

Fizikalne osnove Teslinog bežičnog prijenosa energije

Dubajić, Romina

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:342047>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Romina Dubajić

FIZIKALNE OSNOVE TESLINOG BEŽIČNOG
PRIJENOSA ENERGIJE

Diplomski rad

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: PROFESOR FIZIKE I TEHNIKE

Romina Dubajić
Diplomski rad

**Fizikalne osnove Teslinog bežičnog
prijenosa energije**

Voditelj diplomskog rada: doc.dr.sc. Davor Horvatić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2016.

Hvala svima koji su mi kroz godine otvarali puteve akademskog obrazovanja na različite načine: obitelji, prijateljima i kolegama, tetama u referadi, prof.dr.sc. Buljanu, dr.sc. Zorc i svima koji su me naučili da je neuspjeh samo rezultat nedovoljnog broja pokušaja.

Hvala mentoru doc.dr.sc. Davoru Horvatiću na istinskom vodstvu i povjerenju u izradi ovog rada.

*Veliko hvala doc.dr.sc. Nikoli Poljaku, imenjaku Nikole Tesle.
Bez vas obojce ovaj rad ne bi bio moguć.*

Sažetak

Vizija Nikole Tesle o svijetu bežično povezanim besplatnom energijom započela je njegovim uspjehom rezonantne induktivne veze između dvije zavojnice, kasnije popularno nazvane Teslinim transformatorom ili Teslinim zavojnicama.

Ovaj rad demistificira Tesline ideje i obuhvaća fizikalnu teoriju u pozadini takvog prijenosa koja se, većim dijelom, obrađuje na i nastavi fizike. Također, detaljno objašnjava korak po korak proces izrade jednog takvog uređaja. Svrha izrade je omogućiti nastavnicima fizike jednostavnu izradu uređaja i demonstriranje fizikalnih pojava.

Physical Foundations of Tesla's Wireless Energy Transmission

Abstract

Nikola Tesla's vision of a world, wirelessly connected, using free energy began with his resonant coupling triumph, later known as Tesla coil experiments. This thesis demystifies Tesla's ideas by elaborating physical theory behind such an energy transfer, using the same material that is, for the most part, being taught in schools. It also includes a step by step proces of making a device on the same principles. The objective is to enable teachers in constucting and demonstrating simple physical phenomenons.

Sadržaj

| | |
|--|----|
| 1. Uvod | 1 |
| 2. Bežični prijenos energije | 2 |
| 2.1. Povijest bežičnog prijenosa | 3 |
| 3. Načini bežičnog prijenosa energije | 4 |
| 3.1. Laserski prijenos | 4 |
| 3.2. Mikrovalni prijenos..... | 5 |
| 3.3. Ionizacija zraka..... | 6 |
| 3.4. Induktivna veza..... | 6 |
| 3.5. Rezonantna induktivna veza..... | 10 |
| 4. Tesla – čovjek koji je izumio 20.stoljeće | 12 |
| 4.1. Toranj Wardenclyff..... | 14 |
| 5. Električni titrajni krug | 16 |
| 6. Izrada demonstracijskog uređaja | 19 |
| 6.1. Princip rada..... | 22 |
| 6.2. Izrada uređaja | 25 |
| 7. Demonstracijski uređaj u školi | 36 |
| 8. Zaključak | 38 |
| Dodatak | 39 |
| A. EAGLE program..... | 39 |
| B. Osvjetljavanje UV lampom..... | 44 |
| C. Pripremanje natrij hidroksida (NaOH)..... | 45 |
| D. Pripremanje željezo (III) klorida (FeCl_3) | 45 |
| E. Bušenje pločice..... | 46 |
| G. Ispravno postavljanje tranzistora i diode..... | 47 |
| Literatura | 48 |

1. Uvod

„Sadašnjost je vaša. Ja radim za budućnost i ona pripada meni.“

Nikola Tesla

Svakim danom potvrđujemo istinitost Teslinih riječi i vizija. Naša ovisnost o električnoj energiji je sve veća, dok mnogobrojni uređaji modernog društva ostavljaju bespotrebni nered žica. Potrebe današnjeg društva su mobilnost, praktičnost i energetska učinkovitost čemu je još prije stotinjak godina težio i sam Tesla.

Sve trenutne pokušaje i uspjehe bežičnog prijenosa energije dugujemo Teslinim ambicijama i neiscrpoj mašti da stvori društvo neovisno o energetskim konglomeratima. Kao i svaki genij, bio je interdisciplinaran u svom radu, obuhvaćajući fiziku i tehniku kao osnovu napretka društva i upravo taj segment, zajedno s informatičkim dijelom, obuhvaćen je u ovom radu.

Stoga, cilj ovoga rada je potaknuti nastavnike, buduće nastavnike i edukatore na istraživanje i izradu ovakvog i sličnih uređaja kako bi približili fiziku u školama na jedan dinamičan i inovativan način. Također, moguće je u nekim dijelovima izrade uključiti i same učenike, što je posebno dobro u tehničkim školama. Na taj način potičemo kreativnost koja od učenika stvara ljude spremne istraživati i upustiti se u proces stvaranja, razvijajući poduzetnički duh. Međutim, ako nastavnici prirodoslovnih i tehničkih predmeta nisu i sami motivirani, fizika će ostati samo skup predugačkih formula čije mogućnosti zvuče dobro jedino u znanstveno-fantastičnim filmovima. Ne smijemo zaboraviti da su i nastavnici također učenici, pa je ovaj rad zamišljen kao „recept“ za izradu demonstracijskog uređaja uz objašnjenja fizikalnih pojava i principa rada.

Učenik uči potvrđivanjem onoga što je otkrio u procesu učenja, a što je bolje od atraktivnih vizualnih efekta koji učvršćuju znanje prirodnih pojava? Pri demonstriranju važno je paziti da objašnjenja budu prikladna pojedinim školama. Dobro je povezati to sa primjerima uređaja koji već sada rade na tom principu, a dana su u ovom radu.

Sve to zajedno dat će dobre temelje u obrazovanju koje nije fragmetarno, već stvara društvo cjelovitih, znatiželjnih pojedinaca.

2. Bežični prijenos energije

Od njenog otkrića, koristeći različite metode i opremu, električna struja koristila se za prijenos energije i informacija. Uobičajen prijenos energije odvija se putem žica, međutim, dosta energije (čak do 30 %) se izgubi putem do potrošača zbog različitih čimbenika poput udaljenosti, dimenzija, materijala i otpora žica, kao i atmosferskih uvjeta (temperatura, vlažnost zraka...).

Bežični prijenos energije, općenito govoreći, je način prijenosa energije od izvora do trošila bez spajanja u električni sklop pomoću žica. Za razliku od energije, bežični prijenos informacija, kao na primjer kod radija, razlikuje se utoliko što je zaprimljen postotak energije bitan jedino ako je premalen da bi se mogao razlučiti signal od šuma.

Bežični prijenos moguće je ostvariti na više različitih načina, stoga je to skupni naziv za prijenos energije laserom, mikovalovima, ionizacijom zraka, induktivnom i rezonantnom induktivnom vezom.

Iako idealan u slučajevima kada je spajanje žicama nezgodno, opasno ili čak nemoguće, ovakav prijenos energije ima važan uvjet učinkovitosti kako bi bio energetski i ekonomski isplativ, pa je to jedan od razloga zašto je snažan razvoj doživio tek od 20 st.

2.1. Povijest bežičnog prijenosa

Bežični prijenos svoj razvoj duguje nizu otkrića, a i samo njegovo istraživanje uzrokovalo je poboljšanje drugih tehnologija, kao npr. Yagijeva antena u radiokomunikaciji. Slijedi kratak pregled povijesti razvoja onoga što danas nazivamo bežičnim prijenosom. [1]

| | |
|-------------|---|
| 1864. | J.C. Maxwell sintetizira prethodne eksperimente i jednačbe električne energije, magnetizma i optike (Amper, Faraday) u skladu s teorijom i matematičkim modelima ponašanja elektromagnetskog zračenja u skup jednačbi poznate kao Maxwellove jednačbe |
| 1888. | H. R. Hertz eksperimentalno je potvrdio postojanje elektromagnetskog zračenja |
| 1893. | N. Tesla pali sijalicu pomoću elektromagnetske indukcije-rezonantno induktivnog spoja |
| 1897. | N. Tesla dobiva svoje prve patente u vezi Wardencllyffe tornja |
| 1904. | Svjetski sajam u St. Louisu - nagrada za uspjeh u pokretanju motora cepelina od 0,1 konjske snage (75 W) energijom poslanom bežično na udaljenost od 30 m |
| 1960. | General Electric stavlja na tržište bežičnu električnu četkicu za zube |
| 1964. | W. C. Brown pokazao je model avion na mikrovalni pogon koji je dobivao energiju potrebnu za let iz mikrovalova |
| 1969.-1975. | Brown na čelu JPL Raytheon programa prenosi 30 kW mikrovalovima na udaljenost od 2.5 km sa 84% učinkovitosti |
| 2000.-2005. | Hui patentira podlogu za bežično punjenje elektroničkih naprava |
| 2007. | M. Soljačić ostvaruje bežični prijenos energije na udaljenosti od 2m magnetskom rezonancom, učinkovitost 45 % |
| 2008. | Intel je pokazao kako se može bežično poslati energija da bi se upalila žarulja sa 75% učinkovitošću prijenosa pomoću rezonatora Osniva se Wireless Power Consortium za uspostavu standarda u bežičnoj tehnologiji |
| 2010.- ... | Daljnji napredak u komercijalnoj, vojnoj i medicinskoj primjeni |

3. Načini bežičnog prijenosa energije

Postoji nekoliko najpogodnijih tehnologija za bežični prijenos energije, koje možemo podijeliti u ovisnosti o udaljenosti. [7]

Prijenos na velike udaljenosti

1. mikrolvalovi
2. LASERI

Prijenos na male udaljenosti

1. ionizacija zraka
2. induktivna veza
3. rezonantna induktivna veza

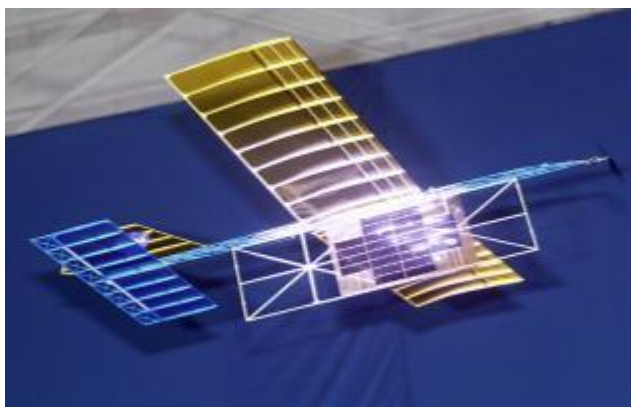
3.1. Laserski prijenos

Pojednostavljeno, električna energija iz strujnog kruga se prenosi usmjerenom laserskom zrakom na fotonaponske ćelije i tamo se ponovo pretvara u iskoristivu energiju.

Prijenos je pogodan i za manje objekte zbog kompaktnosti lasera, te na velike udaljenosti kroz zrak, vakuum ili optičke materijale, ali samo ako postoji prostor bez zapreka.

Prednosti ovakvog prijenosa su da samo oni uređaji koji su pogođeni laserom primaju energiju, bez interferencije s postojećim mobitelima ili wi-fi pristupnim točkama.

Nedostaci su očiti – intenzitet LASERA (sljepoća, oštećenja kože), neefikasnost (do 50 %), te oblaci, kiša, magla i atmosferska apsorpcija su velika zapreka, pa gubici mogu biti i stopostotni.



Slika 1. NASA, Dryden Flight Research Centar, 2003. Usmjeravanjem lasera na fotonaponske ćelije uspješno je poletio model bespilotnog aviona

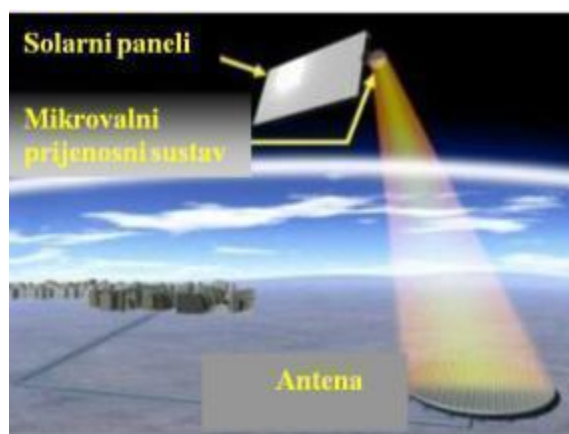
3.2. Mikrovalni prijenos

Ovakav način prijenosa često je korisniji od lasera, jer je manje osjetljiv na atmosferske nepravilnosti, a koristimo antenu koja pretvara mikrovalove u električnu energiju (korisnost do 95%). Mali bespilotni avion SHARP (80 – tih godina 20.st, Kanada) mogao je letjeti na visini od 21 km i po krugu radijusa 2 km primajući energiju od transmitera mikrovalova koji se nalazio na Zemlji i sve dok bi ga kružna putanja držala u dometu transmitera mogao je letjeti mjesecima.

Japanski znanstvenici, 2015. g. su uspjeli prenijeti 1.8 kW na udaljenost od 55 m pomoću mikrovalova. Zbog tog uspjeha, već se radi na izgradnji solarnih panela za satelite koji bi napajali pogone na Zemlji s početkom rada 2040.g., rješavajući usput problem prevelikih antena koje bi mogle predstavljati opasnost po zdravlje ljudi zbog povećanja temperatura organizma, te vrlo specifično usmjeravanje predajnika i prijemnika.



Slika 2. Bespilotni avion SHARP



Slika 3. Prijenos energije mikrovalovima kako ga zamišljaju japanski znanstvenici

3.3. Ionizacija zraka

Neisplativa i najteže ostvariva metoda za komercijalni bežični prijenos energije. Primjer ovoga u prirodi su munje i izboji između žica, ali su vrlo nepraktični, a često i nepoželjni.

