

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: profesor fizike i informatike

Denis Gagić

Diplomski rad

**METODIČKO OBLIKOVANJE
KOMPLEKSNIH FIZIKALNIH OPAŽANJA
– TESLINA ZAVOJNICA**

Voditelj diplomskog rada: Doc. dr. sci. Darko Androić

Ocjena diplomskog rada: _____

- Povjerenstvo: 1. Doc. dr. sc. Darko Androić
2. Prof. dr. sc. Slobodan Brant
3. Dr. sc. Gorjana Jerbić - Zorc

Datum polaganja: 14.01.2010. godine

Zagreb, 2010.

SADRŽAJ:

Uvod	4
Nikola Tesla: genij ispred svog vremena	5
Teorijski dio	8
TRANSFORMATOR	8
ELEKTRIČNA STRUJA	10
ELEKTRIČNI POTENCIJAL (φ)	11
ELEKTRIČNI NAPON (U)	11
FREKVENCIJA	12
ELEKTROMAGNETSKI VALOVI	12
FLUORESCENCIJA	15
TESLINA ZAVOJNICA (<i>Teslin transformator</i>)	16
ELEKTRIČNO POLJE	20
SKIN EFEKT	22
ELEKTROMAGNETSKI VALOVI HEINRICHA HERTZA (<i>Hertzovi pokusi</i>)	24
PRIJENOS ENERGIJE ELEKTROMAGNETSKIM VALOVIMA	25
Metodički dio	27
NEHOMOGENO ELEKTRIČNO POLJE (<i>eksperiment teslinom zavojnicom</i>)	27
SKIN EFEKT(<i>eksperiment teslinom zavojnicom</i>)	29
ELEKTROMAGNETSKI VALOVI HEINRICHA HERTZA (<i>eksperiment teslinom zavojnicom</i>)	32
PRIJENOS ENERGIJE ELEKTROMAGNETSKIM VALOVIMA (<i>eksperiment teslinom zavojnicom</i>)	33
LITERATURA	35

Uvod

Fizika je jedna od prirodnih znanosti koju mnogi, još od osnovne škole, na sam spomen odbacuju i stvaraju barijeru koju ni ne pomišljaju prekoračiti. Upravo iz tog razloga potrebno ju je učiniti zanimljivom i atraktivnom kako bi učenici bili motivirani ući u taj zanimljiv svijet. Jer Fizika je nešto što nas okružuje, što nas prati kroz cijeli život svaki dan. Od kuhanja kave do odlaska na počinak u kasne noćne sate. Potrebno je dakle, osmisliti način na koji najlakše izazvati znatiželju i potaknuti kreativnost kod učenika.

Konvencionalne metode poučavanja fizike u osnovnim i srednjim školama sastoje se od nastavnih sadržaja za koje se zahtijeva da se usvajaju postupno te od jednostavnih demonstracijskih pokusa kojima se ti sadržaji mogu prikazati. Prilikom demonstracije nastoji se ogoliti sama bit fenomena i isključuje se svaka kompleksnost prirodne pojave kako bi se propisani sadržaji lakše naučili i usvojili. Ali prirodni fenomeni nisu uvijek jednostavni, jasni i transparentni te se vrlo često ne mogu povezati sa svakodnevnim iskustvom. Uz to postoji i pedagoško-psihološka razina usvajanja određenih znanja po kojoj student (učenik) teorijska znanja otkriva, potvrđuje i učvršćuje vizualnim prikazom određene prirodne pojave te je na kvalitetan način sprema u dugotrajnu memoriju. Izazivanjem efekta iznenađenja i radoznalosti omogućuje stvaranje jako dobrog temelja u učenju. Sve to može dati pozitivne rezultate i poticati na daljnji rad i napredak.

Cilj ovoga rada je prikazati kako metodički uklopiti Teslinu zavojnicu u nastavni proces i iskoristiti njenu vizualnu atraktivnost radi podizanja motivacije i lakšeg, vizualnog, usvajanja nekih prirodnih pojava i fizikalnih zakonitosti.

Nikola Tesla: genij ispred svog vremena

Nikola Tesla rođen je 10. srpnja 1856. godine u ličkom seocetu Smiljanu, u blizini Gospića. Sin je pravoslavnog svećenika (otac Milutin) i priproste, inteligentne žene (majka Georgina, zvana Đuka, rođ. Mandić) od koje je po njegovim riječima naslijedio izumiteljski dar. Često je nazivan sanjarom, ludim znanstvenikom, inicijatorom svjetskog bežičnog sustava, istraživačem koji je primao signale izvan zemaljskih civilizacija, čovjek koji je mogao raspoloviti Zemlju poput jabuke, tvorcem smrtonosnih zraka smrti koje djeluju na daljinu, itd.



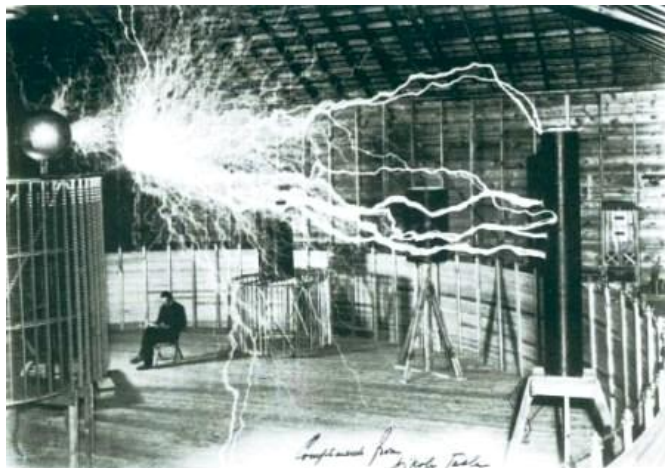
Nikola Tesla sa žaruljom koja je iznutra presvučena fosforom i svijetli bez da je prključena na strjni krug

Tesla je školovanje započeo u Smiljanu (1862.), a nakon toga (1863.) s obitelj seli u Gospić, gdje je završio osnovnu školu (1866.) i nižu realnu gimnaziju (1870.). Nakon teške bolesti iz koje se jedva izvukao nastavio je školovanje u višoj realnoj gimnaziji u Rakovcu kraj Karlovca (1870.). Potpomognut stipendijom Vojne krajine započinje studij na Politehničkoj školi u Grazu (1875.). Gubitkom stipendije (1879.) ostaje bez novaca te odlazi u Maribor, gdje se zapošljava i boravi kratko vrijeme kao pomoćnik nekog inženjera. Potom odlazi u Prag (1880.) na drugi tehnički studij.

U siječnju 1881. Tesla se zaposlio u mađarskoj upravi pošta u Budimpešti, gdje se iskazuje svojim prijedlozima i poboljšanjima (izumio je aparat za pojačavanje glasa u telefonu). Godine 1876. patentiran je telefon, a Budimpešta je bila četvrti grad u svijetu koji je dobio telefonsku centralu. Prilikom jedne šetnje 1882. Tesla je otkrio načelo okretnog magnetskog polja, što mu kasnije omogućava izradu prvih elektromotora izmjenične struje, a time i njezinu sveopću primjenu. U travnju 1882. godine odlazi sa prijateljem A. Szigetyem u tvrtku *Compagnie Continentale Edison de Paris* koja se bavila izgradnjom elektrana istosmjerne struje. U Strazburu, uz stalan posao gdje radi kao nalazač kvarova pri izgradnji elektrane, nalazi vremena i uz Szigetyevu pomoć uspijeva konstruirati svoj dvofazni indukcijski motor koji je počeo razvijati još u Parizu, te ga ponudio na otkup Edisonovom kontinentalnom društvu u Parizu. Godine 1884. prelazi u Edisonovu kompaniju u SAD gdje je se bavio pregrađivanjem različitih istosmjernim strojeva. Nezadovoljan plaćom i razmiricama sa svestranim izumiteljem Thomasom Alva

Edisonom u pogledu izmjeničnih strojeva odlazi te osniva tvrtku za proizvodnju opreme za lučnu rasvjetu (*Tesla Electric Light and Manufacturing Company*). Zbog potrebe za većom slobodom pri realizaciji svojih ideja sa višefaznih motora Tesla napušta kompaniju koja ionako propada zbog velike gospodarske krize u Americi. U travnju 1887. godine osniva *Tesla Electric Company* gdje i konstruira nekoliko višefaznih motora. Na zahtjev financijera Teslinog projekta pozvan je poznati stručnjak William A. Anthony, profesor na Cornell University koji potvrđuje konkurentnost Teslinih dvofaznih i trofaznih motora s okretnim poljem nasuprot istosmjernim strojevima u pogledu stupnja korisnosti. Konstruirao je nekoliko motora i generatora izmjenične struje te razvio sustav prijenosa i razdiobe izmjenične struje, koji se održao do danas i koristi se u svakodnevne svrhe. Njegove patente otkupio je industrijalac George Westinghouse te s navedenim Teslinim projektima, ispred Edisona, pobjeđuje na natječaju za izradu sustava osvjetljenja na EXPO-u u Chicagu (1893.), prvom svjetskom sajmu elektrike u povijesti. Iste godine povjerena im je izgradnja najsuvremenije i najveće hidrocentrale tog vremena na slapovima Nijagare. Bila je to i konačna pobjeda Teslinog sustava izmjenične struje.

