanemarljiva.



Slika 2. Sekundarni kalem, izvor: autor

2.5 Strujni udar Teslinog transformatora

Napon teslinog transformatora ima visoku frekvenciju i njegova struja je bezopasna za čovjeka jer teče po površini tijela. Kada dođe do preskoka kroz vazduh kapacitet gornje elektrode se prazni i već u prvom impulsu oscilacije se prigušuju. Amplituda struja prvog udara je ograničena naponom i impedansom ljudskog tijela. Može se pretpostaviti da je impedansa ljudskog tijela 5 k Ω tako da pri naponu od 1MV struja u prvom trenutku dostiže vrijednost od oko 200 A. Kapacitivnost gornje elektrode je od nekoliko desetina pF, vremenska konstanta kola je nekoliko stotina nanosekundi pa je tog reda i trajanje prvog udara. Ukoliko se ovaj udar ponavlja sa nekom frekvencijom, onda se više ne može reći da je ova struja bezopasna za život čovjeka. Nakon

pražnjenja amplituda oscilacije se smanjuje na relativno nisku vrijednost.

Veličina ove struje zavisi od generatora i može da bude nekoliko ampera. Ovakva struja se zatvara preko površine tijela i nije opasna po čovjeka. Mnogo bolji efekat se dobiva u impulsnom radu Teslinog transformatora. Teslin transformator se napaja impulsno konstantnim visokofrekventnim naponom, gdje kada struja kalema raste i napon. Vrijeme trajanja ovog impulsa reguliše se dostignuti napon kalema. Pogodno je da se napajanje kalema vrši kada je mrežni napon u maksimumu.

Varnice ovakvog kalema su snažne i ponavljaju se nekoliko stotina puta u jednoj sekundi. Ovi udari u tijelo čovjeka su veoma jaki i nisu nimalo bezopasni kao što se misli. Ovi eksperimenti mogući su samo kod modela manjih snaga., gdje sama varnica može da izazove opekotine na koži. Ako se koristi varničenje na ovaj način u ruci je potrebno držati neki šiljati metalni predmet. Kod metalnih predmeta varnice se pojavljuju na nižim naponima pa je i električni udar slabiji.

Ono što je vrlo važno jeste da se u ruci ne treba držati metalni predmet koji završava kuglom. Kao jedno od reješenja radi pojačanja varnice početak sekundarnog namotaja se ne veže na zemlju već na jedan priključak primarnog namotaja. Tako se omogućava da napon mrežne frekvencije primarnog kola prodre u sekundarno kolo Teslinog transformatora.

Visokofrekventni napon Teslinog transformatora daje inicijalnu varnicu a prodor visokog napona iz primarnog kola pojačava njenu struju i produžava trajanje tako da se dobivaju veoma snažne varnice tj. električni luk. Treba naglasiti da su ovakva rješenja krajnje opasna po život čovjeka i zahtijevaju maksimalne mjere opreza i zaštite.



Slika 3. Strujni udar Teslinog transformatora, izvor: <https://i0.wp.com/fb.ru/misc/i/gallery/15322/438317.jpg>. (07.01.2023.)

2.6 Teslin oscilator

Elektromehanički oscilator izvorno je dizajniran kao izvor frekvencijski stabilne, izmjenične električne struje koja se koristi s bežičnim odašiljačkim i prijemnim uređajem. U teoriji dinamičkog sistema oscilator se naziva izokronim ako je frekvencija neovisna o njegovoj amplitudi. Elektromehanički uređaj radi istom brzinom bez obzira na promjene njegove pogonske sile i tako održava konstantnu frekvenciju. Jedna od glavnih karakteristika oscilatora je da može pomicati zavojnice s malim unosom energije. To je bilo zbog malog pomicanja klipa s opružnim efektom koji je proizveo klip koji je udario u zatvorenu komoru.

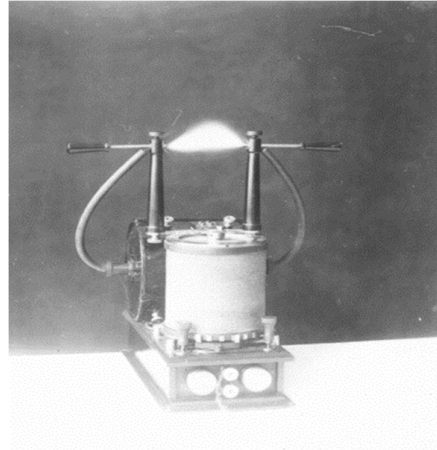
Zrak unutar komore se komprimira i djeluje kao opruga, i tako tjera klip da se pomjera u suprotnom smjeru. To se istovremeno događa, utro na klip se poravnava sa ulazom kako bi se omogućio rad visokog tlaka koji pokreće klip poput rakete prema drugom kraju gdje ponovo udara u „zračnu oprugu“. Dva elektromagneta su smještena s obje strane osovine. Osovina ima dva para zavojnica pričvršćena na oba kraja koju su s obje strane polja elektromagneta kada osovina miruje.