3.4. Induktivna veza

Opisane pojave i zakoni u induktivnoj i rezonantnoj induktivnoj vezi nalaze se u skupu jednadžbi koje univerzalno opisuju elektromagnetna međudjelovanja - Maxwelllove jednadžbe: [10] [3]

$$1. \quad \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_0}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Naboj, čije silnice su otvorene krivulje, je izvor ili ponor električnog polja.

Jednadžba poznata i kao Gaussov zakon.

$$2. \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

Ne postoji magnetni monopol, tj. izvor ili ponor magnetnog polja.

Silnice magnetskog polja su zatvorene krivulje.

$$3. \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

Promjenjivo magnetno polje uzrokuje električno polje.

Ova jednadžba je još poznata i kao Faradayev zakon elektromagnetne indukcije.

$$4. \quad \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

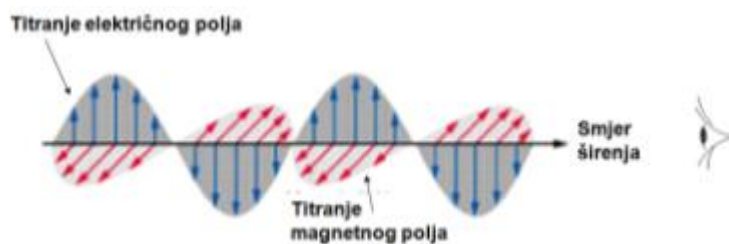
Vodič kojim teče struja ili promjenjivo električno polje uzrokuje magnetno polje.

Također poznato još i kao proširen Amperov zakon.

Poveznica između dielektrične konstante vakuuma (permitivnosti) ϵ_0 i premeabilnosti vakuuma μ_0 je brzina svjetlosti:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (5)$$

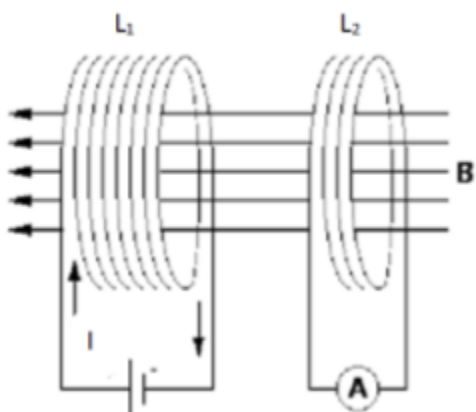
Uzajamno titranje električnog i magnetskog polja je elektromagnetni transverzalni val koji se širi prostorom. Polja \vec{E} i \vec{B} su međusobno okomita, okomita su i na smjer širenja te su u fazi.



Slika 4. Elektromagnetni val

Eksperimentalnu potvrdu postojanja elektromagnetnih valova dao je H. Hertz proučavajući titranje električnog kruga koje ćemo detaljnije opisati u poglavlju 5.

U ovom radu posebno ćemo se baviti trećom Maxwellovom jednačbom i Faradayevim zakonom koji je osnova svake induktivne veze.



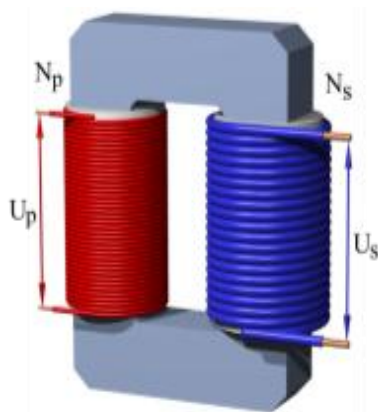
Slika 5. Prikaz toka magnetskog polja

Izmjenična struja kroz zavojnicu L_1 stvara promjenjivo magnetsko polje B .

Magnetsko polje B također prolazi kroz zavojnicu sekundara L_2 , gdje se inducira napon zbog kojeg poteče struja po Faradayevom zakonu indukcije poštujući Lenzovo pravilo (predznak minus u izrazu) pomnožen sa brojem navoja N :

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (6)$$

Jednostavno rečeno, vremenska promjena magnetskog toka inducira na krajevima zavojnice L_2 napon, poteče struja takvog smjera koji se svojim učinkom protivi promjeni magnetskog toka.



Transformator, najjednostavniji i najčešće korišten uređaj za bežični prijenos energije, zasniva se na međuinstrukciji. Primarna zavojnica namotaja N_p , napona U_p i sekundarna zavojnica N_s , napona U_s nisu povezane žicama, a namotane su na željeznu jezgru.

Razlog za željeznu jezgru je što ne želimo rasap magnetskog polja, a time i energije.

Slika 6. Transformator

Samoindukcija je pojava induciranja napona na krajevima zavojnice (vodiča) kada njome prolazi promjenjiva struja. Promjenjiva struja uzrokovat će promjenu magnetskog polja, a time i magnetskog toka kroz zavojnicu. Ta promjena uzrokuje pojavu inducirano napona po Lentzovom pravilu (6). Budući da tu indukciju uzrokuje vlastito polje zavojnice, ona se naziva samoindukcija:

$$\varepsilon = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (7),$$

gdje je L induktivitet zavojnice i ovisi o geometrijskim svojstvima zavojnice i materijalu:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r S \cdot N^2}{l} \quad (8)$$

Međuinstrukcija je pojava kod koje se zbog promjene jakosti struje u jednom strujnom krugu - primaru, inducira struja u drugom strujnom krugu - sekundaru.

Kroz primar teče struja I_1 koja stvara tok Φ_{12} , pa će inducirani napon ε_2 u sekundaru biti:

$$\varepsilon_2 = -N_2 \cdot \frac{\Delta \Phi_{12}}{\Delta t} = M_{12} \cdot \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad (9),$$

gdje je M_{12} koeficijent međuinstrukcije – međuinuktivitet i ovisi o geometriji prostora i materijalu zavojnica:

$$M_{12} = \frac{N_2 \cdot \Phi_{12}}{I_1} \quad (10)$$

Kod idealnog transformatora odnosi napona primara i sekundara su proporcionalni, a jakosti struja obrnuto proporcionalni omjeru broja navoja, što je posljedica gore navedenih jednažbi:

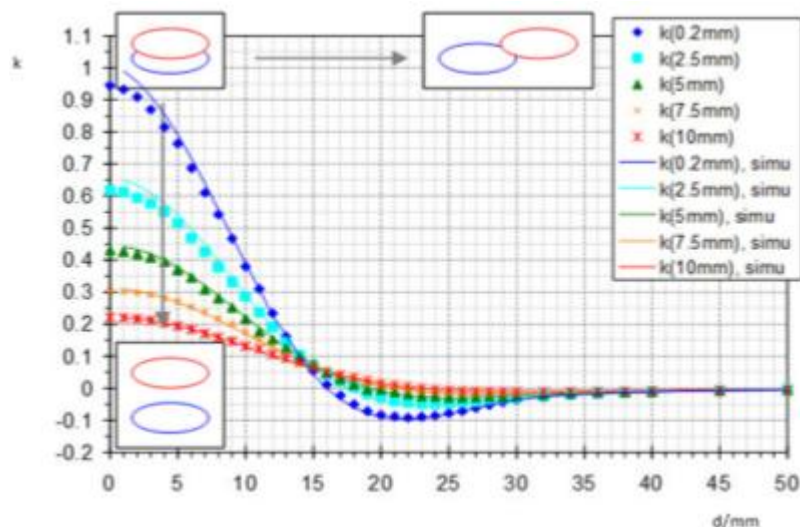
$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad U_s \cdot I_s = U_p \cdot I_p \quad (11)$$

Uvidamo veliku korist transformatora pri transformiranju visokih napona u niske napone i obratno, ali u stvarnosti svaki transformator ima svoje gubitke.

Što su zavojnice bliže, magnetna polja su jača, a to je zapravo i glavni nedostatak prijenosa. On se može ostvariti samo na male udaljenosti, pa prijatelj mora biti vrlo blizu odašiljača ili induktora kako bi se mogao s njim spojiti i ostvariti tu vezu.

Faktor sprege k je bezdimenzijska veličina koja nam pokazuje koliko će biti dobra induktivna veza ovisno o tome koliko je magnetskog toka prošlo kroz zavojnice. Vrijednosti k se kreću između 0 (nema nikakvog toka, nema induktivne veze) i 1 (sav tok prolazi, 100 % uspostavljena induktivna veza): [9]

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_2 L_1}} \quad (12)$$



Slika 7. Ovisnost faktora sprege o udaljenosti zavojnica

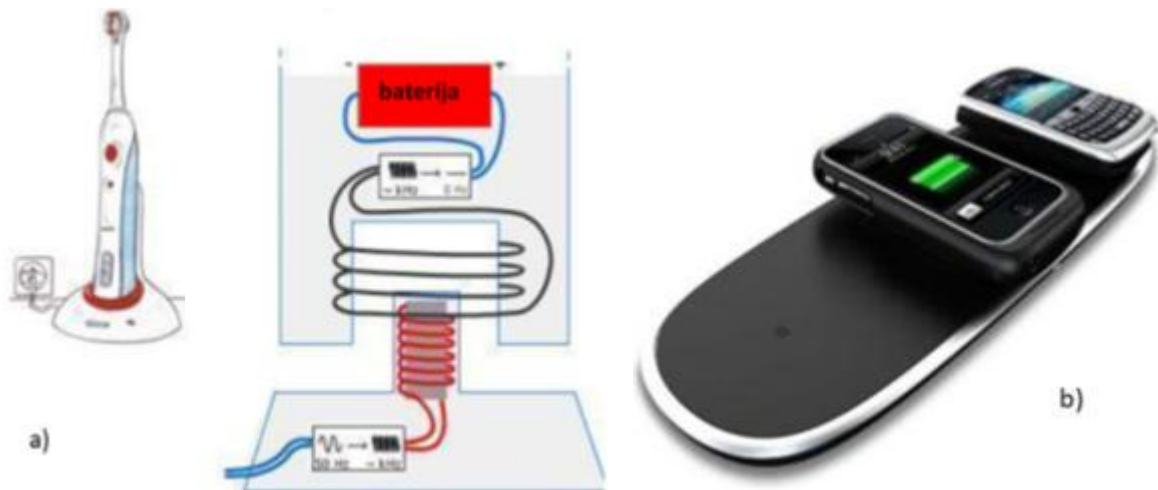
3.5. Rezonantna induktivna veza

Zaključili smo da, na većim udaljenostima, metoda ne-rezonantne indukcije je neučinkovita i troši puno energije samo za povećanje dometa. Međutim, postoji način da između primarnog i sekundarnog strujnog kruga postoji maksimalan prijenos električne energije, a potrebno je da su frekvencije primarnog i sekundarnog strujnog kruga u rezonanci:

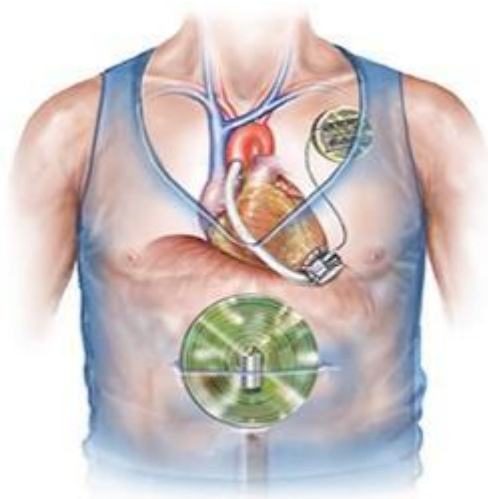
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (13)$$

Upravo zbog rezonance, dva objekta mogu snažno međudjelovati, dok sa ostalim objektima imaju slabo ili nikakavo međudjelovanje. Prijenos energije između njih je prilično učinkovit.

Primjer ova dva načina bežičnog prijenosa energije je električna četkica za zube koja u svojoj bazi i dršci ima malene zavojnice koje omogućavaju da se baterija napuni, indukcijska kuhala, podlošci za punjenje manjih uređaja, medicinski uređaji, vojna primjena, prijevoz...



Slika 8. Primjer induktivne veze : a) kod električne četkice
b) podlošci za punjenje manjih električnih uređaja



Slika 9. Rezonantna induktivna veza. Zavojnica sa baterijom stavljamo na kožu pacijenta iznad srčanog implantata s kojim se ostvaruje induktivna veza

2013. g znanstvenici Instituta za tehnologiju (KAIST) u Seoulu u Južnoj Koreji pohvalili su se novim tehnološkim dostignućem - OLEV (Online Electric Vehicle), autobus na električni pogon koji za punjenje koristi magnetsko polje u rezonanciji za prijenos snage u autobus, i to sve tijekom vožnje na cesti.

2014.g u Velikoj Britaniji pokrenut je pilot program kojim je u sustav javnog prijevoza uključeno 8 električnih autobusa na ruti od 25 km koji će se puniti bežičnim putem tijekom noći. Isti program imaju Italija, Nizozemska i Njemačka. [1]



Slika 10. OLEV autobus na električni pogon



Slika 11. Izgled ceste koja omogućuje vožnju principom indukcije

4. Tesla – čovjek koji je izumio 20.stoljeće [5]

Rođen 10. srpnja 1856.g u Smiljanu u obitelji pravoslavnog svećenika. Tesla je odmalena pokazivao zanimanje za prirodne fenomene. Svoje formalno obrazovanje započeo je u Smiljanu, zatim u gimnaziji u Rakovcu, kraj Karlovca, a daljnje akademsko obrazovanje nastavlja u Grazu i Pragu. Radeći kao inženjer Telefonskog društva u Budimpešti, prilikom jedne šetnje 1882. otkriva principe koji mu omogućavaju izradu prvih elektromotora izmjenične struje, a time i njezinu sveopću primjenu. Godine 1884. prelazi u Edisonovu kompaniju u SAD-u, međutim zbog nerazumjevanja Edisona prema Teslinim idejama o izmjeničnoj struji, Tesla napušta Edisona i osniva svoju vlastitu kompaniju Tesla Electric Light and Manufacturing Company, koja ubrzo propada.

U travnju 1887. godine osniva Tesla Electric Company gdje konstruira nekoliko motora i generatora izmjenične struje te razvija sustav prijenosa i razdiobe izmjenične struje, koji se održao do danas i koristi se u svakodnevne svrhe.