Tesla se do siječnja 1943. godine u svom laboratoriju u New Yorku bavio razvojem bežičnog sustava prijenosa energije na daljinu gdje je i izumio generator struje visokih frekvencija (Teslina zavojnica) kao i ostale genijalne izume koji danas služe kao temelj radiotehnike, radarske tehnike, elektrotehnike te elektromedicine.



Izboj električnog oscilatora pri naponu 12 milijuna volta i 100 000 oscilacija u sekundi. Izboji su dugi i do 20 metara

U svom visokonaponskom laboratoriju u Colorado Springsu izgrađenom 1899. godine postigao je napon od 12 milijuna volti te proučavao munje i eksperimentirao bežičnim vezama. Bavio se prenošenjem obavijesti i energije na daljinu te je bez vodiča prenio signale do New Yorka, upalio 200 žarulja udaljenih 40 kilometara i postigao prve munje duže od 40m. U nerednom periodu

svoga života posvetio se i proučavanjima mehanike tekućina i izumio turbinu bez lopatica, mjerač protoka, mjerač i pokazivač brzine te se bavio njihovim usavršavanjem. Godine 1918. patentirao je gromobran, a kasnije letjelicu s okomitim uzlijetanjem. Neki od izuma morali su

pričekati budućnost kako bi prešli u praktičnu primjenu (radarski sustav, prijenos podataka i slika na daljinu i dr.). Zbog požara koji mu je posve uništio laboratorij (1895.) Tesla je imao problema u priznavanju prvenstva u otkriću elektrona, X-zraka i radija za koje su J. J. Thompson (za otkriće elektrona), W. Röntgen (za X-zrake), a G. Marconi (za radio) dobili Nobelove nagrade. Godine 1912. je odbio primiti Nobelovu nagradu iz fizike jer je tvrdio da Edison, s kojim je trebao primiti nagradu, nije pravi znanstvenik. Sam i siromašan, umro je 7. siječnja 1943. godine u hotelu New Yorker.

Teslin inženjerski duh dokazan je u jedinstvenom eksperimentalnom zanosu tijekom njegova cijelog života, s dominantnom orijentacijom na izume u fizici i elektrotehnici koje bi nakon pouzdanog otkrića trebalo teorijski obrađivati. Bio je genijalan izumitelj, vrlo predan svome radu. Jedan od najistaknutijih umova svijeta koji je zacrtao putove brojim tehnološkim razvojem modernog doba.

Patentirao je 99 svojih izuma u patentnom uredu SAD-a. Njegovi patenti mogli bi se razvrstati u osam skupina. Od *Motora i generatora* (36 patenata), *Transformacija električne snage* (9 patenata), *Rasvjete* (6 patenata) do *Visokofrekventnih uređaja i regulatora* (17 patenata), *Radija* (12 patenata), *Telemehanike* (1 patent), *Turbina i sličnih naprava* (7 patenata) i još *Par različitih izuma* (11 patenata).

U Hrvatskoj je godina 2006. proglašena Godinom Nikole Tesle, s ciljevima suvremenog reaffirmiranja Teslinih izuma u fizici i genijalnih istraživanja u elektrotehnici te potpunog osvjetljenja mjesta i uloge sveukupnoga djela Nikole Tesle u svjetskoj znanosti i kulturi modernoga doba. Formalno uporište za proslavu Tesline godine u Hrvatskoj bila je 150. obljetnica njegova rođenja. Godinu Nikole Tesle (2006.) proglasio je i UNESCO, u čast 150. obljetnici rođenja toga genija moderne elektrotehnike i fizike.

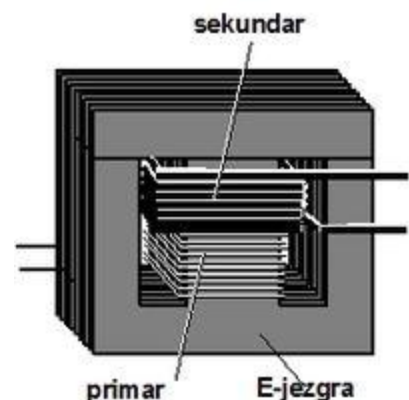
Teorijski dio

TRANSFORMATOR je električni uređaj u kojem se električna energija iz jednog ili više izmjeničnih krugova koji napajaju primarne namote transformatora prenosi u jedan ili više izmjeničnih krugova napajanih iz sekundarnih namota transformatora s izmijenjenim iznosima jakosti struje i napona, te nepromijenjenom frekvencijom.

Budući da snaga električne struje zavisi od umnoška $U * I$, podizanjem napona moguće je prenijeti istu snagu s manjim jakostima struje. Struja manje jakosti omogućuje smanjenje presjeka vodiča (tj. manji utrošak bakra ili aluminijske) i uzrokuje manje padove napona na dugačkim vodovima, jer je pad napona proporcionalan jakosti struje kroz vodič. Zbog toga, u elektranama se električna energija isporučuje na vrlo visokom naponu od nekoliko desetaka ili stotina kV (kilovolta), te visokonaponskim dalekovodima prenosi do mjesta potrošnje. Jednako je važna primjena transformatora za pretvorbu napona gradske mreže u manje opasan napon između 12 i 48 V za razne radioničke, upravljačke ili druge uređaje, (u pravilu s galvanski odvojenim sekundarom od primara), ili u mnogobrojnim elektroničkim uređajima koji rade na istosmjernom naponu od nekoliko volti

Rad transformatora zasniva se na Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije prema kojem vremenska promjena magnetskog toka ulančanog vodljivom petljom inducira u petlji napon, dok struja uzrokovana tim naponom stvara magnetski tok koji se, u skladu s Lorenzovim zakonom, opire promjeni toka koji je inducirao napon.

Jednostavnije rečeno, izmjenična struja **primara** koja tokom vremena jakost mijenja po sinusoidi, u željeznoj jezgri transformatora proizvodi isto tako promjenjiv magnetski tok. Umetne li se u tako stvoreno promjenjivo magnetsko polje u okolici jezgre drugi namotaj (**sekundar**), u njemu će se po pravilima elektromagnetske indukcije pobuditi također sinusoidalni izmjenični napon. Zbog pojave samoindukcije, posljedično induciranoj struji sekundara, opirat će se **induktivni otpor** namotaja.



Kod idealnog transformatora su odnosi napona u namotima primara i sekundara proporcionalni, a odnosi jakosti struja obrnuto proporcionalni omjeru broja navoja. Ako na primjer sekundarni namotaj ima

deset puta više navoja od primarnog namota, napon sekundara bit će deset puta viši, a jakost struje deset puta manja nego u primaru. Matematički se ovaj odnos može iskazati izrazom:

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad \text{iz čega slijedi: } U_s = U_p \frac{N_s}{N_p}$$

U svim izrazima, indeks p odnosi se na primar, a s na sekundar.

Transformator može imati i više sekundarnih namota, koji mogu biti galvanski odvojeni a mogu biti realizirani i tako da jedan sekundarni namot ima više izvoda. Zbroj svih snaga na sekundarnoj strani u idealnom transformatoru jednak je električnoj snazi koju transformator troši iz izvora električne energije (npr. iz gradske mreže).

Iz jednakosti snaga primara i sekundara $P_s = P_p$ ili $U_s \cdot I_s = U_p \cdot I_p$ slijedi:

$$I_s = I_p \frac{U_p}{U_s}$$

Stvarne izvedbe transformatora karakteriziraju međutim gubici, koje čini energija potrebna za magnetiziranje feromagnetske (ili druge) jezgre, gubici zbog vrtložnih struja, gubici u bakru (omski gubici u žicama od kojih su namotani namoti), itd. Zbog tih gubitaka je korisna snaga sekundara nerijetko i nekoliko desetaka posto manja od utrošene snage primara.

Gubici uslijed vrtložnih struja u željeznoj jezgri smanjuju se pakiranjem jezgre iz međusobno (lakom ili papirom) izoliranih *transformatorskih limova* posebnog sastava (s dodatkom silicija) od feromagnetskog materijala koji imaju dobru magnetsku provodljivost i osiguravaju dobru magnetsku spregu između namota. Transformatori za vrlo visoke frekvencije gdje bi gubitci snage u jezgri bili veći od gubitaka u namotima uzrokovanih slabom spregom imaju jezgre od posebnih keramičkih materijala (feriti) ili sinterovane željezne prašina u izolirajućoj masi.

Kod malih transformatora, namoti se motaju žicom koja je izolirana lakom (tzv. "*lak-žica*"), dok se kod velikih transformatora koriste i druge vrste izolacija.