Kada se osovina lagano udari, zavojnice se tjeraju u elektromagnetsko polje. Kada jedna zavojnica uđe u elektromagnetsko polje, ona pokreće zavojnicu na suprotnoj

strani osovine proizvodeći oscilaciju u zavojnicama. Kako je vibracija izokrona, svaka promjena tlaka samo proizvodi skraćivanje ili produljenje hoda. Kako bi se izjednačio pritisak unutar kontrolne ploče i atmosfere napravljena su posebna mjerenja. Zbog toga su unutarnje komore upravljačke ploče raspoređene tako da komuniciraju s vanjskom atmosferom i tako bez obzira koliko temperatura zatvorenog zraka može varirati, još uvijek zadržava istu srednju gustoću kao i vanjska atmosfera, a time se dobiva opruga stalne krutosti. Tesla je istaknuo koji se uvjeti moraju poštovati kako period titranja električnog sistema ne bi poremetio mehaničko titranje na način da promjeni periodičnost, već samo da skрати hod.

On kombinira kondenzator sa samo indukcijom i daje električnom sistemu isti period kao onaj u kojem sam stroj oscilira, tako da se električna i mehanička rezonancija dobivaju i održavaju apsolutno nepromijenjenima. Tesla je snažno energizirao magnete i izveo mnoge zanimljive pokuse potvrđujući činjenicu da jedan od strujnih impulsa preovladava. Među tim pokusima bio je na svoj oscilator spojio prstenasti magnet s malim zračnim rasporom između polova. Taj magnet je oscilirao osamdeset puta u sekundi.

Kada je bakarni disk umetnut unutar zračnog raspora prstenastog magneta, doveden je u brzu rotaciju. Eksperiment je pokazao da su linije toka struje kroz metalnu masu poremećene prisutnošću magneta. Pričvršćivanjem malih izoliranih čeličnih šipki na magnet i spajanjem krajeva zavojnice dolazi do pokretanja te šipke. Kako je magnet vibrirao, u čeličnim šipkama su se stvorili nepomični čvorovi, a na tim tačkama su bili pričvršćeni termalni izvori istosmjernje struje.



Slika 4. Teslin oscilator, izvor:
<https://media.sciencephoto.com/c0/36/83/55/c0368355-800px-wm.jpg>, (09.01.2023.)

2.7 Rezonantna frekvencija

Rezonantna frekvencija je temelj za rad Teslinog transformatora. Rezonantna frekvencija titrajnog sistema je frekvencija pri kojoj amplituda titraja sistema doseže maksimum ili minimum. Mehanička rezonancija nastaje kada na mehanički sistem djeluju vanjske periodične sile kojima su frekvencije podudarne frekvencijama svojstvenim sistemu. Svojstvene frekvencije nekog mehaničkog sistema ovise o njegovoj masi, dimenzijama i unutarnjim silama naprežanja. Za elastičnu šipku dužine l , mase m , podvrgnutu silu naprežanja f , karakteristične frekvencije ν_n , i gdje je n cijeli broj vrijedi izraz:

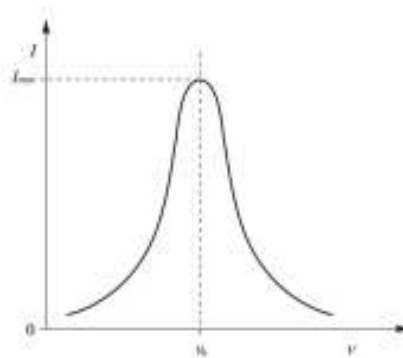
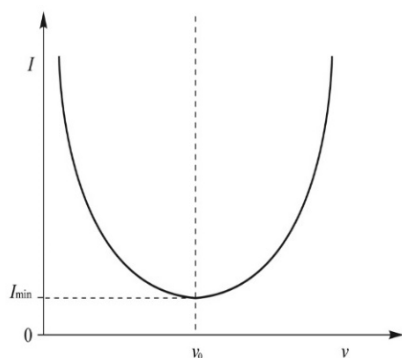
$$\nu_n = n \cdot \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{f \cdot l}{m}}$$

Mehanička rezonancija može izazvati neželjene posljedice u radu strojeva te njihovo oštećenje, pa se pri projektiranju nastoji izbjeći. Iz mehanike je pojam rezonancije proširen i u druga područja fizike, gdje označavaju niz analognih pojava kao što su električna, nuklearna, kvantnomehanička itd. Akustična rezonancija nastaje kada se titranjem pobudi zračnu stupac u određenom prostoru i u njemu stvore strujni valovi. Električna

rezonancija je pojava pri kojoj za određenu frekvenciju u električnom strujnom krugu izmjenične struje, koji se najčešće sastoji od električne zavojnice, električnog kondenzatora i omskog otpornika, dolazi do titranja s ekstremno velikom ili ekstremno malom amplitudom električne struje.