Njegove patente otkupio je industrijalac George Westinghouse i s navedenim Teslinim projektima pobjeđuje Edisona i njegovu istosmjernu struju na natječaju za izradu sustava osvjetljenja na EXPO-u u Chicagu (1893.), prvom svjetskom sajmu. 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. Samo nekoliko mjeseci nakon hidroelektane na Niagari, koja je opskrbljivala 40 km udaljen grad Buffalo, puštena je u pogon i Hidroelektrana Jaruga na Krki na izmjeničnu struju.

Daljnja istraživanja odvela su Teslu u područje struja visokih frekvencija gdje je otkrio i istražio mnoge do tada nepoznate pojave poput skin efekta, kao i predvidio njihovu primjenu u medicini.

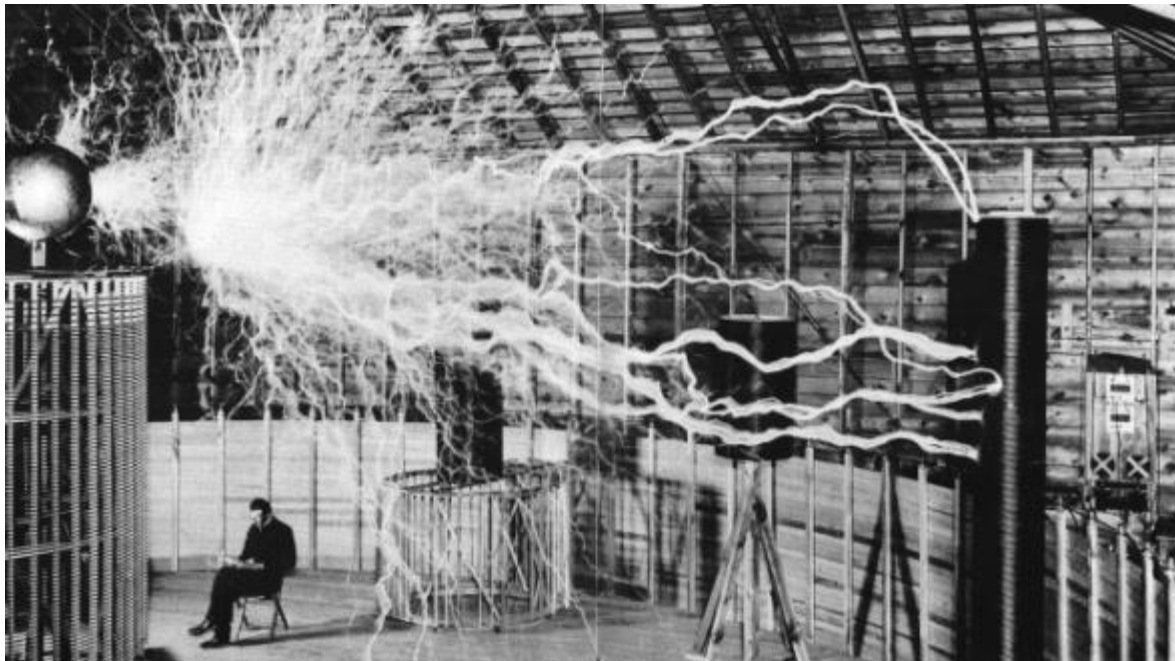
Unatoč požaru koji je 1895. uništio sve uređaje, nacрте, arhiv i Tesline privatne stvari u njegovom laboratoriju, u samo godinu dana podigao je novi laboratorij, u kojem je s transformatorom visokoga omjera transformacije (poslije nazvanim Teslin transformator) postizao visoke napone i stvarao snažna električna polja. U njima su električna pražnjenja bila burna, slična munjama, a izumio je fluorescentne svjetiljke koje su tada svijetlile iako nisu bile spojene žicama.

Bežični prijenos je rođen.

Dramatične demonstracije izuma pribavile su Tesli zasluženu slavu, iako ne i bogatstvo, ali i razne epitete uz one već dobro poznate zbog svoje opsjednutosti brojem tri i strahu od mikroba.

U godinama koje slijede povučeni genije svu svoju pozornost posvetio je bežičnom prijenosu i njegovoj jedinog manji – malenoj učinkovitosti. Želeći riješiti i taj problem, gradi veliku odašiljačku i prijamnu postaju u Colorado Springsu i usavršava sustave za bežični prijenos signala i električne energije, uz primjenu napona od nekoliko milijuna volta. To ga je dovelo do novog otkrića - stojnih valova.

Navodno je upalio 200 žarulja na udaljenosti od 40 km od izvora u svojem laboratoriju. Međutim, to nije pronađeno kao zapis nigdje osim kod njegovog prvog biografa J.J. O'Neill- a.

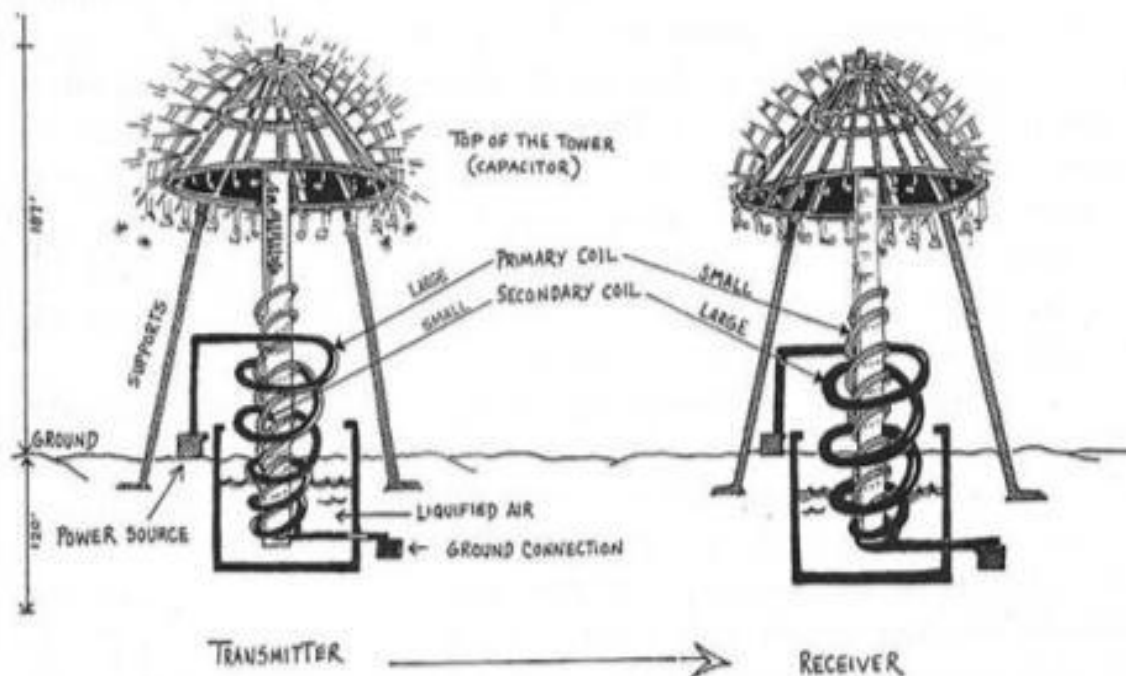


Slika 12. Tesla eksperimentira sa bežičnim prijenosom u svom laboratoriju u Colorado Springsu

4.1. Toranj Wardencllyff

Tesla gradi veliku postaju na Long Islandu u New Yorku poznatu kao toranj Wardencllyff 1901. g. Za antenu je bio izgrađen stup visok 57 metara, na vrhu s kupolom od žica, promjera 20 metara. Njime je želio bežično odašiljati signale i električnu energiju, svima dostupnu i bez naplate što je naišlo na otpor dotadašnje električne distribucije.

Osnovna ideja je korištenje energije električki nabijene ionosfere i Zemlje. Struja bi putovala kroz Zemlju između dva uzemljena tornja sastavljena od Teslinih zavojnica u rezonanciji sa Zemljom. Da bi uspio probiti izolirajući zrak u okolini tornjeva između ionosfere i Zemlje, Tesli bi trebalo oko 15 - 20 milijuna volti na vrhu svakog tornja. Ionizirana atmosfera na vrhovima tornjeva je rasterećena zrakom ultravioletnog zračenja koj će tvoriti visokonaponsku plazmu. Otvara se vodljivi put između atmosfere i Zemlje tako da je izazvano stanje slično plazmi. To će biti vidljivo kao „aurora“ efekt. Krajnji rezultat je struja između dva tornja u zatvorenom krugu ionosfera – jedan toranj – Zemlja – drugi toranj – ionosfera. Vodljivi dio atmosfere je na oko 50 km visine, stoga bi razlika potencijala bila 400 000 V! [13]



Slika 13. Teslini nacrti za tornjeve antene unutar kojih su uzemljene Tesline zavojnice



Slika 14. Viđenje Teslinih ideja kako bi izgledalo Svjetski bežični sustav da je uspio u naumu. Drugi rezonantni toranj trebao je biti u Škotskoj.

Iako je tvrdio da su ideje za Svjetski bežični sustav dokazane, ne postoji pisani dokaz da je uspio prenjeti bežično energiju na veće udaljenosti od onih sa rezonantnom indukcijom i fluorescentnim žaruljama niti je to itko uspio dosada.

Gradnja je 1905. bila obustavljena, a iz bojazni da antena ne posluži njemačkim špijunima, bila je srušena 1917. miniranjem. To je bio najveći Teslin poraz, a njegov san o besplatnoj bežičnoj energiji ostaje mistificiran i nedostižan.

Ironično, 1917. odlikovan je najvećim odlikovanjem Američkog instituta elektroinženjera - Edisonovom medaljom, a samo par godina prije, iako u velikoj novčanoj potrebi, odbio je Nobelovu nagradu, jer je suprimatelj bio upravo T.Edison.

Posljednje godine života proveo je izoliran, iako slavan, hraneći golubove u neimaštini. Umro je 1943.g od srčanog udara u 87 g. života u New York-u, a sve njegove zamisli, papiri i laboratorijske zabilješke bili su zapečaćeni zbog prirode Teslinih otkrića i patenata. Iza njega ostalo je preko 135 patenata i oko 700 izuma koji nisu patentirani zbog financijskih razloga, Tesline nebrige za financijsku stranu patentiranja a i činjenice da je puno toga Tesla držao u glavi zbog straha od krađe. Njemu u čast nazvana je jedinica za jakost magnetskog polja

Sam Tesla ostaje pomalo zaboravljen ekstravagantni genij bez čijeg doprinosa današnja civilizacija ne bi bila moguća.

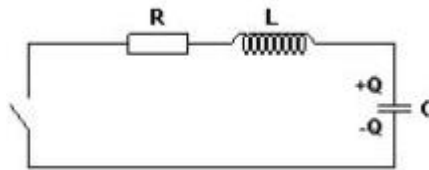
5. Električni titrajni krug

Tesla je većinu svojeg života posvetio bežičnom prijenosu energije, obuzet prijenosom na vrlo velike udaljenosti, posebno nakon uspjeha s rezonantnom induktivnom vezom.

Ovaj rad poslužit će kao uputa za izradu demonstracijskog uređaja koji će svoju primjenu, osim u popularizaciji znanosti, pronaći i u školi kao proširen sadržaj ili vizualni doprinos gradivu u području elektromagnetizma.

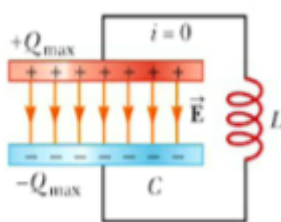
U osnovi induktivne veze zapravo su električni titrajni krugovi, stoga je dobro posvetiti nekoliko rečenica radu elektiričnog titrajnog kruga.

Najjednostavniji električni titrajni krug je serijski spoj idealne zavojnice induktiviteta L , idealnog kondenzatora kapaciteta C i idealnog otpora R kako možemo vidjeti na Slici 15.



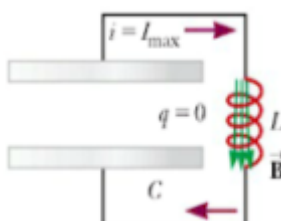
Slika 15. Jednostavan električni titrajni krug

Uz pomoć slika objasniti ćemo kako titra LC krug i što se događa sa energijom: [3]



1. Kondenzator i zavojnicu spojimo u strujni krug preko prekidača P bez nekakvog vanjskog izvora. Prije zatvaranja nabijemo kondenzator količinom naboja Q_0 (analogno pomicanju opruge iz ravnotežnog položaja). Struja je nula, a u kondenzatoru je pohranjena najveća energije električnog polja:

$$E_e = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (14)$$



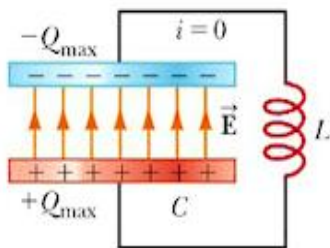
2. Zatvaranjem kruga, poteče struja od pozitivno nabijene ploče prema negativnoj i počinje pražnjenje kondenzatora težeć ravnotežnoj raspodjeli naboja.

Porastom struje smanjuje se E_e , a raste energija magnetnog polja E_m :

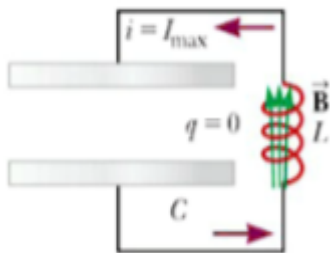
$$E_m = \frac{1}{2} LI^2 \quad (15)$$

do maksimalne kad je naboj na kondenzatoru nula.

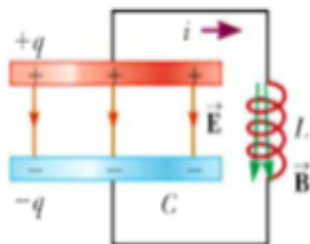
Ta struja u zavojnici stvara magnetno polje. Zbog promjene magnetskog toka na zavojnici induktiviteta L inducira se napon U_{ind} takvog predznaka da se protivi uzroku indukcije (Lentzovo pravilo), stoga će inducirati struju suprotnog smjera.