Elektromagnetska indukcija (Faradayev zakon) je pojava da se u vodiču koji u magnetskom polju siječe magnetske silnice okomito na smjer magnetskog polja inducira napon. Taj inducirani napon je to jači, što je promjena magnetskog toka u okolici vodiča brža.

Elektromagnetska indukcija ovisi o magnetskom toku koji protječe kroz površinu S koja se nalazi pod kutom α u odnosu na homogeno magnetsko polje :

$$\Phi = BS \sin \alpha$$

Inducirani napon razmjeran je veličini promjene magnetskog toka $\Delta\Phi$ u jedinici vremena

$$U = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Samoindukcija nastaje u zavojnici zbog promjene njezinog vlastitog magnetskog polja pri promjeni jakosti struje kroz zavojnicu.

Kada zavojnicom teče električna struja, unutar zavojnice stvara se magnetsko polje koje je proporcionalno jakosti struje I . Znači, ako se mijenja jakost struje kroz zavojnicu, mijenja se i magnetsko polje unutar zavojnice, pa se time mijenja i magnetski tok kroz zavojnicu. Ta promjena magnetskog toka uzrokuje pojavu inducirano napona u zavojnici, čiji je smjer takav da djeluje suprotno promjeni struje koje ga je uzrokovala (Lentzovo pravilo).

$$U = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

ELEKTRIČNA STRUJA je gibanje naboja u materiji ili slobodnom prostoru. U metalnim vodičima to je gibanje slobodnih elektrona (od mjesta s viškom elektrona do mjesta s manjkom elektrona), u poluvodičima je to gibanje elektrona i šupljina, a u elektrolitskim otopinama gibaju se negativni i pozitivni ioni. Razlikujemo istosmjernu struju, koja ima u vremenu konstantnu jakost i trajno jedan te isti smjer, te izmjeničnu, kod koje su jakost i smjer promjenjive veličine u vremenu.

Jakost električne struje (I) jednaka je količini naboja Q koja prođe kroz poprečni presjek vodiča u vremenskom intervalu t :

$$I = \frac{Q}{t}$$

Za čovjeka je opasna električna struja jača od 20 mA, pri čemu se u dodiru električne struje i čovjekovog tijela javlja toplinsko (opekotine), mehaničko (na mjestima ulaska i izlaska struje dolazi do razaranja tkiva), kemijsko (rastavlja krvnu plazmu), biološko djelovanje (stezanje mišića, paraliza srca i pluća). Električna struja najviše djeluje na ulazu i izlazu struje iz tijela gdje dolazi do najvećih opekotina i razaranja tkiva.

ELEKTRIČNI POTENCIJAL (φ) - svaka točka električnog polja ima potencijal s obzirom na Zemlju. Potencijal φ neke točke definira se omjerom rada W i naboja Q koji treba sa Zemlje dovesti u tu točku :

$$\varphi = \frac{W}{Q}$$

SI-jedinica za električni potencijal je volt (znak V).

Poznajemo li potencijale različitih točaka električnog polja, možemo naći veličine potencijalne energije naboja Q smještenih u tim točkama prema:

$$E_p = W = Q \cdot \varphi$$

ELEKTRIČNI NAPON (U) je fizikalna veličina jednaka razlici električnog potencijala:

$$U = \Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$$

Električni potencijal jest skalarna veličina koja predstavlja gradijent (promjenu u prostoru) električnog polja.

Napon pokazuje koliki je rad (W) potreban da se električni naboj (Q) premjesti između dvije točke u električnom polju:

$$U = \frac{W}{Q}$$

Dio elektromotorne sile (EMS) koji djeluje u nekom dijelu strujnog kruga zovemo električni napon.

FREKVENCIJA je fizikalna veličina kojom se izražava broj titraja u određenom vremenskom intervalu. Alternativna metoda određivanja frekvencije je mjerenje vremena između dva uzastopna ponavljanja događaja (period) iz čega se frekvencija izračunava kao recipročna vrijednost tog vremena:

$$f = \frac{1}{T}$$

gdje je T period.

ELEKTROMAGNETSKI VALOVI

Svako se tijelo sastoji od atoma. Pri zagrijavanju nekog tijela, u njega se ulaže energija i atomi počinju titrati jer im se energija povećava (prelaze u pobuđena stanja). Jezgre atoma nose električne naboje te pri titranju atoma zapravo dolazi do titranja naboja. U prostoru oko električnog naboja uvijek postoji električno polje, a ako se naboj giba postoji i magnetsko polje. Tako dobivamo da naboj koji titra predstavlja izvor *elektromagnetskog vala*.

Sredinom 19. stoljeća veliki izazov bio je poznat kao svjetlost, magnetizam i elektricitet. Stoljeća ranije Thomas Young je izmjerio valnu duljinu svjetlosti, William Gilbert je otkrio polaritet magneta i brojni istraživači su eksperimentirali s novim otkrićem – elektricitetom. Maxwell je, 1865. godine, napravio teoretski opis elektromagnetskih valova, ali se nije znalo kako ih proizvesti, iako je prema Maxwellu to trebalo biti moguće postići titranjem električne struje.

Prije je već bila određena frekvencija svjetlosti. Prema Maxwelllovoj teoriji, svjetlost bi se morala primijetiti pri frekvenciji elektromagnetskih valova, koju bi proizvodio titrajni krug, jednakoj frekvenciji svjetlosti. Ta tvrdnja bila je točna samo što tada nisu imali tako kvalitetnu opremu koja bi im omogućila proizvodnju valova frekvencija većih od 1 GHz, što je puno manje od frekvencije svjetlosti. Tek kasnije,

nakon dvadeset godina Heinrich Hertz je uspio pokusom pokazati povezanost elektromagnetnih valova sa svjetlošću. Taj eksperiment puno je pomogao u razumijevanju elektromagnetskog spektra, i dokazao da se valovi mogu stvoriti i širiti kroz prostor.

Maxwellove jednadžbe

Najuniverzalniji oblik Maxwellovih jednadžbi je onaj koji opisuju elektromagnetske fenomene u vakuumu, a u diferencijalnom obliku glasi:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Gdje je:

ρ - gustoća električnog naboja, količina električnog naboja po jedinici volumena

\mathbf{J} - gustoća električne struje, tok el. naboja po jedinici površine u jedinici vremena

ϵ_0 - dielektrična konstanta vakuuma

μ_0 - permitivnost vakuuma, a jednaka je:

$$\mu_0 = \frac{1}{c^2 \epsilon_0}$$

gdje je c brzina svjetlosti.

Maxwell je u svojim jednadžbama elektromagnetne valove objasnio jednadžbama za električna i magnetska polja. Prema njima uzroci elektromagnetskih valova su:

- promjenljivo magnetsko polje B stvara promjenljivo električno polje E
- promjenljivo električno polje E stvara promjenljivo magnetsko polje B

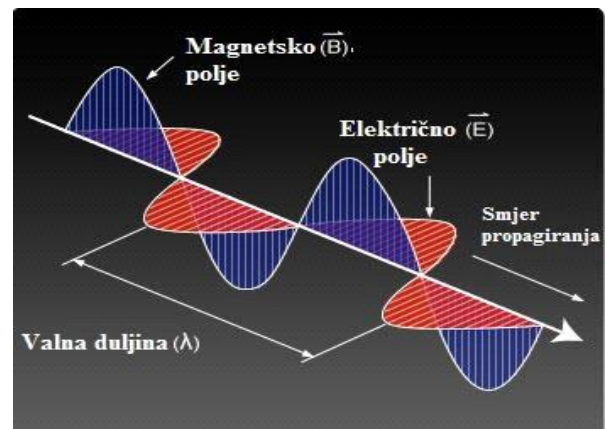
Na taj način iz Maxwellovih jednadžbi slijedi niz uzajamnih promjena električnih polja koji se prostiru prostorom kao elektromagnetni valovi. Ta električna i magnetska polja mogu se slobodno širiti prostorom u obliku elektromagnetskih valova koji se mogu odvojiti od električnih naboja i struja. Oni postoje i nakon uklanjanja njihovog izvora. Polja su tada samostalna i mogu postojati i širiti se bez postojanja električnih naboja i struja.

Svojstva elektromagnetskih valova

Četiri važnih svojstva elektromagnetskih valova:

1. Za razliku od ostalih valova koji se šire nekim sredstvom, elektromagnetski se valovi mogu širiti vakuumom.
2. Titrajuća električna i magnetska polja u linearno polariziranom elektromagnetskom valu su u fazi.
3. Smjerovi električnoga i magnetnog polja u elektromagnetskom valu okomiti su jedan na drugi i oba su okomita na smjer širenja vala, što ih čini transverzalnim valovima.
4. Brzina elektromagnetskih valova ovisi samo o električnim i magnetnim svojstvima medija kojim se šire, a ne ovise o amplitudi elektromagnetskog polja.