Električna rezonancija u elektrotehnici je temelj radiodetekcije. Promjenom kapaciteta kondenzatora ugađa se vlastita frekvencija prijemnika tako da se slaže sa frekvencijom odašiljača. Kvantnomehanička rezonancija je pojava koja nastaje kada energija pobuđivanja atomske jezgre, atoma, molekule ili skupine molekula odgovara razlici energija dvaju mogućih energetske stanja sistema.

Amplituda, koja u tom slučaju odgovara vrijednosti rezonantne frekvencije također su rezonantne frekvencije kruga. Na primjer, električna rezonancija u elektrotehnici je temelj radiodetekcije. Primjenom kapaciteta kondenzatora ugađa se vlastita frekvencija prijemnika tako da se slaže sa frekvencijom odašiljača.

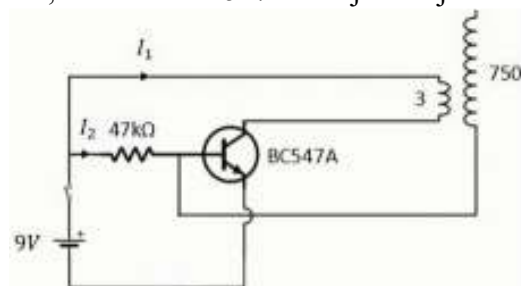


Slika 5. Promjena jačine električne struje promjenom frekvencije u paralelnom RLC oscilatoru,

izvor: https://www.enciklopedija.hr/Ilustracije/ezonancija_2.jpg, (09.01.2023.)

2.8 Pobuđivač napona

Pobuđivač napona je zračni transformator koji pojačava mizak DC napon do vrlo visokog AC napona. To stvara elektromagnetno polje oko zavojnice koje može osvijetliti fluorescentne sijalice. Njegova prednost je da sklop sam sebe postavi u rezonantnu frekvenciju i oscilira u odgovarajućem vremenu. Shema se sastoji od dva međusobno spojena titrajna kruga primarnog i sekundarnog namotaja. Strujni krug čine: baterija od 9V, otpornik od 47 k Ω , tranzistor BC547A i dvije zavojnice.



Slika 6. Pobuđivač napona, izvor:

<https://conrad.ba/image/gallery--1387808921-222347-2.jpg/320/320/w>, (09.01.2023.)

Struja koja dolazi s baterije se grana na dva dijela. Struja I_1 ide preko primarne zavojnice do kolektora tranzistora. BC547A je NPN tranzistor. Prama principu rada tranzistora, ako struja dolazi na bazu, tranzistor propušta struju od kolektora

prema emiteru. Struja I_2 preko otpornika dolazi na bazu tranzistora što uključuje tranzistor. Struja I_1 ide linijom manjeg otpora preko kolektora do emitera i zatvara strujni krug prema bateriji. Struja I_1 prelazi preko primarne zavojnice. Prolaskom struje kroz žice stvara se magnetno polje. To magnetno polje je povezano sa sekundarnom zavojnicom.

Elektromotorna sila se inducira u sekundarnoj zavojnici koja se opire uzroku svog nastanka. Jedna žica s sekundarne zavojnice je povezana s bazom tranzistora, i taj dio je negativnog potencijala. To znači da je baza negativnog potencijala i tranzistor se isključuje. Ako je baza tranzistora isključena, to znači da struja ne teče kroz primarnu zavojnicu i zbog toga se magnetno polje smanjuje. Magnetno polje je raslo od nule do maksimuma a zatim pada od maksimuma prema nuli. Kako magnetno polje pada od maksimuma prema nuli tako se zavojnica suprostavlja tome i zato se mijenja polaritet zavojnice. Tako je sada negativni potencijal na vrhu, a negativni na dnu zavojnice. Ova promjena se nekoliko puta ponavlja u jednoj sekundi.

ZAKLJUČAK

Transformatore različitih tipova nalazimo u skoro svakom električnom uređaju. Transformator omogućava prijenos električne energije dalekovodima od elektrana do korisnika. U eksperimentima i novim izumima koriste se uređaji koji u sebi sadrže transformator. Bez transformatora današnji život bi bio nezamisliv. Teslin transformator se danas koristi u edukativne svrhe.

Kola slična Teslinom transformatoru su korištena u radio-predajnicima sa iskrištem za bežičnu telegrafiju, sve do razvoja jačih predajnika sa električnim cijevima. U predajnicima sa iskrištem korištena su i druga električna kola, ali sva ta kola su koristila rezonantni princip koji je prvi Tesla uveo u radio-tehniku. Danas postoje

elektronski oscilatori, ali Teslin originalni dizajn sa iskrištem je vrlo pouzdan i otporan na vrlo visoke napone.