3. Inducirana struja ponovno puni kondenzator, no ovaj put sa suprotno nabijenim pločama, a električna energija se pohranjuje u polju između ploča, dok je magnetna energija E_m nula.



4. Struja u krugu ponovno uzrokuje promjenu magnetskog toka unutar zavojnice, inducira se naponi struja i cijeli slučaj 2. se ponavlja u suprotnom smjeru.



5. Ploče kondenzatora se nabijaju kao u slučaju 1. i završava je jedan puni titraj.

Struju možemo definirati preko Ohmovog zakona:

$$I = \frac{U}{Z} \quad (16),$$

gdje je Z ukupni otpor (impedancija) u strujnom krugu:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2} \quad (17),$$

X_L je induktivni otpor, X_C kapacitivni otpor dani izrazima:

$$X_L = 2\pi fL \qquad X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (18)$$

Uvjet da bi krug titrao u rezonanciji je da su X_L i X_C jednaki, stoga ostaje samo otpor otpornika koji ne ovisi o frekvenciji, a ukupna struja će biti maksimalna.

Iz gornjih izraza vidimo da će rezonantna frekvencija ovisiti jedino o L i C , pa se ciklus ponavlja frekvencijom:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (19)$$

Ukupna energija u električnom titrajnom krugu je jednaka zbroju električne i magnetske energije.

Parametri koje smo promatrali u idealiziranom električnom titrajnom krugu su kapacitet C i induktivitet L , koji je zapravo tromost kojim se sustav opire promjeni struje.

Kada ne bi bilo gubitaka energije, cijeli proces bi nastavio neprestano titrati, ali zbog otpora ipak dolazi do gušenja titranja, a smanjuje se energija u krugu.

Stupanj prigušenja izražavamo brojem Q kojeg nazivamo Q faktor ili faktor dobrote:

$$Q = \frac{\text{pohranjena energija}}{\text{gubitak energije u jednom titraju}} \quad (20)$$

U električnim titrajnim krugovima prigušenja nisu poželjna, a dobar krug imat će velik Q faktor, što se posebno vidi pri rezonanciji. Ako nema gušenja, Q je beskonačno velik. Također, faktor dobrote nekog kruga možemo izraziti kao:

$$Q = \frac{\omega_o \cdot L}{R} \quad (21),$$

gdje je f_0 rezonantna frekvencija:

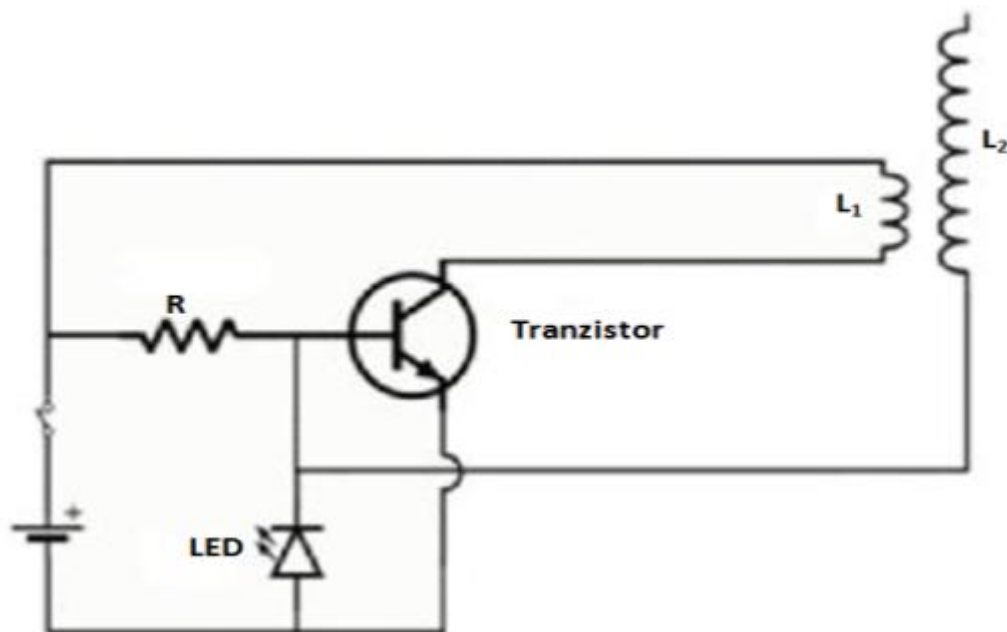
$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \qquad f_0 = \frac{\omega_o}{2\pi} \quad (21)$$

6. Izrada demonstracijskog uređaja

Kada smo obradili osnovne pojmove koje je potrebno poznavati za razumjevanje indukcije, vidimo da Tesline ideje, ostvarene i neostvarene, počivaju na zakonima fizike, ne na nejasnim pričama koje se često vežu uz njegovo ime.

Sada možemo pristupiti izradi demonstracijskog uređaja. Ovakve demonstracije će kod učenika izazvati jednaki efekt zadivljenosti kao kod Tesline publike prije stotinjak godina.

U svojoj osnovi, ovo nije kompliciran spoj za napraviti, pa čak i za one koji ne žele ili ne mogu potpuno razumjeti rad samog kruga, sljedeći upute za sastavljanje u ovom radu, svakako će moći vidjeti blagodati indukcije. Ekonomski je isplativ, a može biti sastavljen u dva dana. [11]



Slika 16. Shema kruga sa elementima

Kako bi razumjeli način na koji ovaj krug radi, reći ćemo nešto o elementima kruga koji su rijetko ili nikako spomenuti u nastavi fizike.

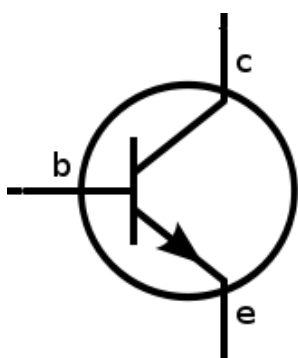
Teslina zavojnica - jedan od najpoznatijih „uređaja“ za demonstraciju induktivne veze. Zapravo se radi o transformatoru nešto drukčijem od onoga koji se obrađuje u nastavi. Za početak nema željezne jezgre oko koje namatamo zavojnice kako je prikazano na Slici 6., jer mi želimo rasap magnetskog polja, a također nema smisla i zbog same konstrukcije.

Uobičajeno u nastavi, obrađujemo napon koji se u transformatoru transformira iz visokog u niski napon. Razlog leži u lakšem povezivanju sa svakodnevnom primjenom gdje se napon gradskih dalekovoda drastično transformira na 230 V u utičnicama. Za naš uređaj bit će potreban obrnut proces, stoga Teslina zavojnica transformira malen napon baterije u puno viši napon unutar sekundara kako bi uspjeli upaliti žarulju bez žica.

Okolo sekundara motamo primarnu zavojnicu, koja će imati manji broj namotaja nego sekundar, kako bi dobili viši napon, ali i dalje vrijede svi principi i izrazi koje smo obradili u prethodnim poglavljima.

Ukoliko bi na vrh sekundara stavili nekakav vodljivi materijal, npr. metalnu kuglu, to bi doprinjelo jačini električnog polja. Naravno, to je samo opcija i nije uvjet da uređaj radi, a nije korištena u testiranju ovog uređaja. [14]

Tranzistor – poluvodički elektronički element koji se sastoji od baze, kolektora i emitera i za naše potrebe on se ponaša kao sklopka koja propušta ili nepropušta struju ovisno postoji li napon na bazi. Kada struja male jakosti dođe na bazu, „otvara“ put za jaču struju koja će poteći od kolektora prema emiteru, jer je to, za tranzistor, stanje minimalnog otpora.

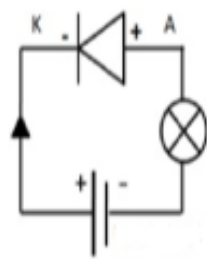
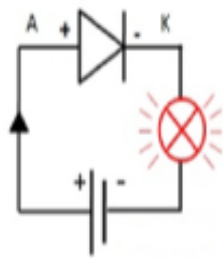


Slika 17. Shema tranzistora

Ovakav demonstracijski krug može se napraviti i bez tranzistora, no on znatno olakšava izradu i rukovanje, a također zbog svoje elektroničke preciznosti fino ugađa osciliranje kruga.

U krug se spajaju sa hladnjacima koji osiguravaju odvođenje topline kako se ne bi pregijali i pregorili.

Dioda - postoje različiti tipovi dioda, a klasifikacija se radi po funkciji koju dioda obavlja. U našem uređaju imamo led diodu koja ujedno i signalizira, tj. svijetli (zato su kraj



simbola diode dvije strelice). Jednostavno rečeno, uz narinuti napon priključen tako da je negativan pol izvora na katodi a pozitivan na anodi, dioda je propusno polazirana i vodi stuju, a suprotan polaritet narinutog napona dioda neće voditi.

Slika 18. Simbol diode i princip rada

Ostali dijelovi kruga poput baterije, otpornika, zavojnice i prekidača su dobro obrađeni u nastavi, pa nije potrebno detaljnije ih razjašnjavati.

6.1. Princip rada

Zatvaranjem strujnog kruga, poteče struja, ali tranzistor neće propustiti struju od pozitivnog pola baterije preko primara, kolektora i do emitera, sve do negativnog pola baterije, što joj je linija manjeg otpora. Stoga mora ići granom u kojoj se nalazi otpornik.

Otpornik se stavlja ispred baze tranzistora kako bi ograničio jačinu struje koja će doći do tranzistora, inače će se tranzistor vrlo brzo zagrijati i pregoriti.

Kada struja dođe do baze preko otpornika, tranzistor registrira napon i propušta struju puno veće jakosti kroz granu u kojoj se nalazi primar na svom putu preko kolektora do emitera i sve do uzemljenja.

U primaru se zbog struje koja je naglo potekla, stvara promjenjivo magnetno polje, a zbog toga nastaje promjena magnetnog toka unutar sekundara. Inducira se napon kako smo i objasnili u Faradayevom zakonu indukcije, a onda i inducirana struja.

Kako bi se dogodilo da elektroni u sekundaru budu potjerani od baze tranzistora prema vrhu zavojnice L_2 , zavojnice L_1 i L_2 moraju biti spojene u strujni krug na određen način. Magnetno polje zavojnice L_1 raste iznosom, a smjer mu je prema gore ili dolje, ovisno već o orijentaciji namotaja primarne zavojnice. Promjenom magnetnog toka kroz zavojnicu L_2 , inducirana struja u njoj bit će smjera koji se protivi promjeni toka, želeći je poništiti, kako smo već rekli u poglavlju 3.4.

Stoga, ako zavojnica L_1 stvara polje prema gore, u zavojnici L_2 inducira se struja koja stvara magnetsko polje prema dolje i obrnuto. Lako se vidi da u samo jednom od ta dva slučaja struja u sekundaru teče tako da se elektroni gibaju s baze tranzistora prema vrhu sekundara.

Uočavamo važnost da struja kroz primarnu zavojnicu teče u pravilnom smjeru (iako je smjer prema Slici 16. uvijek gore-dolje, bitno je da li je u smjeru kazaljke na satu ili obratno), jer samo jedan smjer struje u sekundaru dovodi do oscilacija kruga. Ukoliko se to ne ostvari, cijeli proces neće funkcionirati.

Kako je donji dio sekundara povezan na bazu tranzistora i indirektno na zemlju preko LED diode, dio elektrona koji ide prema vrhu sekundara proći će diodom i upaliti je, iako je anoda, tj. pozitivan pol diode spojen na uzemljenje.

Nagli prijelaz elektrona s područja više potencijala (baza) na područje nižeg potencijala (vrh zavojnice) rezultira padom napona na bazi, što tranzistor registrira i prestane propuštati struju.

Struja sada ne može ići gornjom granom kruga, tj. linijom manjeg otpora. Magnetsko polje pada na nulu, ponovno se mijenja magnetski tok kroz zavojnicu, elektroni sada kreću prema dolje u sekundaru, ali ne u ravnotežno stanje već prolaze sve do baze, gdje se ponovno registrira napon, tranzistor otvara sklopku i ciklus kreće ispočetka.

Na taj način krug titra, to se događa iznimno brzo (ovisno o frekvenciji tranzistora, u prosjeku 200 MHz), tako da se niti ne primjećuje da postoji kratka pauza između paljenja i gašenja tranzistora. Zbog toga imamo visokofrekventnu struju.

Ovim principom, bez velikih proračuna unaprijed, ali i bez rezonancije, naš demonstracijski uređaj će titrati.

Ukoliko bi htjeli da ovaj uređaj radi u rezonanciji, moguće je napraviti približan proračun rezonantne frekvencije oslanjajući se na geometrijske faktore, iako će biti potrebno dodatno ugađanje jednom kad je uređaj napravljen. Preporuča se ugađanje frekvencije primara frekvenciji sekundara zbog praktičnosti namatanja, ali nije uvjet.

Ugađanje u rezonancu je način žarulja zasvijetli najjačim sjajem obzirom na dane parametre kruga, jer se ostvaruje maksimalan prijenos energije sa minimalnim gubicima. Osim tog načina prepoznavanja da je sustav u rezonanciji, možemo provjeriti i osciloskopom.

Faktor dobrote našeg kruga možemo izračunati tako da računamo ukupnu energiju koja ulazi u krug iz baterije i sve gdje bi se energija mogla izgubiti – toplina (zagrijavanje elemenata), zračenje... Možemo procijeniti po sjaju žarulje koliko otprilike se energije izgubilo. Ako žarulju priključimo na izvor izmjenične struje i zapamtimo sjaj, onda pri primicanju žarulje sekundaru možemo procijeniti koliko se energije izgubilo i da li bi faktor dobrote bio velik ili malen broj.

Iz praktičnih razloga rezonantni dio izrade je preskočen, djelomično jer je shema preuzeta od već isprobanog uređaja sa sličnim karakteristikama (razlika je u debljini žica, promjeru zavojnice, otporu opornika i sl.), pa je bilo poznato da će uređaj raditi u ili blizu rezonance, a djelomično da se pokaže kako uređaj može upaliti žarulju i ako nije strogo rezonantna veza.

Zašto se žarulja upalila?