Za razliku od većine ostalih valova, za širenje elektromagnetskih valova nije potreban medij (npr. zrak, voda, valovod i sl.). Na putu kojem se elektromagnetski valovi šire ne trebaju titrati čestice nekog medija, nego pri širenju elektromagnetskog vala titraju električna i magnetska polja koja su međusobno okomita (slika 1).



Slika 1

Elektromagnetski valovi produkt su električnih naboja koji se gibaju akcelerirano. Ako električni naboj titra, emitira se kontinuirani elektromagnetski val, a ako ima samo kratkotrajnu akceleraciju, tada se emitira pulsni elektromagnetski val.

FLUORESCENCIJA je pojava kod koje tvar izložena elektromagnetskom zračenju emitira elektromagnetsko zračenje manje valne duljine od onog kojim je izložena. Poput ostalih vrsta luminiscencije, fluorescenciju pokazuju samo određeni materijali.

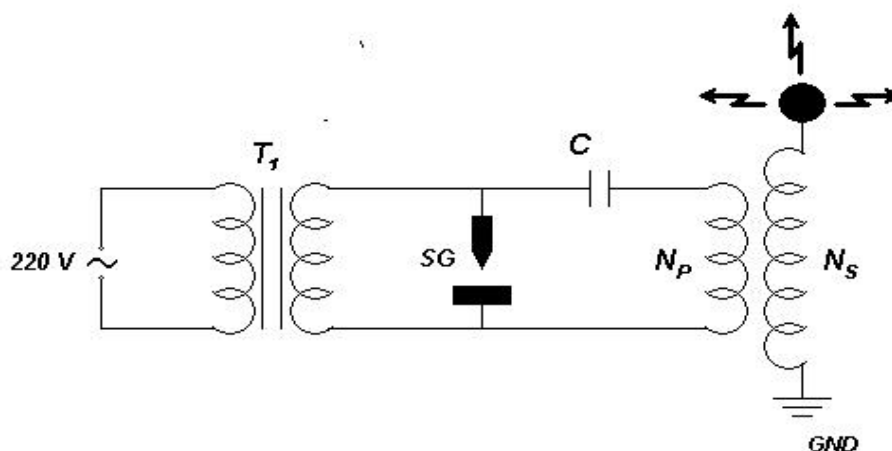


Fluorescencija se koristi u fluorescentnim žaruljama, cijevima sa integriranom elektroničkom pred spojnom napravom i E27 podnožjem je štedna žarulja (vidi sliku).

Unutrašnjost fluorescentne žarulje je ispunjen plinom pod niskim tlakom, kojem se elektrodama dovodi električna energija. Plin svijetli, uglavnom emitirajući ultraljubičasto zračenje. Tvar koja je nanosena na stjenke fluorescentne žarulje apsorbira ultraljubičasto zračenje i procesom fluorescencije emitira vidljivo zračenje niže valne duljine. Na taj način fluorescentne žarulje većinu emitiranog zračenja emitiraju u vidljivom području.

TESLINA ZAVOJNICA (Teslin transformator)

Teslin transformator (slika 2) je uređaj kojim se preko elektromagnetske indukcije proizvode visoki naponi vrlo velikih frekvencija. Način rada i transformacije energije sličan je kao i kod običnog transformatora.



Slika 2: Jednostavna shema teslinog transformatora

Primarni namot N_p ujedno je sastavni dio titrajnog kruga koji osim zavojnice sadržava kondenzator C i iskrište SG (*spark gap*), a energiju može primiti od visokonaponskog transformatora T_1 .

Kondenzator se prazni preko iskrišta kroz primarnu zavojnicu, uslijed čega dolazi do stvaranja visokofrekventnog magnetskog polja koje uzrokuje indukciju u sekundarnoj zavojnici. Da bi inducirani napon bio velik, sekundarna zavojnica ima vrlo velik broj zavoja N_s , a smještena je unutar primara kako bi prijenos energije bio što bolji.

Teslin transformator nema željezne jezgre jer bi s njom, zbog visokih frekvencija, gubici energije bili jako veliki. Primarni i sekundarni krug podešeni su tako da budu u rezonanciji. Da bi se postignula rezonancija, sekundar mora imati mali kapacitet. Visoki inducirani naponi u Teslinu transformatoru uzrokuju stvaranje snažnih iskri koje izbijaju iz sekundara, a mogu biti popraćene čitavim nizom drugih efekata.

Zbog jakog elektromagnetskog polja u blizini sekundara u Geisslerovim cijevima javlja se luminiscencija, iako one nisu vodičima povezane sa sekundarom.

Kondenzator

Koristio sam MMC (Multi Mini Capacitor) spoj ukupnog kapaciteta $C = 1nF$ sastavljen od 4 pločastih kondenzatora pojedinačnog kapaciteta $C = 1nF$.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}$$

ε_0 - dielektričnost praznine (vakuuma): $8,854 \cdot 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2}$

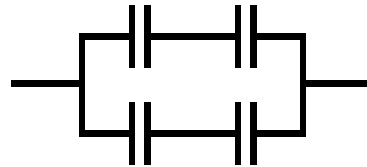
ε_r - relativna dielektrična konstanta za PVC: 4,6

S – površina ploča: $0,029 m^2$

d – udaljenost između dvije ploče (debljina dielektrika): 1 mm

Kapacitet serijskog spoja kondenzatora :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$



Kapacitet paralelnog spoja kondenzatora :

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots = \sum_{i=1}^n C_i$$

Kapacitet kugle

U obzir se mora uzeti i kapacitet C_s kugle polumjera R na sekundaru. $C_s = 2,78 pF$

$$C_s = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r R$$

R – polumjer kugle : 2,5 cm

Zavojnice

- primar: Induktivitet primarne zavojnice $L_p = 7,3 \mu H$

$$L = \mu_r \mu_0 \frac{N^2 S}{l}$$

μ_0 - permeabilnost praznine (vakuuma): $4\pi \cdot 10^{-7} TmA^{-1}$

μ_r - relativna permeabilnost zraka : 1

N – broj zavoja: 10

S – površina presjeka zavojnice: $78,54 \text{ cm}^2$

l – visina zavojnice: 13cm

- sekundar: Induktivitet sekundarne zavojnice $L_s = 3,2 \text{ mH}$

$$L = \mu_r \mu_0 \frac{N^2 S}{l}$$

μ_0 - permeabilnost praznine (vakuuma): $4\pi \cdot 10^{-7} TmA^{-1}$

μ_r - relativna permeabilnost zraka : 1

N – broj zavoja: 600

S – površina presjeka zavojnice: $12,76 \text{ cm}^2$

l – visina zavojnice: 18cm

Rezonantna frekvencija

Da bi između primarnog i sekundarnog strujnog kruga postojao maksimalan prijenos električne energije, potrebno je da su frekvencije primarnog (primarna zavojnica i kondenzator C) i sekundarnog (sekundarna zavojnica i kapacitet sfere C_s) strujnog kruga u rezonanciji (da su jednake).

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Rezonantna frekvencija primara: $f_r = 1,680$ MHz

Rezonantna frekvencija sekundara: $f_r = 1,687$ MHz

ELEKTRIČNO POLJE

Električno polje definirano je kao svojstvo prostora oko čestice koja posjeduje električni naboj. Električno polje je ujedno i prostor u kojem djeluje električna sila. Za silu je karakteristično da je, između ploča kondenzatora, na svakom mjestu jednaka. Takva polja nazivaju se *homogena električna polja*. *Nehomogena električna polja* imaju svojstvo da se sila prostorno mijenja od točke do točke.

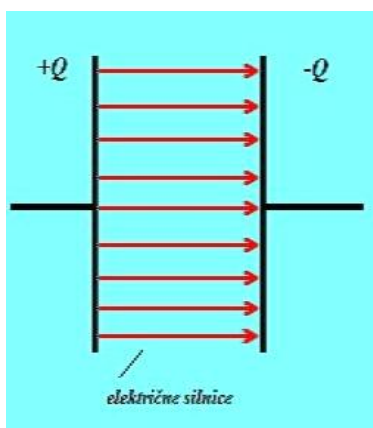
Električno se polje, prema Faradayu, predočava pomoću *silnica polja*. To su zamišljene linije koje svojim prolaskom daju točan podatak o vektoru jakosti polja u svakoj točki homogenog ili nehomogenog polja.

Navedeno vrijedi ako su silnice crtane tako da je njihova gustoća u svakoj točki polja proporcionalna veličini vektora i da im se smjerovi poklapaju.

Dogovorno je uzeto da je smjer vektora jednak smjeru sile na pozitivan pokusni naboj Q' .

Homogeno električno polje pločastog kondenzatora

Kod homogenog električnog polja pločastog kondenzatora jakost električnog polja u svakoj točki prostora između ploča je jednaka i usmjerena od pozitivne ploče ka negativnoj, silnice su usporedni pravci jednake gustoće, *ekvidistantni pravci*. Crtaju se tako da okomito izlaze iz pozitivne ploče, a ulaze okomito u negativnu ploču kondenzatora (slika 3).