LITERATURA

1. Uppenborn, F.J. (1889). History of the Transformer. London: E. & F. N. Spon. Pp. 35-41.
2. Uglešić, Ivo; Miloradić Viktor: Izabrana poglavlja tehnike visokog napona, Fakultet elektrotehnike i računarstva – zavod za visoki napon i energetiku, Unska 3, Zagreb 2007
3. NIKOLA TESLA: ISTRAŽIVAC, IZUMITELJ I GENIJ, T. Rudež, V. Muljević, T. Petković, V. Paar, D. Androić, Školska knjiga, Zagreb 2006.
4. TEORETSKA ELEKTROTEHNIKA, I. Dio, T. Bosanac, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.
5. Nikola Tesla, Moji pronalasci, Školska knjiga Zagreb, 1981.
6. Christopher Gerekos, The TESLA coil, Universite Libre de Bruxelles, 2011-2012
7. Marco Denicolai: Tesla Transformer for Experimentation and Research, Espoossa 30 May 2001
8. W. Bernard Carlson, Tesla: izumitelj električnog doba, Planetologija, Zagreb, 2014.
9. Radojev V. (2003) Teslina lična biblioteka, Muzej Nikole Tesle, Beograd.
10. Matejčić R, Matejčić M. (1982) Ars Aesculapi, Prilozi za povjest kulture Rijeke i Hrvatskog primorja, Izdavački centar Rijeka, Rijeka.
11. Medicinska enciklopedija (1970) Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb.
12. Eric B. Wasatonic, COMPARSION OF TESLA COIL DRIVER TOPOLOGIES: ROTARY SPARK GAP VERSUS DOUBLE RESONANT SOLID STATE, THE PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY.

1 INTRODUCTION

A transformer is a device used in the daily transmission of electricity over long distances. In 1891, Nikola Tesla started working on a device that produces high voltage and frequency at the output. Tesla's transformer is still not in practical use. Tesla's transformer consists of an electric coil made of wire with few turns, a high-voltage electric capacitor and a spark gap. In the high voltage laboratory, tests are carried out on the ability of insulation of various equipment to withstand high voltages. In those laboratories, there are devices that produce high voltages of different waveforms, as well as devices for generating large-amplitude currents.

One of the most famous devices for obtaining high voltages of high frequency is the Tesla transformer. Like all transformers, the Tesla transformer has two separate circuits, i.e. primary and secondary. A high-voltage ceramic capacitor is added to the primary, which together with the inductor forms a resonant or LC circuit. There is also a gap in the circuit, i.e. spark. A capacitor stores energy in its electric field, while a coil stores energy in a magnetic field. By connecting the electrical source to the primary, a charge delivery system is obtained. The secondary part consists of a coil of wire and electrodes. These windings are located in the same part of the space occupied by the winding of the primary circuit. A changing magnetic field creates an electric current that moves charges along the secondary coil. As the magnetic field has high energy, which represents a high-voltage charge, which accumulates in the electrodes of the secondary coil and creates sparks, i.e. lightning. Most circuits must have a closed loop, however, the secondary of the Tesla transformer does not.

Tesla's transformer in its original form can produce a voltage between 10-12 million volts. This kind of voltage is enough to cause an electric discharge in the air up to

forty meters long. As the direction of electrons through the secondary winding is constantly changing, i.e. back and forth due to the oscillator circuit, the Tesla coil is a high-frequency device whose electrode charge changes from positive to negative and vice versa several million times per second. The fast charge change and the variable magnetic field make the Tesla transformer a powerful emitter of electromagnetic waves.

2 Transformer

The transformer consists of two coils with a common core made of ferromagnetic material, which is usually iron. The core serves to transfer the magnetic flux from one coil to another. The core is composed of a series of plates electrically isolated from each other to avoid eddy currents in the core. The transformer core passes through both coils and closes the full circuit. An ideal transformer is a transformer in which there is no dissipation of the magnetic flux, and there is also no loss in the core itself.

An alternating voltage is applied to the primary winding which causes an alternating current through that coil, and thus a changing magnetic flux which induces an electromagnetic force in the secondary. Faraday's law of induction is a basic law of electromagnetism that shows how a magnetic field behaves with an electric circuit and how it creates an electromagnetic force or electromagnetic induction. A mathematical proof was needed to supplement Faraday's law. Maxwell's equation, which describes the electromagnetic force in motion, took care of that proof. To make the complement quite complete, the Lorentz force shows the magnetic flux through the electric circuit and gives the direction of the induced electromotive force and the current from the electromagnetic induction.

2.1 Construction of the Tesla transformer

The primary winding of a Tesla Transformer consists of a wire with a relatively small number of turns, a high-voltage electrical capacitor and a spark gap. The oscillation frequency of the primary circuit depends on the electrical capacity of the capacitor and the inductance of the coil. The voltage obtained using the Tesla transformer is from several hundred kV to several MV, where the frequency is in the range from 50 KHz to 400 KHz. The circuit for obtaining such voltages consists of three interconnected units. The secondary coil has a large number of turns of thin wire. Due to the high frequencies, the coils do not contain an iron core because with an iron core the energy losses would be high. The electric capacitor is electrically charged to several kilowatts of voltage by means of an alternating current source. When the capacitor is electrically charged, the primary circuit is closed via the spark gap. This capacitor is discharged and a high-frequency oscillation occurs, that is, it is the charging and discharging of the capacitor through the coil. The very high voltage in a Tesla transformer creates strong sparks of light if a metal ring is placed on top of the secondary coil.