Promjenjivo magnetno polje uzrokuje električno polje duž lampe i stvara se razlika potencijala od mjesta gdje mi dotičemo lampu i njenog početka. U fluorescentnoj lampi se ionizira živin plin, pobuđuju se živini elektroni u viša stanja, a vraćajući se u svoja niža stanja emitiraju ultravioletne fotone koji pobuđuju elektrone fosfora tankog sloja kojim je premazana stijenka žarulje. Kada se elektroni fosfora vraćaju u svoja niža stanja emitiraju foton vidljive valne duljine. Kako fluorescentna lampa ne zna odakle je došlo električno polje i da li je napon iz gradske mreže ili ne reagirati će na električno polje i upaliti se.

Ako želimo da nam se žarulja upali bez da je mi rukom dotičemo (mi smo uzemljeni što olakšava proces), onda je potrebno dosta snage, a to nužno znači jače zagrijavanje tranzistora.

6.2. Izrada uređaja

Potrebni dijelovi i alati za izradu demonstracijskog uređaja: [12]

- zavojnica (L_1), izolirana žica debljine 0,35 mm, 6 namotaja
- zavojnica (L_2), žica debljine 0.25 mm, 900 namotaja
- tranzistor 2N2222 (nekoliko komada)
- led dioda (nekoliko komada)
- otpornik otpora 22 k Ω
- prekidač (nije nužan)
- baterija 9 V
- pločica za lemljenje (u našem slučaju pertinax i bakrena pločica)
- pinovi, nekoliko žica za spojeve
- vodovodne cijevi \varnothing 7,4 cm i \varnothing 11,0 cm, izolir traka, lak na bazi vode
- alati za izradu: EAGLE, UV lampa sa stalkom i zaštitom, NaOH, FeCl₃, alkohol, bušilica na stalku, svrdla \varnothing 0.5 mm, ubodna pila

Proces izrade Tesline zavojnice je ujedno i najduži proces, jer zahtjeva 900 preciznih namotaja na sekundar vrlo tankom bakrenom žicom. Stoga je pametno prvo krenuti od toga.

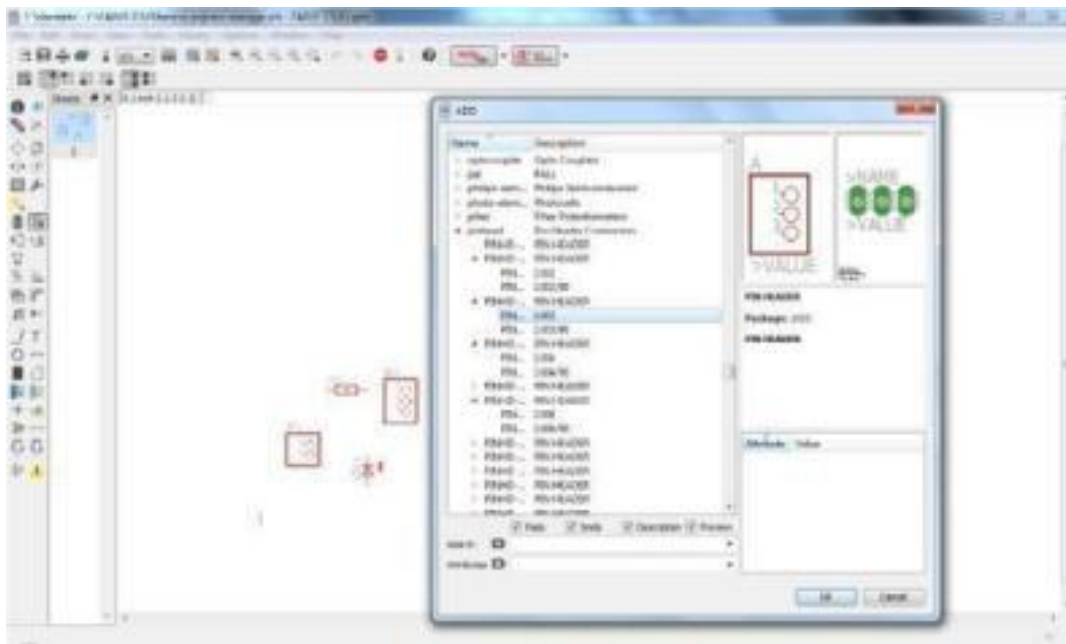
Zavojnicu sekundara namatamo na plastičnu vodovodnu cijev promjera 7,4 cm žicom debljine 0.25 mm. Cijev ne mora nužno biti vodovodna, ali ne smije biti od metala. Namatanje tako tankom žicom je nezgodan dio, jer se žica nakon nekoliko namotaja na cijevi pomakne ili namota jedna preko druge što u konačnici uzrokuje magnetno polje nepravilnog oblika.

Kako bi to izbjegli, cijev prvo premažemo tankim slojem bezbojnog laka na bazi vode, a početak žice prilijepimo sa malo izolir trake. Dobro je početi s nekom udaljenošću od kraja cijevi. Namatamo žicu pazeći da nema prevelik razmak između namotaja ili da se preklapaju. Pri završetku namatanja, kraj ponovno pričvrstimo izolir trakom, a cijelu zavojnicu premažemo slojem laka te ostavimo da se osuši.

U našem slučaju, lak služi za učvršćivanje namotaja, ali pri vrlo visokom naponu ujedno je i izolacija.

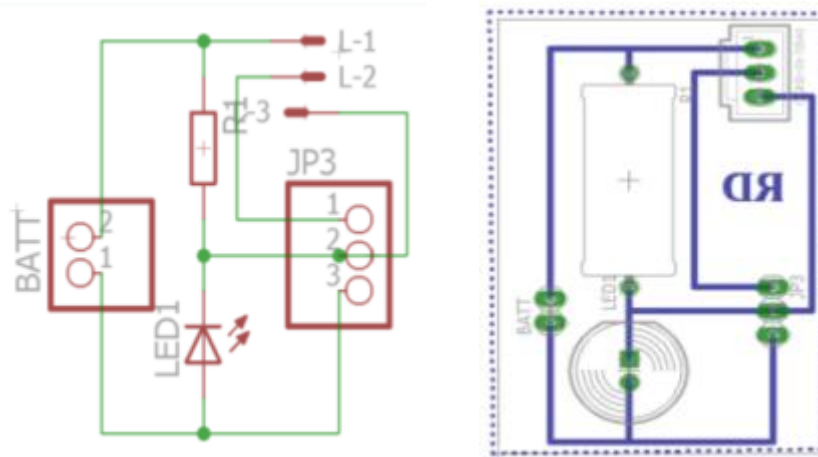
Sljedeći korak je izrada tiskane pločice na koju ćemo polemiti sve elemente kruga. Izgled kruga dizajniran je u programu EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor) koji je besplatan softver za neprofitabilne i edukacijske svrhe, a dostupan je od proizvođača CadSoft. [6]

Print za pločicu izrađujemo prema shemi na Slici 16., ali unutar programa, ona ne mora nužno biti tako dizajnirana. Važno je jedino da su svi elementi spojeni prema tom sklopu, dakle uzemljenja i točke spajanja, kao i veličina pločice, tako da sve zajedno zauzme optimalan prostor na bakrenoj pločici.



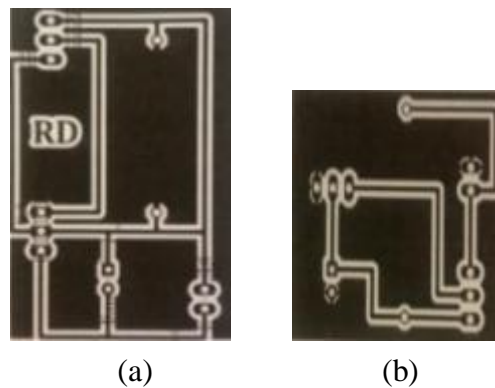
Slika 19. Kreiranje sheme u programu EAGLE

Nakon završenog dizajna u programu, otisnemo ga na prozirnicu u tri primjerka kako bi postigli što bolju prekrivnost dijela pločice koji ne želimo da bude osvijetljen UV lampom. Izrežemo samo shematski dio i lijepimo jedan za drugi što preciznije kako se folije ne bi pomakle tijekom osvjetljavanja. [2]



Slika 20. Konačni izgled kruga u EAGLE-u na shemi (lijeva slika) i kako će biti otisnut na ploči (desna slika)

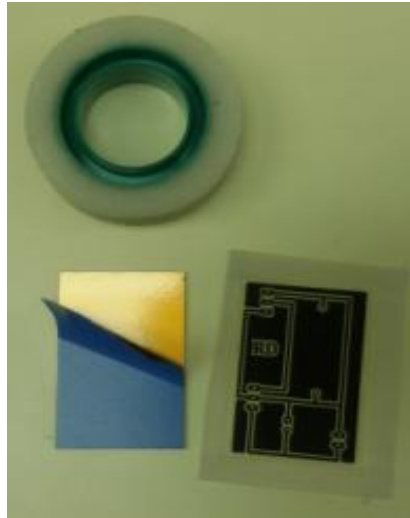
Mi smo koristili gotovu pločicu s bakrenim slojem i foto osjetljivim premazom. Obzirom da se u programu EAGLE može i pisati, dobro je staviti ime sklopa za lakšu orijentaciju.



Slika 21. Izgled pločice u stvarnoj veličini na prozirnici: a) 2,9 x 4,4 cm
b) 2,8 x 3,3 cm

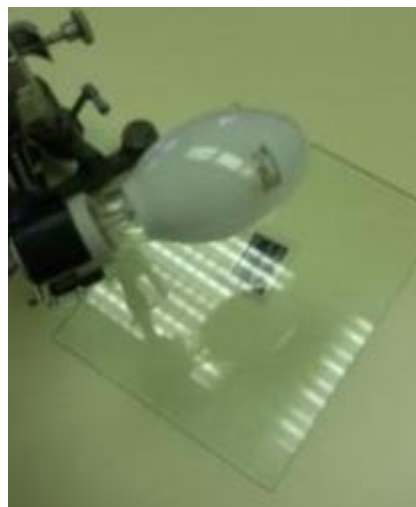
Vidimo dva izgleda potpuno različita iako se radi o istom krugu. Kao što smo napomenuli, nije potrebno da konačni izgled pločice bude kao na shemi. U praksi se to ne radi, jer je izrazito neekonomično (ostavlja previše praznog prostora) i nevažno. Ali, za potrebe rada izrađena je jedna pločica koja identično odgovara shemi kruga na Slici 22.a kako bi se moglo lakše demonstrirati povezanost elemenata kruga. Ekonomičnija pločica je na Slici 22.b. Oba kruga rade.

Izrezanu foliju pričvrstiti na pločicu koju smo prethodno izrezali na jednaku dimenziju ubodnom pilom, odlijepiti zaštitnu foliju sa pločice i pričvrstiti sve skupa staklom ili nečim što propušta UV zračenje.



Slika 22. Lijepljenje prozirnica i priprema za osvijetljavanje

Vrijeme osvijetljavanja ovisi o snazi lampe, udaljenosti lampe od pločice kao i o materijalu kojim smo pričvrstili pločicu (staklo, pleksiglas...). Stoga je potrebno lampu kalibrirati ili imati već gotove parametre za lampu kako bi osigurali optimalno osvijetljenje. Ova pločica je osvijetljena na 23 minute na udaljenosti od 15 cm. Prekratko i predugo osvijetljavanje će rezultirati lošim spojevima na pločici.



Slika 23. Osvijetljavanje pločice UV lampom

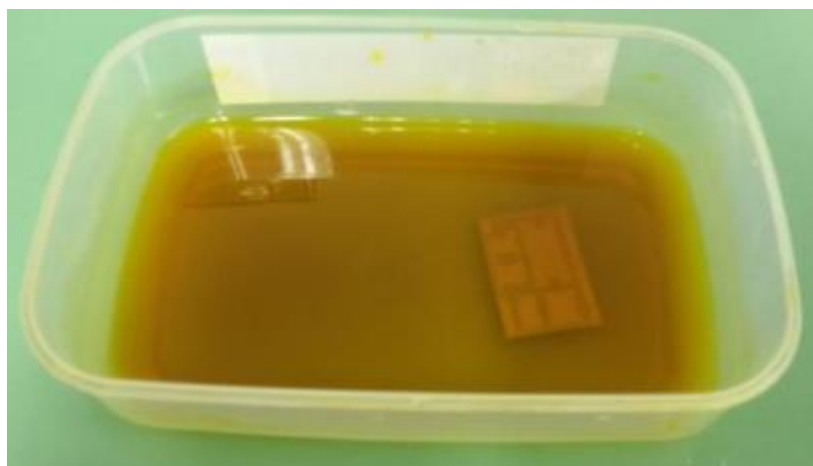
Kada je to gotovo, skida se predložak, a pločica se stavlja u otopinu natrijevog hidroksida (NaOH) uz miješanje na otprilike jednu minutu.



Slika 24. Pločica u otopini NaOH

Zatim pločicu isperemo i stavljamo u otopinu željezo (III) klorida (FeCl_3) uz miješanje. Ovaj spoj uklanja nagriženi sloj bakra s pločice. Može se dogoditi da sloj ne silazi, što znači da ili nije bilo dovoljno dugo osvjetljeno ili nije bilo dovoljno nagriženo. Također se može dogoditi da tekućina nagriža previše vodove, a to znači da su bili predugo osvjetljeni ili u otopini natrijevog hidroksida.

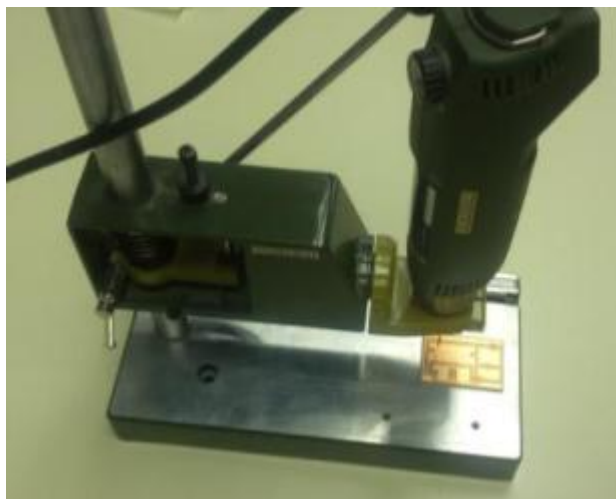
Radeći pločicu, nama se dogodio ono prvo, isprali smo pločicu i vratili je u natrijev hidroksid na još minutu te ponovo stavili u FeCl_3 . Možemo vidjeti kako se nazire naš sklop.