Slika 3: silnice homogenog električnog polja pločastog kondenzatora

Kondenzatori su protjecani strujom samo kratko vrijeme i nakon uspostavljanja naponske ravnoteže postiže se stacionarno stanje, stanje mirovanja. Međutim upravo u takvim statičkim prilikama zanimljive su fizikalne pojave između dva suprotno nabijena tijela. Ta dva tijela mogu biti pločasti kondenzator gdje će se kao izolator pretpostaviti vakuum, što znači da između ploča nema slobodnih električnih čestica. Ako se u takav prostor dovede neki električki naboj $+Q'$, na njega će, zbog naboja na pločama kondenzatora, djelovati sila F . Uvedeni naboj $+Q'$ će pozitivni naboji lijeve ploče odbijati a negativni naboji desne ploče privlačiti.

Nehomogeno električno polje točkastog naboja

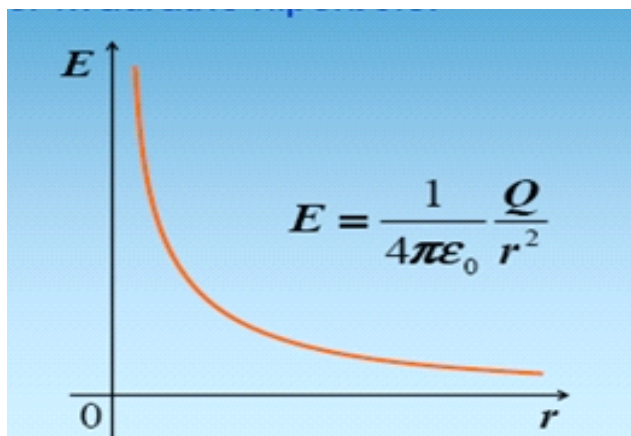
Električno polje u kojem se jakost polja E mijenja od točke do točke naziva se *nehomogeno električno polje*.

Točkastim se nabojem podrazumijeva naboj zanemarivo malih dimenzija. Ova apstrakcija može poslužiti pri matematičkim proračunima električnih polja stvorenih od različito raspoređenih naboja po tijelima. Osim toga, sav se naboj može zamisliti da je sastavljen od elementarnih točkastih naboja. Polje takvih točkastih naboja, predočava se silnicama (engl. lines of force = linije sile) koje su usmjerene kao i vektor polja od pozitivnog ka negativnom naboju. Smjer vektora jakosti polja je tangencijalan na silnice. Pozitivni naboji su *izvori* a negativni naboji *ponori* silnica. Oko električki nabijenog naboja Q pobuđuje se prostor i naboj oko sebe stvara *radijalno* električno polje.

Ako je izvor električnog polja točkasta množina naboja Q smještena u praznini, onda je jakost električnog polja u nekoj točki polja na udaljenosti r od naboja dana (prema Coulombovu zakonu) izrazom:

$$|\vec{E}| = \frac{|\vec{F}|}{q} = \frac{Q \cdot q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \left(\frac{V}{m} \right)$$

gdje je ϵ_0 dielektrična konstanta. Isto se može vidjeti na grafičkom prikazu (slika 4):

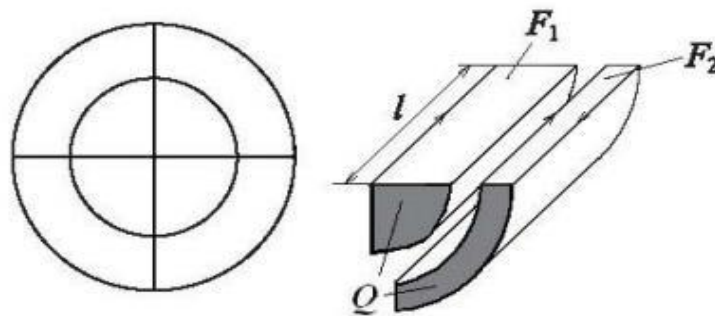


Slika 4: Grafički prikaz ovisnosti jakosti električnog polja E o udaljenosti r

SKIN EFEKT

Kada vodičem protječe istosmjerna električna struja, gustoća električne struje je na svakom mjestu presjeka tog vodiča je jednaka. Isto se može uočiti kada vodičem protječe izmjenična električna struja, ali niske frekvencije. Nova zapažanja nastala su kada je kroz vodič puštena izmjenična električna struja visoke frekvencije reda veličine 1 kHz na više. U tom slučaju gustoća električne struje potpuno nestaje iz unutrašnjosti vodiča i koncentrira se na površinskim slojevima.

Da bi prethodnu pojavu lakše razumjeli dovoljno je podsjetiti se činjenice da električna struja prolazi onim vodičem ili dijelom vodiča gdje je električni otpor manji. Pri prolasku izmjenične električne struje unutar vodiča inducira se magnetsko polje, odnosno magnetska indukcija B . Na slici 5 je površina vodiča podijeljena na dva dijela koji su po poprečnoj površini jednaki, no različiti su po površini na koje upadaju silnice magnetskog polja F_1 i F_2 . Kroz veću površinu prolazi više silnica, a time i veći tok magnetskog polja. Zbog utjecaja izmjenične struje, magnetska indukcija će se mijenjati u vremenu što će izazvati stvaranje elektromotorne sile. Pojavom elektromotorne sile inducira se električna struja suprotnog smjera koja se suprotstavlja uzroku svog nastanka. Stoga, što imamo veću elektromotornu silu bliže središtu vodiča, tj. Veću električnu struju suprotnog smjera, znači da imamo i veći otpor te se gustoća struje bliže središtu vodiča smanjuje. Vodič kao da želi maksimalno smanjiti izmjenični magnetski tok kroz svoju unutrašnjost potiskujući struje prema površini.



Slika 5: podjela vodiča na elementarne vodiče

Konkretan oblik ovisnosti električne struje o npr. Udaljenosti od ruba vodiča, ovisi o obliku presjeka vodiča: drugačija je za vodič kružnog presjeka od one za pravokutni/kvadratni. Generalno se, ipak, može uzeti da je ta ovisnost „približno“ eksponencionalna, dakle da intenzitet električne struje pada „približno“ eksponencionalno što smo dalje od ruba vodiča. Ta aproksimacija je to točnija što je frekvencija električne struje veća.

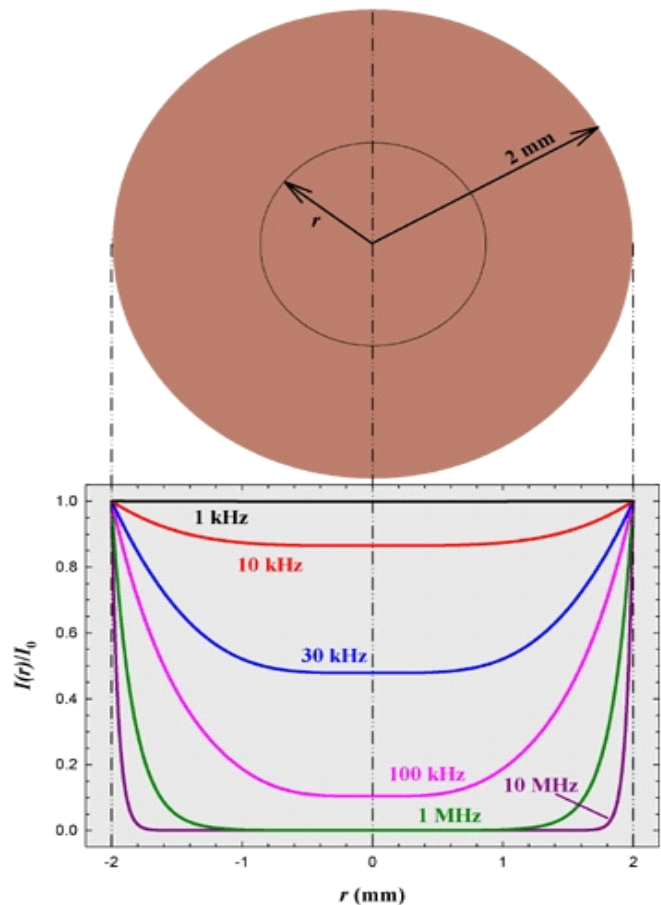
Kao primjer, uzmimo realan slučaj: bakrenu žicu kružnog presjeka, promjera $r = 2\text{mm}$. Na slici 6 vidi se ovisnost normalizirane vrijednosti električne struje $\frac{I(r)}{I_0}$ o udaljenosti od ishodišta r .

$I(r)$ - gustoća struje na udaljenosti r od središta žice

I_0 – vrijednost električne struje kada nema skin efekta (kada je frekvencija jako mala)

Kao što se vidi, na 1 kHz, električna struja praktički uniformno (ravnomjerno) teče po presjeku vodiča. Ako se frekvencija povećava, kroz središnji dio teče sve manja i manja struja. Za 1 MHz, u unutrašnjem području žice polumjera čak 1mm struja praktički ne teče. Kod 10 MHz, tok električne struje je ograničen na sloj debljine 0,2 – 0,3 mm uz površinu žice.