Basic elements of the Tesla transformer:

- Mains transformer
- Primary capacitor
- Sparkler
- Primary coil
- Secondary coil
- Capacitive termination

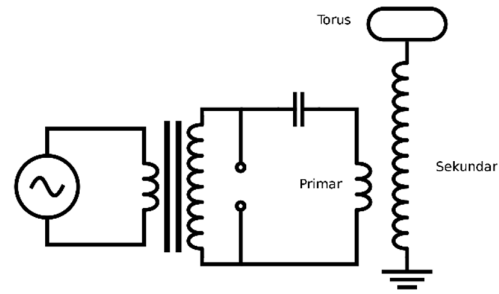


Figure 1. Diagram of the Tesla transformer

source:

http://www.bibliotecapleyades.net/imagenes/tesla/tesla17_03.gif (03.01.2023.)

It is especially necessary to pay attention to the insulation and protection of parts that are under high voltage on the mains transformer and on the electronic tube. High high-frequency voltages on the secondary coil are not life-threatening, because Tesla currents cannot cause electrolytic decomposition of cells in the body, due to the rapid change of direction. They just spread over the surface of the body. It has been scientifically proven that tesla current has a positive physiological effect. For example, when we touch such currents with our hands, i.e. voltages, we have a feeling of "tingling" heat, which is not pleasant, however, if we have a metal object in our hand, we do not feel it.

2.2 Dimensions of the Tesla transformer

The performance of the Tesla transformer depends on a number of factors such as component losses, connection losses, the choice of component parameters and the conditions in which the system operates. All these factors in their own way affect the dimensions of the Tesla transformer:

- Primary and secondary winding inductance. The resulting voltage is directly proportional to the square root of the inductance quotient of the secondary and primary.

- Active losses in the primary winding
- Active losses in the secondary winding
- Parasitic capacitances between secondary windings
- The distance between the terminal on the top of the secondary and the primary winding
- Terminal size. The larger the radius of the terminal bend, the higher the threshold voltage.

A larger Tesla transformer implies a smaller transmission ratio, but it can handle higher terminal potentials, and is therefore suitable for obtaining higher voltages. The power required to achieve satisfactory performance of the Tesla transformer is not linearly proportional to the size of the secondary winding, this dependence is square. For example, if a Tesla transformer whose secondary height is twice as high, it requires four times the power.

2.3 Spark

The spark has the task of closing the resonant circuit of the Tesla transformer in order to amplify the oscillations. There are two types of sparks, rotating and static.

2.3.1 Reverse spark

The rotating spark gap consists of several stationary and moving contacts, usually made of brass. Rotating sparks can be single or multiple. With multiple sparks, the arc is divided into several shorter arcs and thus their heating is reduced. The heating of stationary contacts is still high and they need to be provided with good cooling. The moving contacts are driven by an electric motor, and their speed is selected so that the best sparks are obtained. The duration of the spark should be two to three times the time constant of the primary resonant circuit. If there is a longer duration, it results in an unnecessary load on the mains transformer.

The best moment to close the primary circuit is when the voltage on the capacitor

is the highest. Synchronized operation of the spark gap with the network is obtained by driving the moving contacts with a synchronous motor. The number of moving contacts should be equal to the number of poles of the synchronous motor. For example, for a two-pole motor there should be two moving contacts. The plate with fixed contact should be able to rotate through an angle of (\pm) 90 electrical degrees.

The distance between the moving contacts should be sufficient so that the arc does not stretch too much. The distance between movable and immovable contacts should be as small as possible, but such as to ensure the safe passage of movable contacts without direct contact.

2.3.2 Static spark

A static spark has no moving parts. this spark is convenient when the capacitor is charged from a current source. It can be a transistor DC/DC converter. A voltage cascade can also be used, which easily obtains the voltage on the capacitor up to 20 kV. The primary capacitor is charged from a current source and its voltage rises at a certain rate. When the breakdown voltage at the spark gap is reached, the capacitor quickly starts to discharge through damped oscillations of the spark gap. The primary capacitor voltage quickly drops to a low value and the spark arc is extinguished. The induced pulse is very strong because all the generated electrical energy is instantly released into the circuit.

When the voltage breakdown occurs, the gap becomes an insulator again until the capacitor is charged again and the next breakdown occurs. This process is repeated thousands of times in one second.



Figure 2. Spark, source:
<https://www.fer.unizg.hr/images/50000705/image002.jpg> (04.01.2023.)