Slika 25. Pločica u otopini FeCl_3

Nakon ovoga, pločicu isperemo vodom i alkoholom da se uklone nečistoće i foto sloj. Osušena pločica spremna je za bušenje rupica predviđenih za elemente kruga.

Bušiti treba odgovarajućim svrdlima ovisno o debljini nožica komponenti koje lemimo, u našem slučaju to je \varnothing 0.5 mm. Kako bi precizno izbušili rupe, bušilica je učvršćena na stalak. Sa svim izbušenim rupama, pločica je spremna za spajanje i lemljenje komponenti.



Slika 26. Bušenje rupica u pločici

Pinove za bateriju, tranzistor i zavojnice proguravamo na obrnutoj strani pločice, a lemimo na strani na kojoj smo otisnuli shemu (Slika 28.).

Ovom dijelu izrade također treba pristupiti precizno koristeći lemilicu i tinol. Vrh lemilice ne smijemo držati predugo kako se ne bi oštetio sloj bakra, ali ni prekratko, jer to neće ispravno zalemiti spoj.

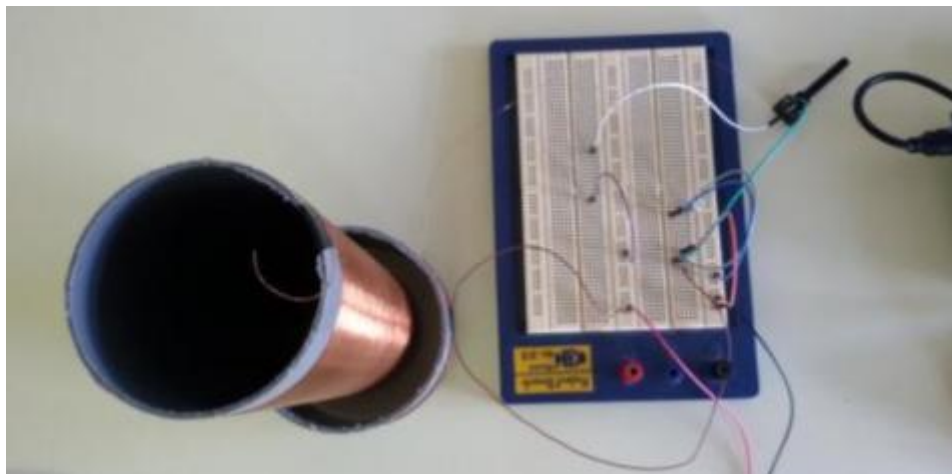


27. Izbušena pločica spremna za lemljenje



Slika 28. Ispravno lemljenje

Ako je proces izrade pločice prekomplikiran za izvođača ili nemoguć, ovaj spoj može se jednostavno zalemiti na gotovi pertinax. Mi smo napravili i takav spoj kako bi bili sigurni da su krug i elementi ispravni te da uređaj radi prije izrade bakrene pločice.



Slika 29. Sastavljen testni krug

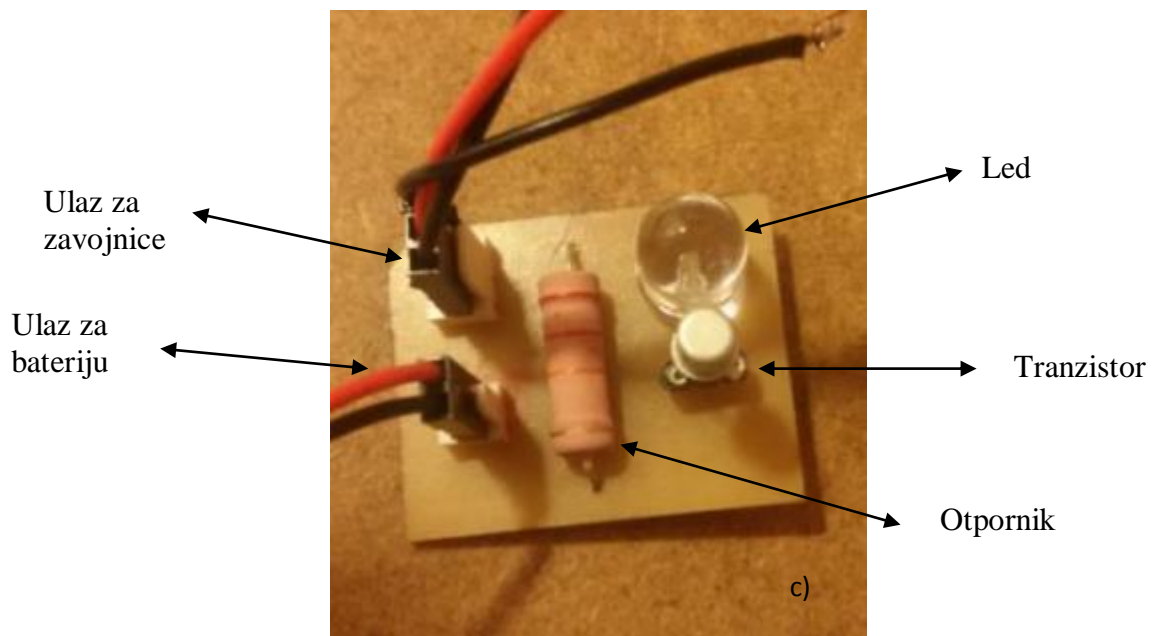
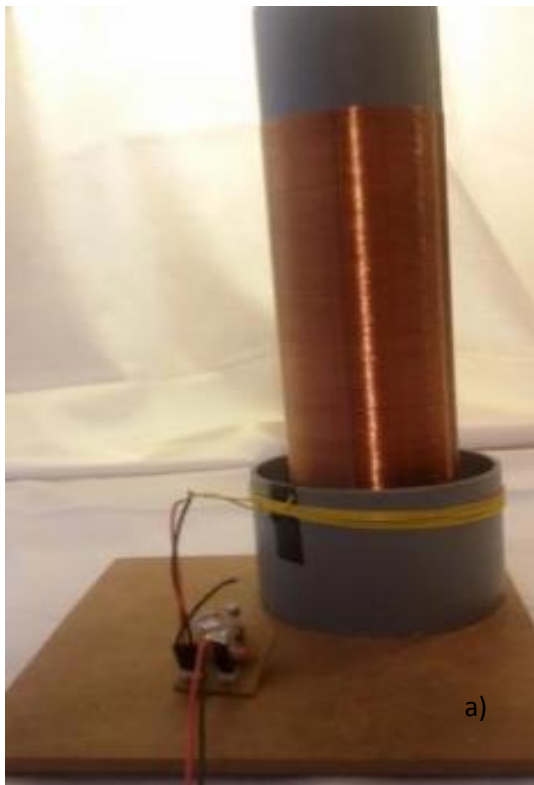
Nakon što smo zalemiti sve elemente, potrebno je još napraviti hladnjak za tranzistor. Postoje gotovi hladnjaci za kupiti (i ovaj kojeg smo mi koristili je gotovi hladnjak), ali ne odgovara ovom tranzistoru. Problem smo riješili tako da smo polemili vijak i maticu na taj hladnjak skupa sa držačem za osigurače u je čiji utor tranzistor sjeo. Tako jednostavno možemo zamjeniti tranzistor ukoliko pregori bez nepotrebnog odlemljivanja. Električni sklop može se dodatno premazati posebnim lakom da bi se zaštitili vodovi od oksidiranja, ali nije uvjet.

Ostaje nam samo još namotati primar sa 6 namotaja izoliranom žicom na vodovodnu cijev promjera 11 cm, koju stavljamo okolo sekundara i spajamo u pinove na pločici pazeći na njihov smjer.



Slika 30. Hladnjak za tranzistor

Uređaj je gotov i spreman za testiranje. Prinosimo fluorescentnu žarulju koja bi se trebala upaliti.



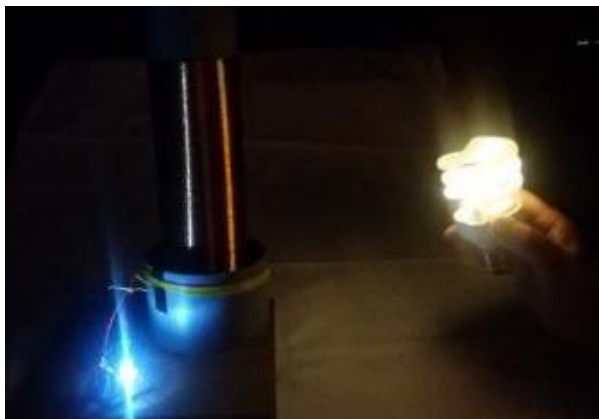
Slika 31. a) i b) Gotov uređaj sa sklopom i zavojnicama. Zavojnice su zaljepljene pištoljem za ljepilo na šperploču
c) Sastavljen sklop sa dijelovima. Na tranzistor treba još doći hladnjak



Slika 32. Flourescentna žarulja od 4 W
ugasila se na udaljenosti 42 cm



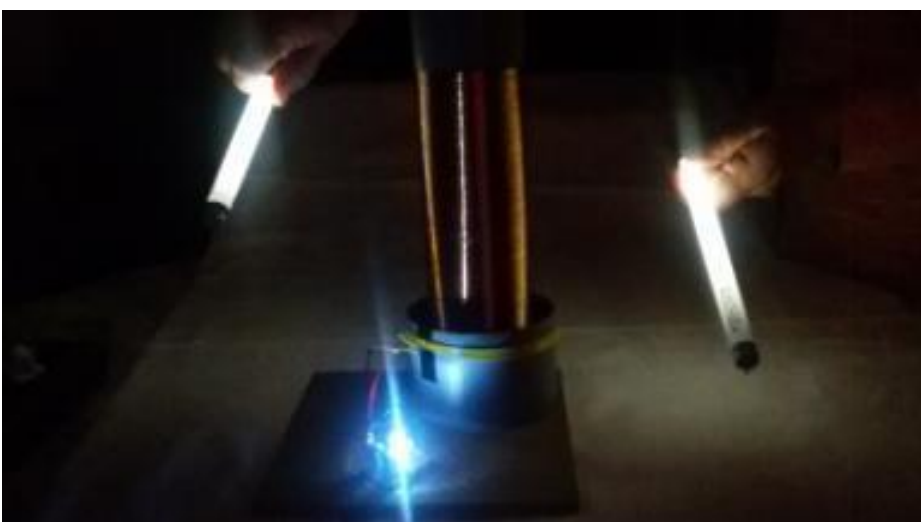
Slika 33. Flourescentna žarulja od 6 W
ugasila se na udaljenosti 26 cm



Slika 34. Flourescentna žarulja od 20 W
ugasila se na udaljenosti 13 cm



Slika 35. Upaljena žarulja od 6 W bez
dodirivanja. Svijetli slabim
intenzitetom i kratko u
odnosu na to kad je držimo
rukom na istoj udaljenosti



Slika 36. Intenzitet žarulje opada sa udaljenošću od uređaja

Uz dovoljno jak napon moguće je postići da se u okolini uređaja zapale ili zagore šibice, papiri i sl. te da se nekim elektroničkim uređajima poput mobitela i računala poremeti rad. Ljudi koji imaju ugrađene uređaje na principu indukcije (bypass, inzulinske pumpe, kontrolore želučane kiseline itd.) trebali bi izbjegavati boraviti u blizini.



Što ako žarulja ne svijetli?

1. Dioda nije okrenuta naopako. Da, ovdje dioda mora biti naopako krenuta, tj.njen pozitivan pol mora biti uzemljen u ovom strujnom krugu (duža noga led diode mora biti spojena na minus od baterije, tj.uzemljenje).
2. Smjer struje u primaru i sekundaru. Oni moraju biti u suprotnim smjerovima! Naime, smjer elektrona iz sekundara aktivira tranzistor. Putujući u suprotnom smjeru neće aktivirati bazu tranzistora u pravo vrijeme, stoga neće biti oscilacija.
3. Iako je sve ispravno postavljeno, ali led dioda ne gori. Moguće je da sama po sebi potroši snagu ili da su zavojnice predaleko/premalo namotaja pa krug nije ni blizu rezonanciji.
4. Transformator je ili krivo zalemljen (zamjena nožica kolektora i emitera) ili je pregorio (tome služi veći broj transformatora u priboru).
5. Broj namotaja je premalen/prevelik. Nakon sastavljanja uređaja, potrebno je ugoditi neke sitnice, jer gotovo je nemoguće napraviti dva istovjetna uređaja, pa je potrebno podesiti broj namotaja. Najlakše je to s primarom.

Biti će potrebno možda dodatno ugoditi krug bilo promjenom otpora, diode ili broja namotaja kako bi dobili što bolji rezultat.

7. Demonstracijski uređaj u školi

Smisao izrade ovog i sličnih uređaja je da nastavnici fizike, također tehnike i srodnih predmeta u školi uvedu element vizualnog i taktilnog učenja.

Istraživanja govore u korist istraživačke usmjerene nastave u fizici koja svoju prednost pokazuje upravo u razbijanju pretkonceptija koje učenici imaju. Te pretkonceptije dolaze od osjećaja da se fizikale pojave sudaraju sa zdravim razumom.

U tom dijelu pokusi, programi i pomagala mogu olakšati objašnjavanje gradiva koje učenici i inače teško savladavaju. Jedno od tih gradiva je i elektromagnetizam sa pojavama električnih i magnetski polja, novih sila, indukcije i sl. jer su im to apstraktni pojmovi. Osim razumjevanja indukcije, različitih smjerova polja i stupa što je i inače problematično u nastavnoj teoriji, glavni problem kod ovog uređaja je vezan na princip rada.