Ako uklonimo unutrašnji dio vodiča, električna struja od 10 MHz će praktički teći kao da je žica ispunjena! Posljedica toga jest da se u uređajima koji rade na visokim frekvencijama isplati stavljati vrlo tanke vodove, kada ionako struja teče praktički samo po površini toga



Slika 6: Ovisnost normalizirane vrijednosti struje o udaljenosti

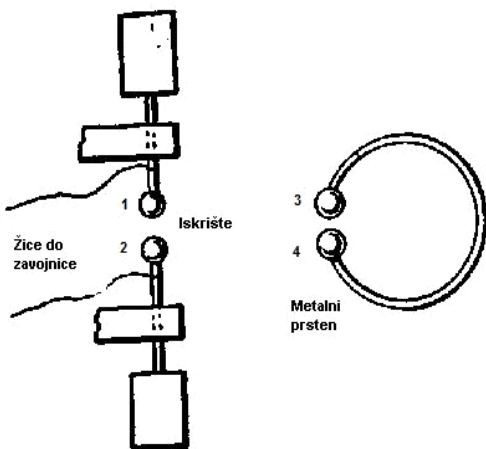
vodiča. Npr. štampani vodovi u računalima su vrlo tanki upravo iz tog razloga, jer nema potrebe niti smisla stavljati deblje vodove budući da se radi o frekvencijama od 1 GHz.

Kako se efektivni presjek po kojem struja teče smanjuje povećanjem frekvencije, iz poznatog izraza $R = r \frac{l}{S}$, može se očekivati da otpor nekog vodiča ovisi o frekvenciji. Ta ovisnost nije jednostavna, ali za vrlo visoke frekvencije se može pokazati da je otpor proporcionalan kvadratnom korijenu frekvencije.

ELEKTROMAGNETSKI VALOVI HEINRICHA HERTZA (Hertzovi pokusi)

Prvu eksperimentalnu potvrdu postojanja elektromagnetskih valova dao je njemački Fizičar (1888. godine), deset godina nakon Maxwellove smrti. Američki fizičar, Joseph Henry 1842. godine otkrio je da, kad se u LC – strujnom krugu nabijeni kondenzator izbije iskrom, u krugu nastaju električni titraji. Hertz je proučavao izbijanje na iskrištu induktora.

Između dviju metalnih kuglica je visok električni napon. Kad napon dođe do visine iznad kritičnog napona, koji je različit za razne plinove, dolazi do proboja zračnog sloja pa u zraku dolazi do električnog proboja. Uslijed djelovanja priključenog napona nastaje cijepanje molekula



Slika 7: Skica sklopa kojim se služio Heinrich Hertz

na pozitivno nabijene ione i negativno nabijene elektrone. Čestice se počnu gibati pod utjecajem električnog polja prema suprotno nabijenoj kuglici. Brzina gibanja raste sa povećanjem napona električnog polja. Pređe li ta brzina iona i elektrona kritičnu brzinu nastaje izboj putem iskre, tj. između kuglica preskoči iskra. H. Hertz je primijetio da se svaka velika (vidljiva) iskra sastoji od mnoštva manjih iskara koje

preskaču sad na jednu, sad na drugu kuglicu. Uočio je da to naizmjenično preskakanje iskara može shvatiti kao titranja u kojima dolazi do nagle i velike promjene električnog polja i da bi u tom procesu, prema Maxwelllovoj teoriji, moglo doći do stvaranja elektromagnetskih valova.

Na slici 7 je sklop koji je koristio Heinrich Hertz za svoj pokus. Taj sklop, odnosno samo iskrište, mu je predstavljao izvor elektromagnetskih valova. Iskre preskaču između kuglica 1 i 2, a frekvencija preskakanja iskara je ujedno i frekvencija elektromagnetskih valova. Kao detektor elektromagnetskih valova koristio je otvorenu petlju od metalne žice (metalni prsten), na čijim su krajevima kuglice 3 i 4, između kojih je mali razmak. Zapravo je i metalni prsten LC krug, jer i metalna žica ima neki svoj induktivitet L kapacitet C . Udaljenost između iskrišta i detektora Hertz je mijenjao od desetak centimetara do nekoliko metara.

Rezultati Hertzovih pokusa bili su u skladu sa očekivanjima, odnosno predviđanjima Maxwelllove teorije. Kada su se pojavile iskre u izvoru elektromagnetskog vala (iskrištu – između kuglice 1 i 2), pojavile su se i iskre u detektoru (metalnom prstenu između kuglice 3 i 4). To znači da se elektromagnetski val od iskrišta širi u prostor, pa tkao i prema detektoru. Nije postojala nijedan drugi razlog iskrenja detektoru, odnosno teorija kojom bi se pobila Hertzova tvrdnja. Hertzovi pokusi bili su sjajna potvrda Maxwelllove teorije elektromagnetizma. Njima je pokazao postojanje elektromagnetskog vala, da se šire brzinom svjetlosti i da imaju sva ona svojstva koja su karakteristična za svjetlost (samo što nisu vidljivi ljudskim okom) Hertzovi elektromagnetski valovi valnom duljinom pripadaju tzv. *radiovalovima*.

PRIJENOS ENERGIJE ELEKTROMAGNETSKIM VALOVIMA

Najvažnije svojstvo elektromagnetskog vala je sposobnost da prenosi energiju putujući kroz tvar ili kroz prazan prostor. Energija koju elektromagnetski val u jedinici vremena prenese kroz jediničnu površinu zovemo intenzitet elektromagnetskog vala. Intenzitet se iskazuje jedinicom W/m^2 , a ovisi o jakosti električnog polja i o električnim i magnetskim svojstvima tvari, a iskazuje se:

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_0^2,$$

gdje je E_0 najveća vrijednost koju može poprimiti titrajuće električno polje u elektromagnetskom valu, odnosno amplituda tog vala.

Bežični prijenos energije ili bežično slanje energije je proces koji se odvija u bilo kojem sustavu gdje se električna energija prenosi od izvora do trošila, bez spajanja istih u električni sklop. Bežični prijenos je savršen u slučajevima kada je potreban trenutani ili stalni prijenos energije, ali je spajanje žicama nezgodno, opasno ili nemoguće.

Iako su osnovni principi obadvoje povezani, ovaj prijenos se razlikuje od bežičnog prijenosa informacija (kao na primjer u radiju), gdje je postotak energije koji je zaprimljen jedino bitan ako postane premali da bi se razlučio signal. S bežičnim prijenosom energije, učinkovitost je važniji uvjet i to stvara važne razlike između ovih dviju tehnologija.

Rad električnog transformatora je najjednostavniji oblik bežičnog prijenosa energije. Primarni i sekundarni sklop transformatora nisu izravno spojeni. Prijenos energije se odvija pomoću elektromagnetne zavojnice u procesu poznatom kao obostrana indukcija (dodatna korist je mogućost povećanja ili smanjivanja napona). Prva zavojnica (primar) stvara uglavnom magnetsko polje, dok je druga zavojnica postavljena u tom polju tako da je struja inducirana u njene zavoje. To uzrokuje relativno kratak domet zbog količine energije potrebne da bi se proizvelo elektromagnetsko polje.

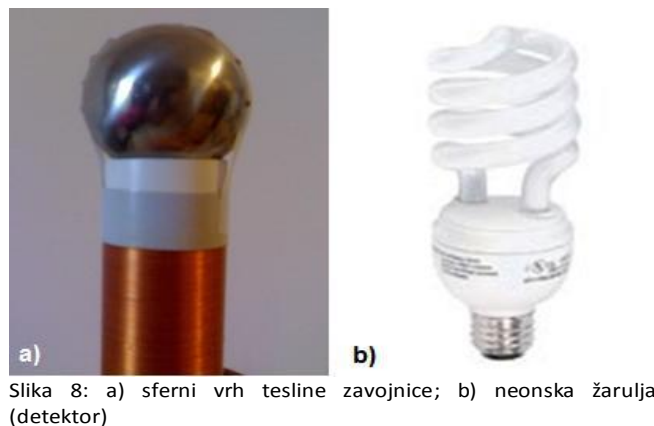
Na većim udaljenostima je metoda ne-rezonantne indukcije neučinkovita i troši puno energije samo za povećanje dometa, tak odat je glavna mana ne – rezonantne indukcije kratak domet. Primjer toga je punjač baterija električne četkice za zube. Ovdje u pomoć priskače rezonancija i dramatično povećava učinkovitost tako što šalje magnetno polje kroz "tunel" do prijamne zavojnice koja je na istoj frekvenciji rezonancije. Za razliku od višeslojne druge zavojnice ne-rezonantnog transformatora, takva prijamna zavojnica ima jedan sloj (tkzv. solenoid) sa usko razmaknutim kondenzatorskim pločicama na svakom kraju, koje u kombinaciji omogućuju zavojnici da bude podešena na frekvenciju odašiljača, tako uklanjajući golem gubitak

energije prisutan u valnom prijenosu i omogućujući energiji da se fokusira na jednoj frekvenciji, time povećavajući domet.