2.4 The secondary winding of the Tesla transformer

The secondary winding is the most sensitive and complex element of the Tesla transformer, both in terms of construction and manufacturing. It consists of an insulating body on which the coil is wound and a large number of wire coils. In most cases, it is placed vertically. The lower lead of the winding is grounded, and the upper one ends with a capacitive electrode, and a high voltage is obtained on it, which is also the output voltage of the Tesla transformer. This winding is expected to develop as high a voltage as possible, provided that it is wound on a body made of quality insulating material. In practice, the most and most often used insulation material is PVC. Due to the long length of the wire from which it is wound, the distribution of parameters comes to the fore with the secondary winding and behaves like a quarter-wave antenna. This means that the length of the wire should be equal to a quarter of the wavelength of the resonant oscillations. If it is taken into account that the propagation speed of the electric pulse through the coil is equal to the speed of light, then the expression applies:

$$X_{cu} = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f_2}$$

X_{cu} - wire length

λ – wavelength

c – speed of light

This can be one of the parameters to aim for in the construction of the secondary winding. What needs to be selected is the diameter of the wire, the number of turns, the length and diameter of the coil and the dimensions of the capacitive termination of the secondary coil. The condition is that for the calculated length of the wire, the appropriate frequency is obtained. The most important electrical characteristics of the secondary coil are inductance, capacitance and active resistance, which determine the resonant resistance.

The capacitance of the secondary coil consists of three parts. The first part is the capacitance of the coil itself, the second part is the capacitance of the upper electrode and the third is the inter-turn capacitance. The secondary winding of the Tesla transformer has large dimensions and its own capacitance to the environment is not negligible.



Figure 3. Secondary coil
Source: The author

2.5 Electric shock of the Tesla transformer

The voltage of the Tesla transformer has a high frequency and its current is harmless to humans because it flows on the surface of the body. When there is a jump through the air, the capacity of the upper electrode is

discharged and already in the first pulse the oscillations are dampened. The amplitude of the first shock currents is limited by the voltage and impedance of the human body. It can be assumed that the impedance of the human body is $5\text{ k}\Omega$, so that at a voltage of 1 MV , the current at the first moment reaches a value of about 200 A . The capacitance of the upper electrode is several tens of pF , the time constant of the circuit is several hundred nanoseconds, so the duration of the first hits. If this shock is repeated with a certain frequency, then it can no longer be said that this current is harmless to human life. After discharge, the oscillation amplitude decreases to a relatively low value. The size of this current depends on the generator and can be several amperes.

This type of current closes over the surface of the body and is not dangerous for humans. A much better effect is obtained in the impulse operation of the Tesla transformer. Tesla's transformer is supplied with pulsed constant high-frequency voltage, where when the current of the coil increases, so does the voltage. The duration of this pulse is regulated by the coil voltage reached. It is convenient to supply the coil when the mains voltage is at its maximum. The sparks of such a coil are strong and are repeated several hundred times in one second. These blows to the human body are very strong and are not at all harmless as one might think. These experiments are only possible with lower power models, where the spark itself can cause skin burns. If sparking is used in this way, it is necessary to hold a pointed metal object in the hand.

With metal objects, sparks appear at lower voltages, so the electric shock is weaker. What is very important is that you should not hold a metal object that ends in a ball. As one of the solutions to increase the spark, the beginning of the secondary winding is not connected to the ground but to one connection of the primary winding. This

allows the mains frequency voltage of the primary circuit to penetrate into the secondary circuit of the Tesla transformer. The high-frequency voltage of the Tesla transformer provides the initial spark, and the penetration of the high voltage from the primary circuit amplifies its current and extends its duration so that very strong sparks are obtained, i.e. electric arc. It should be emphasized that such solutions are extremely dangerous to human life and require maximum precautions and protection.



Figure 4. Electric shock of the Tesla transformer, source

<https://i0.wp.com/fb.ru/misc/i/gallery/15322/438317.jpg> (07.01.2023.)

2.6 Tesla oscillator

The electromechanical oscillator was originally designed as a source of frequency-stable, alternating electrical current for use with wireless transmitting and receiving devices. In dynamical system theory, an oscillator is called isochronous if its frequency is independent of its amplitude. An electromechanical device operates at the same speed regardless of changes in its driving force and thus maintains a constant frequency. One of the main characteristics of an oscillator is that it can move coils with little energy input. This was due to the slight movement of the piston with the spring effect produced by the piston striking the closed chamber. The air inside the chamber is compressed and acts as a spring, forcing the piston to move in the opposite direction. At the same time this happens, the groove in the piston aligns

with the inlet to allow high pressure operation which propels the piston like a rocket towards the other end where it hits the "air spring" again.