Samim izgledom i postavom može djelovati kao da strujni krug nije zatvoren, obzirom da gornji dio zavojnice nije spojen nigdje već stoji u zraku. Tom dijelu pri objašnjavanju treba pristupiti temeljito kako ne bi ostao prostor za nejasnoće – strujni krug je zatvoren, mi smo uzemljeni, a između vrha sekundara i lampe poteče struja. Razlog leži u električnom i magnetnom polju oko zavojnice. Ta struja je vrlo malena i nije vidljiva golim okom, ali moguće je postići i vidljive iskre, kako smo već i opisali.

Ovaj uređaj može pronaći primjenu na nekoliko načina ovisno u kojoj školi se koristi, a može poslužiti i u druge edukacijske svrhe kao što je popularizacija znanosti.

Zbog jednostavnosti izrade i razumjevanja principa rada (nema velik broj komponenata) uzima se kao projekt za početnike.

Osnovne škole

U osnovnoj školi ovome treba pristupiti na fenomenološkoj razini u sklopu gradiva elektromagnetske indukcije. Učenici 8. razreda uče o induciranom naponu i tada je uređaj zgodan za demonstraciju i povezati što sve radi na tom principu (npr. el.četskica za zube) . Obzirom je uređaj veći, jasno su vidljivi dijelovi zavojnica, otpornika i ledice pa ujedno imaju priliku i s tim se upoznati. Sve je to napajano baterijom, pa se odmah naslanja na gradivo oko potrošnje električne energije. [8]

Gimnazije

Gimnazijski program obuhvaća sve gradivo koje je potrebno za razumjevanje rada ovog uređaja – indukcija i električni titrajni krugovi, pa se ovdje on može koristiti kao vizualno pomagalo i kao nadopuna tom gradivu. Posebno je to izraženo kod prirodoslovno matematičkih gimnazija. U sklopu nekih izvannastavnih aktivnosti, može se i izraditi uređaj.

Osim toga, učenici mogu vidjeti elemente (otpornik, zavojnica, led dioda...) i pratiti shemu kako elementi spojeni u krug. Također, može se žaruljom ispitivati postojanje električnog polja u okolini sekundara i ovisnost intenziteta o udaljenosti. Energetski dio može se obraditi i mjerenjem udaljenosti na kojoj različite žarulje prestaju svijetliti. Upotreba tranzistora može se jednostavno opisati kao upotreba sklopke. Vizualni efekti žarulje mogu pomoći u boljem pamćenju i povezivanju gradiva, a dobro je podsjetiti ih i na višestruke primjere uređaja koji rade na principu indukcije. [3]

Strukovne škole

Ovdje demonstracijski uređaj može naći višestruku svrhu – i u izradi i u teoriji. Poseban naglasak treba staviti na elektrotehničke škole gdje učenici mogu razumjeti kompletan princip rada i objediniti sve naučeno u teoriji. Na taj način, unutar projekta ili vježbi, razvijamo njihove motoričke sposobnosti, razmišljanje, kreativnosti i upotrebu znanja stečenog na nastavi fizike, koje dobiva svoj oblik u stvarnom životu.

Dijelovi za sastavljanje ovakvog uređaja su jeftini i dostupni, a nije nužno da se pločica izrađuje, ukoliko nedostaju neki djelovi ili alati. Može se jednostavno lemiti na pertinax ili na eksperimentalne ploče bez lemljenja.

Učenici se mogu igrati sa brojem namotaja kako bi otkrili što znači rezonancija i kako je postići, ali je svakako važno prethodno ih uputiti u sigurnost rada.

Osjećaj postignuća svojim samostalnim radom (uz vodstvo nastavnika) je na vrhu Bloomove taksonomije znanja, a rezultira spretnim, sposobnim i motiviranim stručnjacima. [3]

8. Zaključak

Električne i magnetske pojave dugo su predstavljale zagonetku i nisu se dovodile u međusobnu povezanost niti sa prirodom koja nas okružuje. Danas znamo da one opisuju velik broj fizikalnih fenomena od atoma pa sve do živih bića.

Vidjeli smo koliko je bežični prijenos napredovao tijekom godina od fundamentalnih principa Maxwellovih jednadžbi do danas ostvarene primjene, a taj napredak se ubrzava i u 21.st.. Taj skok ne bi bio moguć bez Teslinih eksperimenata sa induktivnom vezom, ali ni većih vizija o Svjetskom bežičnom sustavu.

Upravo je to bila motivacija za ovaj diplomski rad – ukazati na preveliku mistifikaciju Teslinih vizija, razjašnjavanje njegovih ideja i eksperimenata fizikalnim zakonima i pojavama te izrada uređaja na principima elektromagnetne indukcije upotrebom Tesline zavojnice.

Pri izradi ovog uređaja prošli smo i cjeline u elektromagnetizmu koje je moguće obraditi unutar školskog kurikulumu. Odluka je na pojedinom nastavniku da ocijeni koliko je primjereno iskoristiti za pojedini stupanj obrazovanja. Ovakvi uređaji, koji nisu klasična pomagla u nastavi fizike, omogućuju uključivanje cijelog razreda i cijeli spektar različitih sposobnosti učenika od teorijskog znanja do praktičnog, ali i spretnost, domišljatost, kreativnost...

Zbog vizualnih efekata koje je moguće ostvariti ovim uređajem, učenici se mogu zabavljati i učiti, što je rijedak spoj, ali na nastavi fizike se može ostvariti.

Iako je to lakše reći nego napraviti, konstantnim motiviranjem nastavnika i učenika mogu se postići visoki rezultati, ugodnija i dinamičnija atmosfera na nastavi.

Dodatak

A. EAGLE program

Početak izrade pločice počinje sa preuzimanjem programa EAGLE, proizvođača Cadsoft, koji je u edukacijske svrhe besplatan, ali ima i drugih licenciranih opcija na stranici:

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


Pod opcijom *Downloads* i *Eagle Freeware* otvorit će se prozor koji će ponuditi opciju spremanja programa (napomena - odabrati ispravan operativni sustav). Pokretanje instalacije je jednostavno, odabiru se opcije spremanja i za 3-5 min može se početi raditi u EAGLE-u.

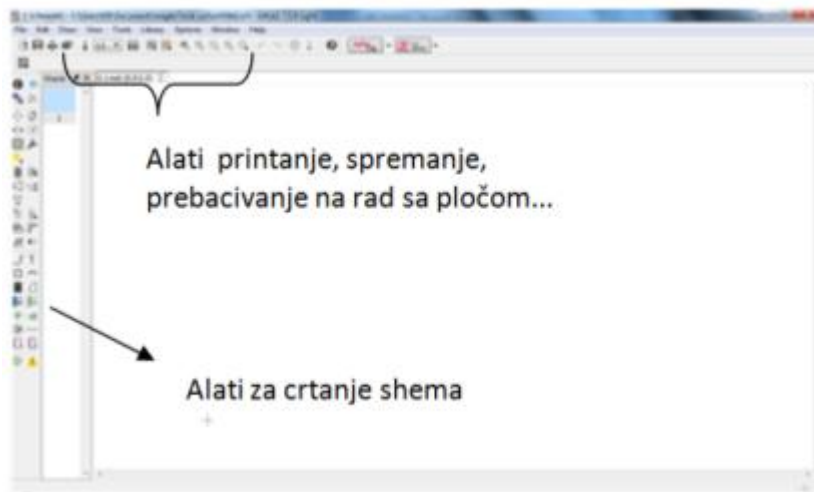
Nakon otvaranja EAGLE-a u njegovoj upravljačkoj ploči (*Control Panel*), prvo otvaramo i imenujemo projekt koji ćemo raditi.



Slika 1. Otvaranje novog projekta: *File* → *New* → *Project*

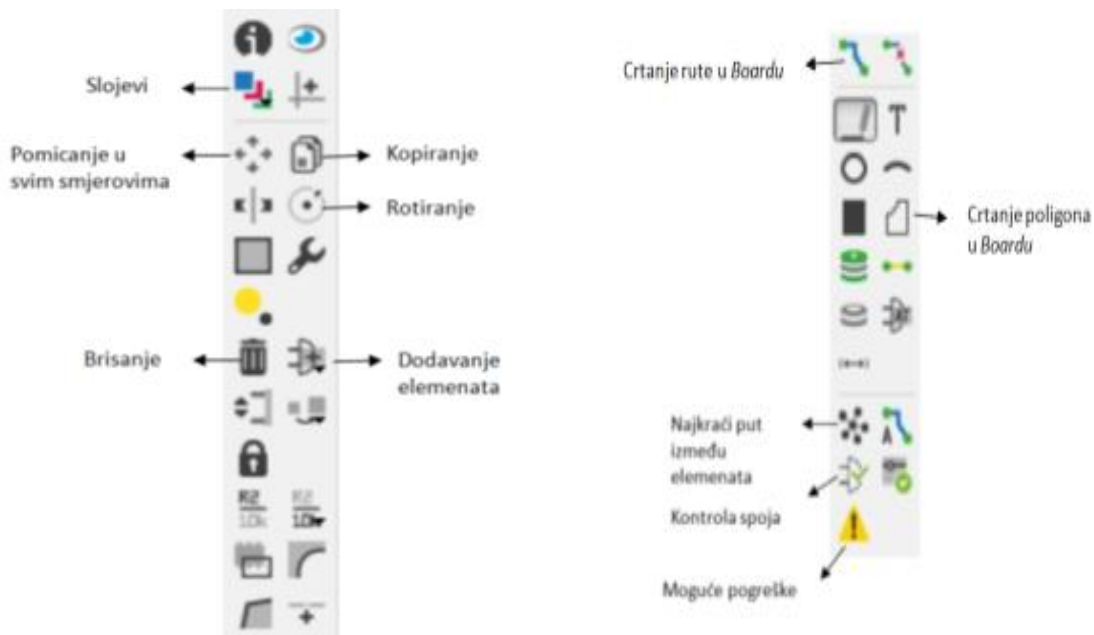
Otvora se projekt kojeg imenujemo po želji. Ovdje smo ga imenovali Tesla coil. Kada kraj njega svijetli zeleno svjetlo, znači da je taj projekt aktivan. To je dobrodošlo u slučaju puno projekata i shema. Ukoliko želimo izbrisati projekt, onda se koristimo desnim klikom miša i opciju *Delete*.

Prvo, crtamo sklop prema shemi koju imamo na Slici 16. pa koristimo ponovno opciju *File* → *New* → *Schematic*. Otvara se prozor koji je  sada zapravo naša ploha za crtanje. Na gornjoj i desnoj strani nalaze se alati za crtanje, spajanje i izbornici elemenata.



Slika 2. Izgled prozora za crtanje sheme (Schematic)

Upoznat ćemo se sa opcijama koje smo koristili za izradu sheme.



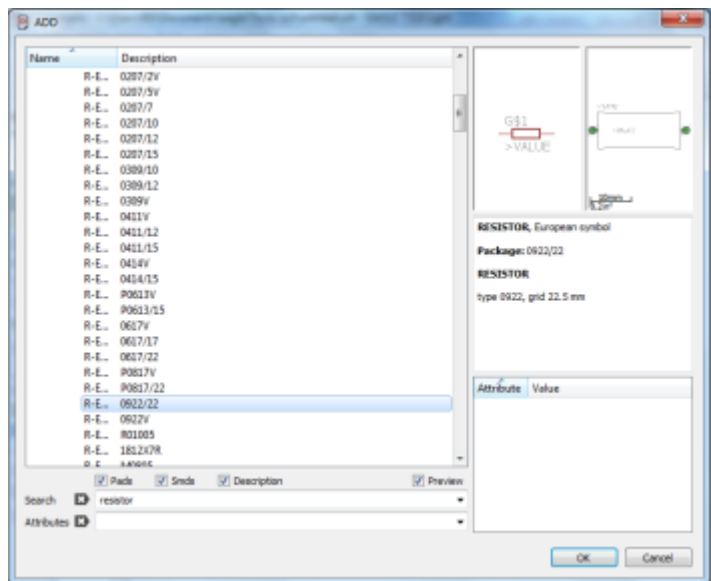
Slika 3. Alati za crtanje sheme u EAGLE-u na desnoj strani

Započinjemo crtati. Prvo, opcija dodavanje elemenata →

Otvora se prozor sa svim elementima, a možemo si pomoći sa opcijom pretražitelja (Search) na dnu prozora. Na toj opciji nudi nam se pregršt različitih elemenata za izabrati. Pažnju treba obratiti na raspored koji će imati i dimenziju kako bi znali koji element uzeti. Na taj način, nećemo imati problem premalog razmaka između rupica.

Prvo dodamo sve elemente koji su nam potrebni:


- otpornik (resistor → European symbol → 0922/22)
- pinovi (pinheads → C Grid0270543) 2x - pinovi za tranzistor i zavojnice
- pin (pinheads → 1x02) 1x - pin za bateriju
- led dioda (led → 10 mm)



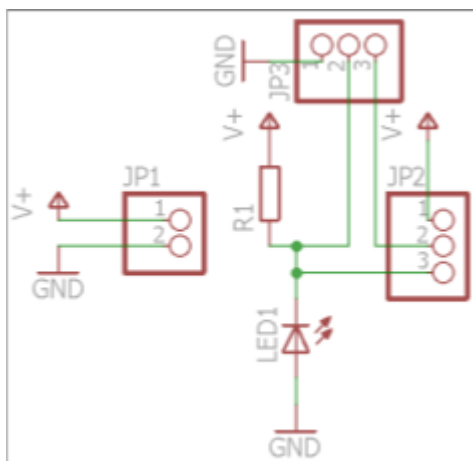
Slika 4. Primjer odabiranja elemenata (ovdje otpornika). Na lijevoj strani je izbornik, a na desnoj strani prozora se pokazuju simbol, izgled otpornika na pločici i dimenzije. Izbor potvrđujemo dvostrukim klikom ili sa OK.

Kada odaberemo neki element on se automatski pokazuje na shemi i klikom miša otpuštamo element na željeno mjesto. Međutim vidjet ćemo da se element i dalje pojavljuje zajedno sa kursorom. Razlog je što možemo otpuštati onoliko elemenata koliko želimo.


Opcijom ESC će nam se ponovno otvoriti izbornik.