Metodički dio

NEHOMOGENO ELEKTRIČNO POLJE (eksperiment teslinom zavonicom)

Prije izvođenja eksperimenta nužno je ,za lakše shvaćanje eksperimenta, da su učenici upoznati sa definicijom električnog potencijala te principom na koji način funkcionira neonska cijev. Postavljanjem par pitanja i potpitanja učenicima, kako bi ih se usmjerilo u pravom smjeru, može se doći do važnih saznanja o karakteristikama jakosti i rasprostiranju nehomogenog električnog polja u prostoru oko Tesline zavojnice koja predstavlja izvor električnog polja.

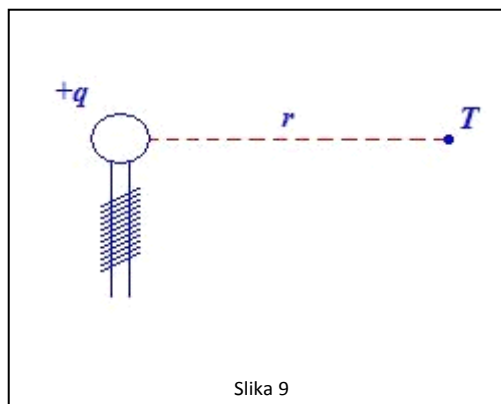


Slika 8: a) sferni vrh tesline zavojnice; b) neonska žarulja (detektor)

- Postojanje polja

Vrh Tesline zavojnice sfernog je oblika (slika 8a) i ima jako visok električni potencijal. Potencijal mu je reda veličine par stotina kilovolta (kV). S obzirom da je sfernoga oblika i ima pozitivnu vrijednost električnog potencijala možemo ga smatrati i kao modelom pozitivnog točkastog naboja.

Uključivanjem Tesline zavojnice i dovođenjem neonske cijevi u točku T (slika 9), koja nam u ovom eksperimentu služi kao detektor električnog polja, u njenu neposrednu blizinu detektor (slika 8b) svijetli. Time nam detektor ukazuje na postojanje električnog polja u prostoru oko Tesline zavojnice.



Slika 9

- Karakteristike toga polja (jakost)

Pomicanjem detektora od Tesline zavojnice može se uočiti da detektor svijetli sve slabijim intenzitetom. Nameće se zaključak da je i električno polje koje djeluje na žarulju slabije. Električno polje bi po tom zaključku trebalo biti najjače na samoj površini sfere Tesline zavojnice. Ta tvrdnja može se dokazati primicanjem detektora do površine sfere na vrhu Tesline zavojnice. Iz toga se da zaključiti da je Teslina zavojnica predstavlja izvor električnog polja. U izvoru je električno polje najintenzivnije.

-Kako se jakost električnog polja mijenja od izvora u prostor?

Intenzitet električnog polja smanjuje se udaljavanjem detektora od izvora električnog polja.

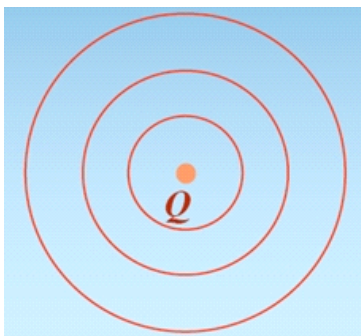
Iz izraza

$$E = k \frac{q}{r^2}$$

, gdje je k konstanta, vidimo da je jakost električnog polja E obrnuto proporcionalna sa kvadratom udaljenosti r detektora (slika 9) od izvora električnog polja. Odnosno smanjuje se za vrijednost koja je jednaka kvadratu udaljenosti detektora od izvora električnog polja.

Pomicanjem detektora u drugu stranu od Tesline zavojnice vidimo da je učinak električnog polja, kojem je izvor u sferi na vrhu Tesline zavojnice, jednak kao i u prethodnom slučaju. Isto se može zaključiti pomicanjem detektora od Tesline zavojnice u bilo kojem smjeru.

Zaključak je da električno polje ima jednaku vrijednost za jednaku udaljenost r detektora u svim smjerovima oko Tesline zavojnice.



Slika 10

Razmatranjem prethodne tvrdnje mogu se zamisliti sferne površine oko Tesline zavojnice (*slika 10*) za svaku vrijednost jakosti električnog polja.

Električno polje se širi radijalno (u kružnicama) od izvora električnog polja u prostor. Kao ekvivalent takvom širenju električnih valova od izvora električnog polja možemo naći u kamenčiću koji je pao u jezero i na površini vode izazvao valove koji se šire površinom radijalno (kružno) od mjesta gdje je kamenčić pao u jezero.

SKIN EFEKT

Tema skin efekta može se predstaviti u okviru sati rezerviranih za izborni sadržaj. Gradivo je pogodno za srednje škole, pogotovo u strukovnim školama elektrotehničkog usmjerenja.

Radi lakšeg razumijevanja bilo bi poželjno da su učenici ranije upoznati sa terminima: električni napon, električni otpor, jakost, tok, smjer i učinci električne struje, frekvencija struje gradske mreže. Predavanje može početi jednostavnim pitanjem:

Čemu služe električne utičnice?

Smisao toga je navest učenike da se podsjetite termina kao što je električni napon i električna struje te da oni napajaju električne uređaje. Također da se podsjetite vrijednosti za električni napon (220V) i maksimalnu struju utičnice (16A). Ujedno je dobro da se podsjetite i kolika je frekvencija električne struje gradske mreže (50Hz). Nakon što se uvjerimo da su učenici upoznati sa traženim vrijednostima, postavimo pitanje:

Što bi se desilo ako bi čovjek došao u doticaj sa utičnicom?

Odgovor bi bio da se ne bi dogodilo ništa jer je utičnica izolirana. Izolatori ne provode električnu struju i služe nam kako bi nas zaštitili od kontakta sa električnom strujom. Kontakt sa utičnicom koja nije izolirana može biti pogubna. Zato se sa strujom treba rukovati oprezno.

Zašto nas struja ozljedi pri prolasku kroz naše tijelo?

Na ploči se nacrtala skica ljudskog tijela u kontaktu sa neizoliranom utičnicom. U doticaju ljudskog tijela sa utičnicom zatvara se strujni krug. Utičnica je (+) pozitivan kraj, a zemlja na kojoj stojimo je (-) negativan kraj strujnog kruga. Struja uvijek teče od pozitivnog (+) prema negativnom (-) kraju strujnog kruga i time naše tijelo postaje vodič električne struje. Vrijednost otpora ljudskog tijela je velika. On ovisi o tjelesnoj masi, debljini kože na mjestu kontakta, vlažnosti kože. Vrijednosti električnog otpora našeg tijela ovisi i o faktorima kao što su iznenađenost, strah, psihofizičko stanje i reakcija na dodir sa strujom. Prosječna vrijednost otpora ljudskog tijela je 1000Ω . Struja uvijek ide linijom manjeg električnog otpora i znamo da voda dobro provodi električnu struju. U našem slučaju to je krvotok. Pri naponu od 22V kroz ljudsko tijelo bi prošla struja $I = \frac{U}{R} = 0,22A$.

Poznato je da već pri struji od $0,1 A$ dolazi do zatajenja srca i problema sa disanjem. Struja je jako opasna ako se sa njom ne rukuje nepažljivo.

Što bi se desilo kada bi ljudsko tijelo došlo u kontakt sa naponom od 150 000 V?

Nakon raznih komentara uključimo Teslinu zavojnicu. Metalni predmet približimo Teslinoj zavojnici koja na vrhu ima potencijal 150 000 V. Vidjevši da se ništa nije dogodilo učenici bi zaključili da struja nije protekla našim tijelom. Istu stvar ponovimo samo s tom razlikom što u drugu ruku uzmemo električnu žarulju koja pri kontaktu metalnog predmeta u drugoj ruci sa Teslinom zavojnicom zasvijetli.

Iz tog primjera učenici će zaključiti da električna struja ipak prolazi našim tijelom i da je ona upalila žarulju. Ono što će im biti nejasno kako je električna struja došla do žarulje a da nam nije naškodila. Objašnjenje je da električna struja prolazi po površini naše kože jer je vrlo visoke frekvencije. Svojstvo električne struje da pri visokim frekvencijama prolazi po površini kože zove se skin efekt (koža – engl. skin). Iako smo prikazali da električna struja ne prolazi kroz naše tijelo, nego po površini, velike vrijednosti električnog napona su i dalje opasne.

Što je sa toplinskim učinkom električne struje na naše tijelo?