Two electromagnets are located on either side of the shaft. The shaft has two pairs of coils attached to either end which are on either side of the electromagnetic field when the shaft is at rest. When the shaft is lightly tapped, the coils are forced into the electromagnetic field. When one coil enters an electromagnetic field, it drives the coil on the opposite side of the shaft producing an oscillation in the coils. As the vibration is isochronous, any change in pressure only produces a shortening or lengthening of the stroke. In order to equalize the pressure inside the control panel and the atmosphere, special measurements were made. For this reason, the internal chambers of the control panel are arranged to communicate with the external atmosphere, and so no matter how much the temperature of the enclosed air may vary, it still maintains the same mean density as the external atmosphere, thus obtaining a spring of constant stiffness. Tesla pointed out which conditions must be respected so that the oscillation period of the electrical system would not disturb the mechanical oscillation in such a way as to change the periodicity, but only to shorten the stroke. It combines a condenser with mere induction and gives the electrical system the same period as that in which the machine itself oscillates, so that electrical and mechanical resonance is obtained and maintained absolutely unchanged. Tesla strongly energized the magnets and performed many interesting experiments confirming the fact that one of the current pulses prevails. Among these experiments, he had connected a ring magnet with a small air gap between the poles to his oscillator.

That magnet oscillated eighty times a second. When the copper disk is inserted inside the air gap of the ring magnet, it is brought into rapid rotation. The experiment showed that the lines of current flow

through the metal mass are disturbed by the presence of magnets. By attaching small insulated steel rods to a magnet and connecting the ends of the coil, that rod is set in motion. As the magnet vibrated, fixed knots were created in the steel rods, and direct current thermal sources were attached to these points.

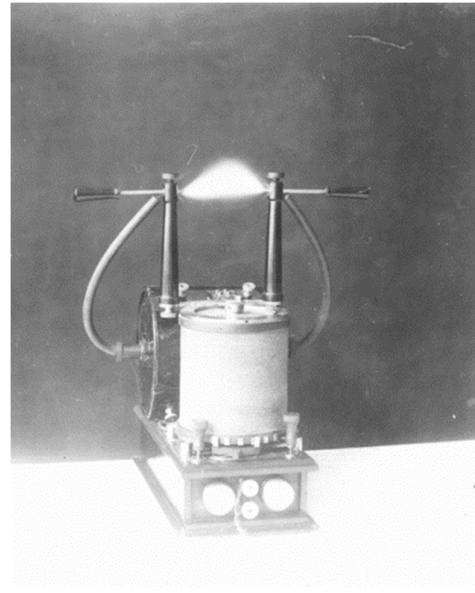


Figure 5. Tesla oscillator

Source:

<https://media.sciencephoto.com/c0/36/83/55/c0368355-800px-wm.jpg> (09.01.2023.)

2.7 Resonant frequency

The resonant frequency is the basis for the operation of the Tesla transformer. The resonant frequency of an oscillating system is the frequency at which the amplitude of the oscillating system reaches a maximum or a minimum. Mechanical resonance occurs when the mechanical system is acted upon by external periodic forces whose frequencies coincide with the system's own frequencies. The natural frequencies of a mechanical system depend on its mass, dimensions and internal stress forces. For an elastic rod of length l , mass m , subjected to stress force f , characteristic frequency ν_n , and where n is an integer, the expression applies:

$$v_n = n * \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{f * l}{m}}$$

Mechanical resonance can cause unwanted consequences in the operation of machines and their damage, so it is tried to be avoided during design. From mechanics, the concept of resonance has been extended to other areas of physics, where they denote a number of analogous phenomena such as electrical, nuclear, quantum mechanical, etc. Acoustic resonance occurs when the air column in a certain space is excited by vibration and current waves are created in it. Electric resonance is a phenomenon in which for a certain frequency in an electric current circuit of alternating current, which most often consists of an electric coil, an electric capacitor and an ohmic resistor, oscillation occurs with an extremely high or extremely low amplitude of the electric current.

Electrical resonance in electrical engineering is the basis of radio detection. By changing the capacitance of the capacitor, the receiver's own frequency is adjusted to match the transmitter's frequency. Quantum mechanical resonance is a phenomenon that occurs when the excitation energy of an atomic nucleus, atom, molecule or group of molecules corresponds to the energy difference of two possible energy states of the system.

The amplitude, which in that case corresponds to the resonant frequency value, is also the resonant frequency of the circuit. For example, electrical resonance in electrical engineering is the basis of radio detection. By applying the capacitance of the capacitor, the receiver's own frequency is adjusted to match the transmitter's frequency.

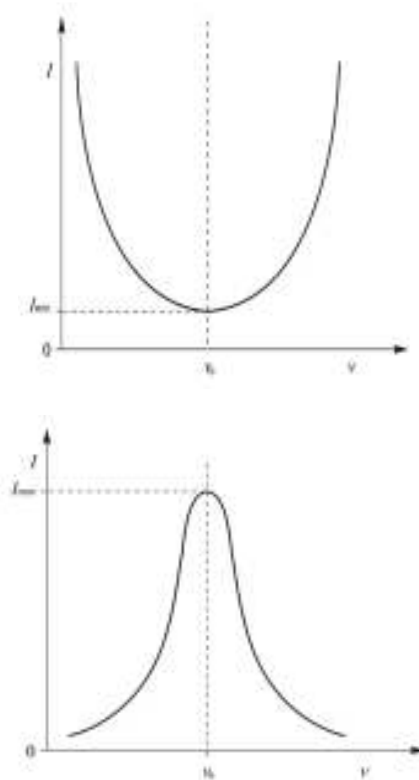


Figure 6. Change in the strength of the electric current by changing the frequency in a parallel RLC oscillator

Source:

https://www.enciklopedija.hr/Ilustracije/rezonancija_2.jpg (09.01.2023.)