Ako smo stavili sve elemente koje trebamo, možemo ih opcijama pomicati, brisati, rotirati kako nam odgovara. Zatim krećemo sa spajanjima elemenata opcijom *Net* → 

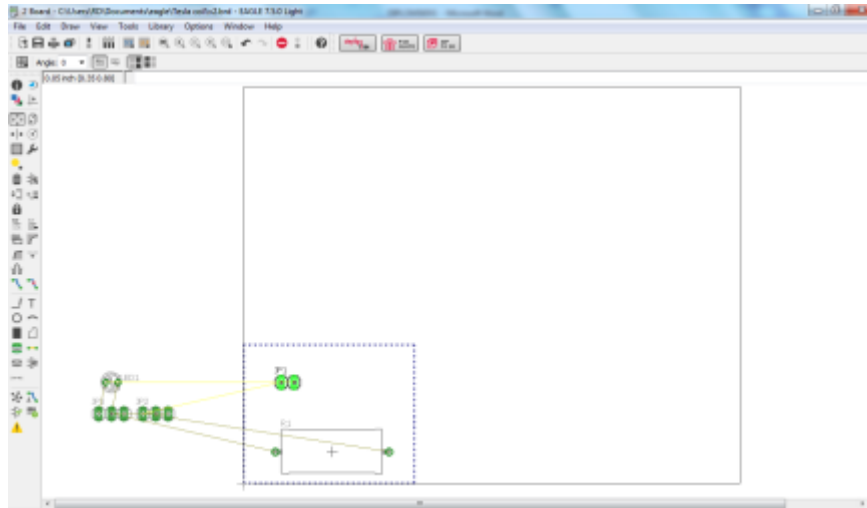
Uz pomoć miša se krećemo i pravimo spojeve od elementa do elementa, kako nam je najkraće i najzgodnije. Sada se na shemi, žice smiju i presjecat, važno je samo da imamo spojen krug. Možemo crtati točno kako je na shemi, a možemo elemente poslagati i drukčije. Ako elementi nisu kao u krugu, onda ne moramo sve žice povlačiti, možemo samo pridodijeliti polove baterije vrijednosti +V tamo gdje će biti plus, a GND (uzemljenje, minus) na minus stranu pina za bateriju. Tada svim ostalim elementima možemo također pridodijeliti +V gdje je spoj sa plus stranom i GND gdje je uzemljenje. Ostale povezujemo žicama.



Slika 5. Primjer sheme spoja gdje su pridjeljene vrijednosti točkama uzemljenja i pozitivnog pola baterije

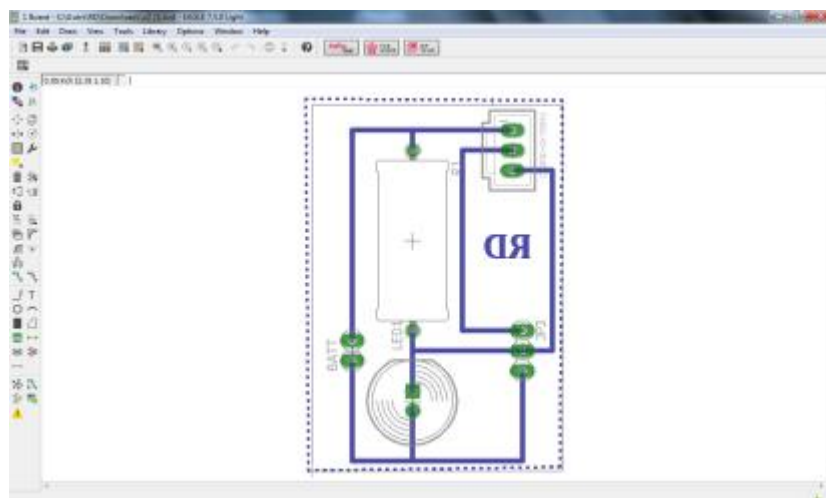
Nakon provjere spoja, prelazimo na rad sa izgledom pločice. Izaberemo u gornjoj traci opciju prebacivanja na pločicu (*Generate/Switch to board*) na ikonici → . Klikom na OK, otvara se novi prozor i sad se radi u *Boardu*.

Ovo je vrlo slično kao i u *Schematic* sa gotovo identičnim alatima. Sa lijeve strane se nalazi naš sklop kako ga je EAGLE spojio. Prvo, uokviriti dimenziju pločice na desnoj ploči opcijom *Polygon*, zatim pomičemo elemente jedan po jedan unutar tog poligona. Žute niti su žice.



Slika 6. Izrada sklopa

Kada smo dovukli sve elemente, onda će EAGLE opcijom za najkraći put pospajati elemente u sklopu. To nije nužno i najbolje riješenje pa sa opcijama pomicanja i rotiranja možemo osmisлити najekonomičniji izgled pločice. Obzirom da ne možemo jetkati tako sitne i tanke retke, na opciji crtanja u Boardu (*Route*) se otvara na gornjoj traci izbornik gdje odaberemo širinu (*Width* → 0.024). Klikom miša ponovno spajamo te elemente. Spojeni elementi trebaju proći provjeru, a kada je sve u redu na donjoj traci će pisati da nema više ništa za provjeru ili da je sve 100% napravljeno. Tada je sklop spreman za printanje. Odaberemo na ikoni za slojeve (*Layer*) samo *Bottom*, *Pads* i *Vias* koji postaju vidljivi na *Boardu* i samo to se printa.



Slika 7. Gotov sklop za printanje

Ukoliko želimo ostaviti inicijale, ime sklopa ili neku orijentacijsku oznaku, EAGLE ima opciju pisanja ili uvoza slikovnog teksta . Obratiti pažnju samo na činjenicu da slova moraju biti zrcalna.

Printanje je na prozirnicu u 3 primjerka kako bi osigurali dobru zacrtnjenost dijelova koje ne želimo osvjetliti. Daljnji postupci lijepljenja prozirnice opisani su u poglavlju 6.2.

Za detaljnija objašnjenja i upute o ostalim opcijama unutar EAGLE programa mogu se skinuti njihove upute na stranici Cadsoft, izbornik Training & Service ili na linku:

<http://www.cadsoftusa.com/training-service/tutorials/>

B. Osvjetljavanje UV lampom

Prije postupka osvjetljavanja lampom ne zaboraviti skinuti zaštitnu foliju i staviti pod staklo ili pleksiglas. Koliko dugo će se pločica osvjetljivati ovisi o više faktora koje smo spomenuli u poglavlju 6.2., ali evo nekoliko standardnih vrijednosti:

| Izvor | Trajanje osvjetljenja | Udaljenost |
|---|-----------------------|------------|
| Žarulja sa živinim parama 80 W (naša žarulja) | 23 minute | 15 cm |
| Žarulja sa živinim parama 500 W | 2,5 minute | 50 cm |
| Žarulja sa živinim parama 1000 W | 1,5 minuta | 50 cm |

C. Pripremanje natrij hidroksida (NaOH)



Slika 8. NaOH u granulama

Natrijev hidroksid je bijela, neprozirna higroskopna (lako upija vlagu) kristalna kruta tvar, zbog čega se čuva u dobro zatvorenoj posudi nakon otvaranje vrećice.

Dobro i lako se otapa u vodi pri čemu nastaje vrlo jaka, nagrizajuća natrijeva lužina koja nagrizava organske tvari, a također i neplemenite metale. Često se koristi u prehrambenoj industriji, tekstilnoj i kemijskoj industriji.

Priprema: u plastičnoj posudi staviti jednu petinu vrećice kupljenog natrijevog hidroksida u 2 dcl vode dok se NaOH potpuno ne otopi. Pločicu staviti u posudu i pričekati minutu do minutu i pol. Počet će se pojavljivati sklop koji smo osvijetlili.

Standarni proces pravljenja je 7 g NaOH na jednu litru vode.

D. Pripremanje željezo (III) klorida (FeCl_3)



Slika 9. Željezo (III) klorid

Željezov (III) klorid je sol koja je također higroskopna, a industrijski se proizvodi u velikim količinama. Boja je smeđe – zelena.

Moguće je kupiti gotovi pripravak ili miješati ga sa vodom prema uputama proizvođača.

Otopina se priprema tako da se u jednoj litri vode otopi 250 g FeCl_3 .

E. Bušenje pločice

Bušenje se odvija posebnim bušilicama i svrdlima. Bušilice dolaze sa stalkom na koji su pričvršćene kako bi se osigurala stabilnost. Svrdla su vrlo tanka, jer su rupice malog promjera i često gusto složene. U principu trebaju se koristiti velike brzine vrtnje, a onda je i provrt bolji i čišći. Promjer svrdla trebamo prilagođavati debljini nožica elemenata. U našem slučaju to je bilo $\varnothing 0.5$ mm.

Naravno, mogu se koristiti i obične akku bušilice sa steznim glavama dovoljnim da možemo stegnut tanka svrdla.

F. Lemljenje



Posljednji i najvažniji korak u izradi pločice je lemljenje. Za ovo nam je potrebna lemilica i tinol. Preporuča se napraviti nekoliko lemova kako bi uvježbali prije lemljenja pločice, jer nije dobro puno puta lemiti i odlemljivati spojeve.

Slika 10. Lemilica na postolju sa čistačem

Ispravno lemljenje se izvodi vrhom lemilice kojim zagrijavamo nožicu elementa i mjesto na koje će ono doći. Prinesemo tinol koji se prvi otopi po cijelom spoju i kad odmaknemo lemilicu, nakon kratkog hlađenja, ostane glatki spoj srebrne boje. Nije ispravno zagrijavati tinol i „kapljicu“ tinola prenositi na spoj. Pripaziti na to da se dva spoja ne dodiruju, a na kraju je dobro provjeriti i ispravnost spojeva. Moguće je i da neki spoj nije dovoljno dobro zalemljen (ako nismo dovoljno dugo držali lemilicu) pa sklop neće raditi.

G. Ispravno postavljanje tranzistora i diode

Tranzistori dolaze kao NPN ili PNP spoj (razlika u nosiocima struje) u različiti oblicima i veličinama. Neovisno o spoju, tranzistor treba znati ispravno spojiti u strujni krug. Svaka od nožica predstavlja bazu,emiter i kolektor, a to treba znati prepoznati.

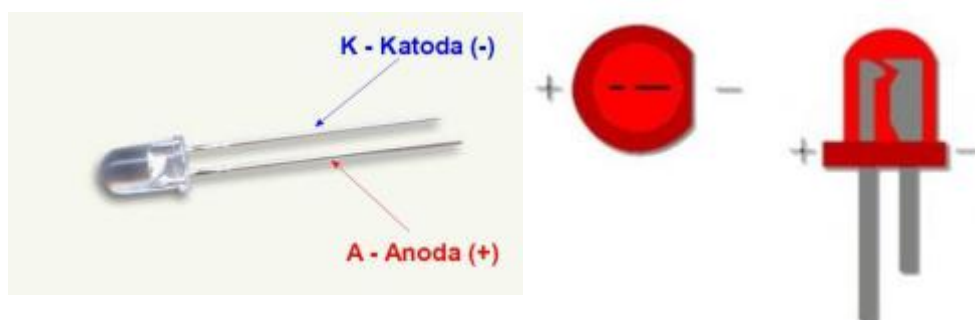
Okrugli tranzistor obično dođe sa jednom stranom ravno odrezanom. Ako tu odrezanu stranu okrenemo prema sebi, onda je raspored kao na Slici 13 (lijevi crtež).

Okrugli tranzistor može doći i bez odrezane strane, ali onda ima kapicu koja označava kako se orijentirati. Nožica uz tu kapicu je emiter što se vidi na Slici 13. (desni crtež). Uvijek je potrebno provjeriti za svaki tranzistor zasebno raspored baze, emitera i kolektora.



Slika 11. Tranzistori različitih oblika

Uključivanje diode u sklop također zahtjeva prepoznavanje na koji način ćemo je okrenuti kako bi uređaj radio. Dioda obično imaju jednu nožicu dužu od druge i ta je anoda. Također, nožice mogu biti jednake duljine, ali onda ima jednu stranu ravno odrezanu kao tranzistor. Nožica kraj te ravne strane je minus, tj.katoda.



Slika 12. Različite diode

Literatura

[1] Bomber, A. Wireless Power Transmission: An Obscure History, Possibly a Bright Future, 2006.

http://web.pdx.edu/~larosaa/Applied_Optics_464-564/Projects_Presented/Projects-2006/Andrew_Bomber_Report_Wireless_Power_Transmission_PH464.pdf,

siječanj 2016.

[2] Bilić, M. Izrada tiskanih pločica

<http://adria.fesb.hr/~markbili/stranica/index.html>, siječanj 2016.

[3] Brković, N. Fizika 3, udžbenik za 3.razred gimnazije, A inačica programa, Zagreb: Luk, 1998.

[4] Brković, N.; Pećina P. Fizika u 24 lekcije, 3 izdanje, Zagreb: Element, 2013.

[5] Cheney, M. Tesla, čovjek izvan vremena, Zagreb: Biovega, 2003.

[6] EAGLE, Cadsoft

<http://www.cadsoftusa.com/>, veljača 2016.

[7] Fassbinder, S. Wireless Energy Transmission, 2014.

http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/documents-and-links/cu0209_an_wireless_energy_transmission_v1.pdf, siječanj 2016.

[8] Kadić, Z.B; Brković N.; Pećina P. Fizika 8, udžbenik za 8. razred osnovne škole, Zagreb: Element, 2014.

[9] Kurs, A.; Karalais,A.; Moffatt, R.; Soljačić, M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances // Science, Vol.317 (2007), str. 83.- 85.

[10] Purcell, E.M. Elektricitet i magnetizam II, Zagreb: Tehnička knjiga, 1988.

[11] Shema kruga

<http://www.instructables.com/id/building-the-poor-mans-mini-tesla-coil-slayer-exc/>

siječanj, 2016.

[12] Slayer exciter

<http://slayerexciter.com/> , siječanj 2016.

[13] Tesla, N. Moji izumi, Zagreb: Školska knjiga, 1977.

[14] Wilson, K. Tesla Coil Design, Construction and Operation Guide

<http://www.teslacoildesign.com/>, listopad 2015.