Učenici pravilno zaključuju da što je veća struja da je veći i toplinski učinak. Veliki toplinski utjecaj u kontaktu sa kožom ozljeđuje samu kožu i dalje nastavlja krvotokom. Zato u našem slučaju koristimo metalni predmet. Prethodno se može i dokazati tako da između Tesline zavojnice i metalnog predmeta umetnemo papir, koji bi se trebao zapaliti prilikom doticaja sa iskrom iz Tesline zavojnice. Metalni predmet nam ne bi pomogao da struja nije limitirana osiguračem. Pri naponu od 150 000 V kroz naše tijelo prošla bi električna struja $I = \frac{U}{R} = 150A$. Čak i da ta električna struja ne prolazi kroz naše tijelo, nego po površini, toplinski učinak tako jake električne struje bi oštetio cijelu površinu kože i uzrokovao jake opekline. Zato je ta struja smanjena na manje od 0,1 A.

Pošto ne znaju vrijednosti električnog napona, električne struje i frekvencije nekog drugog izvora napona i nemaju sigurnost laboratorija te ne znaju čime je limitirana struja, učenike treba savjetovati da to ne pokušavaju sami bez nadzora odrasle, stručne osobe.

Skin efekt je primjenjiv i u radio tehnici. Postavljamo učenicima pitanje dali su upoznati sa nekim od radio frekvencija. Nakon što s nabrojali par njih koje pripadaju području MHz, slijedi pitanje zbog čega su radio antene šuplje. Neki učenici bi već mogli naslutiti da se radi o skin efektu. Za one koji nisu došli do tog zaključka objasnimo da je to zbog toga što pri visokim frekvencijama struja teče samo površinom vodiča stoga nije ni potrebno da su ispunjene u sredini.

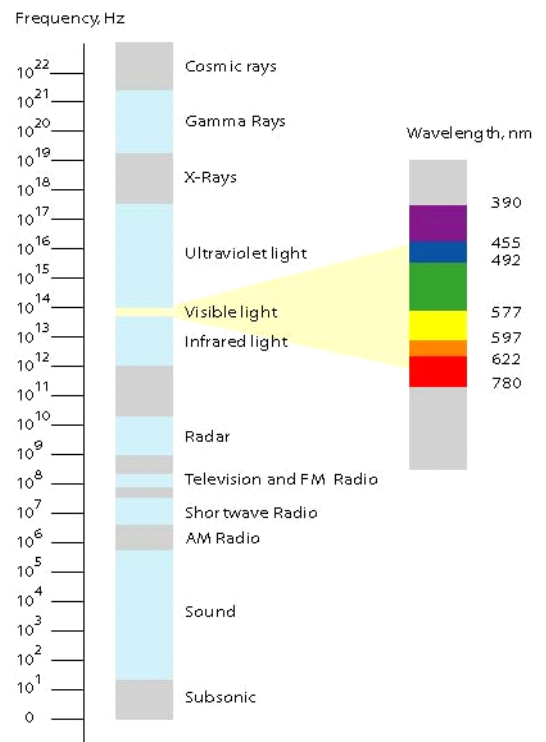
ELEKTROMAGNETSKI VALOVI HEINRICHA HERTZA (eksperiment teslinom zavojnicom)

Za prikaz Hertzova pokusa poslužiti ćemo se Teslinom zavojnicom kao izvorom elektromagnetskih valova. Postavit ćemo pitane učenicima:

Ako je iskra izvor elektromagnetskih valova, kako detektirati te valove?

Ako su učenici u stanju primijeniti svoje znanje o LC krugu i o rezonanciji na taj problem, oni će u raspravi uspjet doći do načelnog rješenja. Ako pak njihovo znanje o rezonanciji nije dovoljno proceduralno, nastavnik mora pomagati postavljanjem dodatnih pod pitanja.

Za detektiranje elektromagnetskog vala možemo se poslužiti suvremenijim načinom detektiranja elektromagnetskog vala nego što je to koristio Hertz. Blizu Tesline zavojnice uključimo radio tranzistor. Pretraživanjem frekvencijskog opsega na radio tranzistoru naići ćemo na zvuk što ga odašilje Teslina zavojnica. Kada isključimo Teslinu zavojnicu, zvuk se prestane emitirati.



Slika 11: Spektar elektromagnetskih valova

Još jedan način kako dokazati postojanje elektromagnetskih valova jest zvuk (buka) koji proizvodi Teslina zavojnica. Prilikom izboja iskre u zrak emitira se i određeni zvuk koji prati pojavu izbijanja iskre. Prag čujnosti ljudskog uha je 20 Hz do 20 kHz. Samim time što čujemo zvuk koji se emitira pri izboju iskre u zrak, detektiramo postojanje elektromagnetskog zračenja.

PRIJENOS ENERGIJE ELEKTROMAGNETSKIM VALOVIMA (pokus teslinom zavojnicom)

U prijašnjem eksperimentu dokazano je da postojanje elektromagnetskih valova u blizini Tesline zavojnice, te da je Teslina zavojnica izvor tih valova. Predavanje će se voditi postavljanjem pitanja i poticanjem rasprave. Ukoliko dođe do prekida rasprave zbog nejasnoća učenike treba poticati i voditi kroz raspravu postavljanjem niza potpitanja.

Kako se sve u današnje vrijeme koriste elektromagnetski valovi?

Nakon kraće rasprave dolazimo do zaključka da su elektromagnetski valovi svakodnevno svuda oko nas. Dali se radilo o svjetlu, zvuku, ili televizoru, radiju, mobitelu i WiFi koje svakodnevno koristimo za koje skupa možemo reći da koriste elektromagnetske valove za prijenos informacija.

Kada žarulju priključimo u električni strujni krug, prilikom uključivanja strujnog kruga žarulja zasvijetli. Da bi žarulja mogla svijetliti električna struja napaja žarulju električnom energijom iz električnog izvora.

Što će se dogoditi ako žarulju postavimo u prostor oko Tesline zavojnice.?

Učenici će s lakoćom zaključiti da će žarulja svijetliti (u što smo se uvjerali i prije). Ako znamo da u strujnom krugu žarulja svijetli kad joj se dovede električna, kako je moguće da žarulja svijetli zraku i nije spojena na nikakav strujni krug? Iz prethodnih predavanja znamo da električno polje utječe na električnu žarulju da ona zasvijetli, a znamo i da je Teslina zavojnica izvor elektromagnetskih valova. Može se s lakoćom zaključiti da je elektromagnetski val (odnosno njegova električna komponenta) što ga emitira Teslina zavojnica uzrok zašto žarulja

svijetli. Ako znamo da je potrebna električna energija da bi žarulja kontinuirano svijetlila dolazimo do zaključka da je energija do žarulje došla posredstvom elektromagnetskog vala. Time smo pokazali da je moguće slati energiju na daljinu pomoću elektromagnetskog vala.

Dali sva energija iz Tesline zavojnice stigne do žarulje?

Ako se prisjetimo da se odmicanjem žarulje od Tesline zavojnice intenzitet svijetla žarulje smanjivao i ako znamo da je intenzitet elektromagnetskog vala energija koju prenese elektromagnetski val u jedinici vremena kroz jediničnu površinu zaključujemo da količina energije koja će biti prenesena elektromagnetskim valom ovisi o udaljenosti žarulje od Tesline zavojnice (izvora elektromagnetskog vala). To je razlog male iskoristivosti energije na većim udaljenostima od izvora elektromagnetskih valova.

Dali je moguće nekako povećati tu iskoristivost?

Učenici bi ovdje uz prethodno poznavanje gradiva LC titrajnog kruga i frekvencije lako mogli doći do zaključka da se veća iskoristivost može postići spajanjem žarulje u titrajni LC krug kojemu je rezonantna frekvencija jednaka onoj rezonantnoj frekvenciji Tesline zavojnice kojom emitira elektromagnetske valove

LITERATURA

- (1) NIKOLA TESLA: ISTRAŽIVAC, IZUMITELJ I GENIJ, T. Rudež, V. Muljević, T. Petković, V. Paar, D. Androić, Školska knjiga, Zagreb 2006.
- (2) POVIJEST FIZIKE, I. Supek, ŠK, Zagreb 1990
- (3) TEORETSKA ELEKTROTEHNIKA, I. dio, T. Bosanac, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.
- (4) PREDAVANJA IZ FIZIKE: Elektromagnetsko polje, V. Lopašić, Školska knjiga, Zagreb, 1979.
- (5) SKIN EFECT – NOVI KONCEPT LABORATORIJSKE VJEŽBE, diplomski rad, M. Štefanec, Zagreb, 2008.
- (6) ELEKTROMAGNETSKI VALOVI U NASTAVI FIZIKE, diplomski rad, G. Matoničkin, Zagreb, 2007.

Internet stranice:

<http://www.sgoc.de/tesla.html>

<http://hr.wikipedia.org/wiki/Fluorescencija>

http://deepfriedneon.com/tesla_frame0.html

http://hr.wikipedia.org/wiki/Be%C5%BEi%C4%8Dni_prijenos_energije

http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/nu_lectures/lecture6/hertz/Hertz_exp.html