2.8 Voltage Exciter

The voltage exciter is an air transformer that amplifies a low DC voltage to a very high AC voltage. This creates an electromagnetic field around the coil that can illuminate fluorescent bulbs. Its advantage is that the circuit sets itself in the resonant frequency and oscillates in the appropriate time. The scheme consists of two mutually connected oscillating circuits of the primary and secondary windings. The circuit consists of: a 9V battery, a 47 kΩ resistor, a BC547A transistor and two coils.

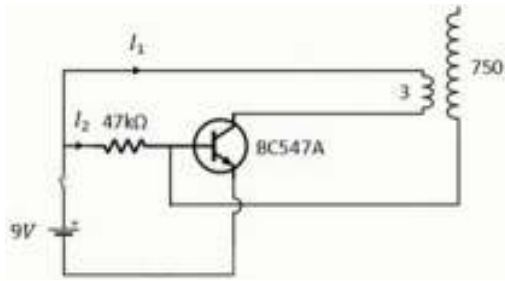


Figure 7. Voltage exciter, source:
<https://conrad.ba/image/gallery--1387808921-222347-2.jpg/320/320/w>

(09.01.2023.)

The current coming from the battery is divided into two parts. The current I_1 goes through the primary coil to the collector of the transistor. The BC547A is an NPN transistor. According to the principle of operation of the transistor, if the current comes to the base, the transistor passes the current from the collector to the emitter. The current I_2 through the resistor comes to the base of the transistor, which turns on the transistor. The current I_1 goes along the line of lower resistance through the collector to the emitter and closes the circuit to the battery. Current I_1 passes through the primary coil. The passage of current through the wires creates a magnetic field. That magnetic field is connected to the secondary coil. An electromotive force is induced in the secondary coil, which resists the cause of its origin.

One wire from the secondary coil is connected to the base of the transistor, and that part is at negative potential. This means that the base is at negative potential and the transistor turns off. If the base of the transistor is off, it means that no current is flowing through the primary coil and therefore the magnetic field is reduced. The magnetic field grew from zero to maximum and then fell from maximum to zero. As the magnetic field drops from maximum to zero, the coil opposes it and therefore the polarity of the coil changes. So now the negative potential is at the top and the negative at the bottom of the coil. This

change is repeated several times in one second.

CONCLUSION

Transformers of various types are found in almost every electrical device. The transformer enables the transmission of electricity through transmission lines from power plants to users. Experiments and new inventions use devices that contain a transformer. Without transformers, today's life would be unimaginable. Today, Tesla's transformer is used for educational purposes.

Circuits similar to Tesla's transformer were used in spark gap radio transmitters for wireless telegraphy, until the development of more powerful electric tube transmitters. Other electrical circuits were used in spark transmitters, but all of these circuits used the resonance principle first introduced by Tesla in radio engineering. There are electronic oscillators today, but Tesla's original spark plug design is very reliable and withstands very high voltages.

LITERATURE

1. Uppenborn, F.J. (1889). History of the Transformer. London: E. & F. N. Spon. Pp. 35-41.
2. Uglešić, Ivo; Miloradić Viktor: Izabrana poglavlja tehnike visokog napona, Fakultet elektrotehnike i računarstva – zavod za visoki napon i energetiku, Unska 3, Zagreb 2007
3. NIKOLA TESLA: ISTRAŽIVAC, IZUMITELJ I GENIJ, T. Rudež, V. Muljević, T. Petković, V. Paar, D. Androić, Školska knjiga, Zagreb 2006.
4. TEORETSKA ELEKTROTEHNIKA, I. Dio, T. Bosanac, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.
5. Nikola Tesla, Moji pronalasci, Školska knjiga Zagreb, 1981.
6. Christopher Gerekos, The TESLA coil, Universite Libre de Bruxelles, 2011-2012

7. Marco Denicolai: Tesla Transformer for Experimentation and Research, Espossa 30 May 2001
8. W. Bernard Carlson, Tesla: izumitelj električnog doba, Planetologija, Zagreb, 2014.
9. Radojev V. (2003) Teslina lična biblioteka, Muzej Nikole Tesle, Beograd.
10. Matejčić R, Matejčić M. (1982) Ars Aesculapi, Prilozi za povjest kulture Rijeke i Hrvatskog primorja, Izdavački centar Rijeka, Rijeka.
11. Medicinska enciklopedija (1970) Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb.
12. Eric B. Wasatonic, COMPARSION OF TESLA COIL DRIVER TOPOLOGIES: ROTARY SPARK GAP VERSUS DOUBLE RESONANT SOLID STATE, THE PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY.