Fizikalne osnove bežičnog prijenosa energije

Kojadin, Valentina

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:469117

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET SPLIT

FIZIKALNE OSNOVE BEŽIČNOG PRIJENOSA ENERGIJE

ZAVRŠNI RAD

VALENTINA KOJADIN
Matični broj: 48

Split, listopad 2019.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET SPLIT
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ
ZAŠTITA I OPORABA MATERIJALA

FIZIKALNE OSNOVE BEŽIČNOG PRIJENOSA ENERGIJE

ZAVRŠNI RAD

VALENTINA KOJADIN
Matični broj: 48

Split, listopad 2019.

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY
UNDERGRADUATE PROFESSIONAL STUDY
MATERIALS PROTECTION AND RECYCLING

PHYSICAL FOUNDATIONS OF WIRELESS ENERGY TRANSMISSION

BACHELOR THESIS

VALENTINA KOJADIN
Parent number: 48

Split, October 2019.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu
Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu
Preddiplomski stručni studij: Zaštita i oporaba materijala

Znanstveno područje: Tehničke znanosti
Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo
Tema rada je prihvaćena na 19. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko-tehnološkog fakulteta održanoj 23. studenog 2018.
Mentor: Dr. sc. Mirko Marušić, viši predavač

FIZIKALNE OSNOVE BEŽIČNOG PRIJENOSA ENERGIJE

Valentina Kojadin, matični broj: 48

Sažetak:

Nikola Tesla je radio na prijenosu električne energije na velike udaljenosti, dok danas, kada je veći dio svijeta opskrbljen žičanom električnom mrežom, mnogo je veća potreba za bežičnim prijenosom energije na manje udaljenosti, od utičnice do potrošačkog uređaja. Posljednjih nekoliko godina ovo postaje sve popularnija tema zbog povećanja broja elektroničkih uređaja koji se koriste u svakodnevnici i čije je baterije potrebno puniti. Bežični prijenos moguće je ostvariti na nekoliko načina: laserom, mikovalovima, ionizacijom zraka, induktivnom i rezonantnom induktivnom vezom. U radu su dane fizikalne osnove bežičnog prijenosa energije, posebno za induktivni i rezonantno induktivni prijenos te su predstavljeni ostvareni primjeri svakog pojedinog načina prijenosa energije.

Ključne riječi: Nikola Tesla, bežični prijenos energije, laser, mikrovalovi, ionizacija zraka, indukcija, rezonantna indukcija

Rad sadrži: 34 stranice, 20 slika, 35 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za obranu:

1. Izv. prof. dr. sc. Magdy Lučić Lavčević – predsjednik
2. Doc. dr. sc. Damir Barbir – član
3. Dr. sc. Mirko Marušić, viši predavač - član-mentor

Datum obrane: 30. listopad, 2019.

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u knjižnici Kemijsko-tehnološkog fakulteta Split, Teslina 10 (Ruđera Boškovića 35).

BASIC DOCUMENTATION CARD

BACHELOR THESIS

University of Split
Faculty of Chemistry and Technology Split
Undergraduate Professional Study Materials Protection and Recycling

Scientific area: Technical Science
Scientific field: Chemical Engineering
Thesis subject was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session no. 19 held on 23rd November, 2018.
Mentor: PhD, Mirko Marušić, senior lecturer

PHYSICAL BASICS OF WIRELESS TRANSMISSION OF ENERGY

Valentina Kojadin, parent number: 48

Abstract: Nikola Tesla has worked on long-distance transmission of electricity, whereas today, when majority of the world is supplied with wired electricity, there is a much greater need for wireless transmission of short-range energy from the outlet to the consumer device. Over the last few years, this has become an increasingly popular topic due to the increasing number of electronic devices used in our everyday lives and whose batteries need to be recharged. Wireless transmission can be accomplished in several ways: by laser, microwave, air ionization, induction and resonant induction. The paper presents the physical basics of wireless energy transfer, especially for inductive and resonant inductive transmission, and presents examples of each specific mode of energy transfer.

Keywords: Nikola Tesla, wireless transmission of energy, laser, microwave, air ionization, induction, resonant induction.

Thesis contains: 34 pages, 20 figures, 35 references

Original in: Croatian

Defence committee:

1. Magdy Lučić Lavčević – PhD, associate professor - chair person
2. Damir Barbir - PhD, assistant professor - member
3. Mirko Marušić - PhD, senior lecturer - supervisor

Defence date: October 30th, 2019.

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposed in the library of Faculty of Chemistry and Technology Split, Teslina 10 (Ruđera Boškovića 35).

Završni rad je izrađen u Zavodu za fiziku, Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom dr. sc. Mirka Marušića, u razdoblju od srpnja do listopada 2019. godine.

Zahvala

Zahvaljujem svom mentoru dr. sc. Mirku Marušiću na iznimnoj pomoći, strpljivosti i trudu prilikom izrade ovog rada. Posebno hvala mojim roditeljima, bez kojih ne bih bila ovdje gdje jesam. Također se zahvaljujem prijateljima, kolegama, cimericama koji su ispunjavali moj studentski život. I na kraju, veliko hvala Bogu, koji me vodio pravim putem kroz ove godine.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

- Prikazati povijest bežičnog prijenosa energije.
- Opisati rad Nikole Tesle na polju bežičnog prijenosa energije.
- Objasniti fizikalne principe različitih načina ovog prijenosa energije.
- Prezentirati ostvarene primjere svakog pojedinog načina promatranog prijenosa energije.

SAŽETAK

Nikola Tesla je radio na prijenosu električne energije na velike udaljenosti, dok danas, kada je veći dio svijeta opskrbljen žičanom električnom mrežom, mnogo je veća potreba za bežičnim prijenosom energije na manje udaljenosti, od utičnice do potrošačkog uređaja. Posljednjih nekoliko godina ovo postaje sve popularnija tema zbog povećanja broja elektroničkih uređaja koji se koriste u svakodnevnici i čije je baterije potrebno puniti. Bežični prijenos moguće je ostvariti na nekoliko načina: laserom, mikovalovima, ionizacijom zraka, induktivnom i rezonantnom induktivnom vezom. U radu su dane fizikalne osnove bežičnog prijenosa energije, posebno za induktivnu i rezonantnu induktivnu vezu te su predstavljeni ostvareni primjeri svakog pojedinog načina prijenosa energije.

Ključne riječi: Nikola Tesla, bežični prijenos energije, laser, mikrovalovi, ionizacija zraka, indukcija, rezonantna indukcija

SUMMARY

Nikola Tesla has worked on long-distance transmission of electricity, whereas today, when majority of the world is supplied with wired electricity, there is a much greater need for wireless transmission of short-range energy from the outlet to the consumer device. Over the last few years, this has become an increasingly popular topic due to the increasing number of electronic devices used in our everyday lives and whose batteries need to be recharged. Wireless transmission can be accomplished in several ways: by laser, microwave, air ionization, induction and resonant induction. The paper presents the physical basics of wireless energy transfer, especially for inductive and resonant inductive transmission, and presents examples of each specific mode of energy transfer.

Keywords: Nikola Tesla, wireless transmission of energy, laser, microwave, air ionization, induction, resonant induction.

SADRŽAJ

UVOD……..…....1

1. BEŽIČNI PRIJENOS ENERGIJE 2

1.1. Povijest bežičnog prijenosa energije..... 3

1.3. Wardenclyffe toranj..... 8

2. NAČINI BEŽIČNOG PRIJENOSA ENERGIJE..... 11

2.1. Laserski prijenos 11

2.2. Mikrovalni prijenos 15

2.3. Ionizacija zraka 18

2.4. Induktivna veza 19

2.5. Rezonantna induktivna veza 25

3. ZAKLJUČAK 30

4. LITERATURA 31

UVOD

"Možda ćete misliti da sam sanjalica i reći da idem predaleko ako Vam odam čemu se nadam u budućnosti. Mogu Vam reći da sa apsolutnim pouzdanjem vjerujem da ću slati poruke iz jedne zemlje u drugu i to bez žica! Također, pouzdano se nadam da ću na isti način, bez žica, prenositi električnu energiju bez gubitaka. U uspjeh bežičnog upravljanja i davanja znakova na daljinu više neće biti nikakve sumnje."

Nikola Tesla

Prije više od stotinu godina, Nikola Tesla zamislio je revolucionarni sustav bežičnog prijenosa energije. U to vrijeme, svijet nije prihvaćao takav pothvat. Danas smo svjedoci dolaska nove ere tehnologije te bi se moglo reći da je bežični prijenos preuzeo vodstvo u području prijenosa energije. Da bi život danas bio nezamisliv bez Teslinog najdražeg izuma, bežičnog prijenosa energije, uvjereni smo jer su potrebe današnjeg društva svedene na mobilnost, praktičnost i energetsku učinkovitost. Mobilni telefoni, pametni satovi, punjači, usmjerivači (routeri), slušalice i drugi razni uređaji čine skupinu bežičnih uređaja koja se sve više upotrebljava.

U ovom radu će se prikazati povijest bežičnog prijenosa energije s posebnim osvrtom na rad Nikole Tesle. Potom će biti promotreni različiti načini bežičnog prijenosa energije - prijenos laserom, mikovalovima, ionizacijom zraka, induktivnom i rezonantnom induktivnom vezom. Za svaki način bežičnog prijenosa energije biti će dana fizikalna osnova te će se navesti neke postojeće primjene ove tehnologije i planovi za buduće primjene i budući razvoj.

1. BEŽIČNI PRIJENOS ENERGIJE

Danas, kada je električna energija dovedena praktički u svako kućanstvo, čovjek se suočava s problemima velikog broja kabela za napajanje sve većeg broja elektroničkih uređaja u svom domu. 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, ...). Sve je veća potreba u medicini i industrijskoj proizvodnji za bežičnim sustavima napajanja u bliskom polju. Stoga se uglavnom u zadnje vrijeme, pažnja posvećuje bežičnom prijenosu energije na male i srednje udaljenosti unutar, recimo, jedne prostorije.

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 krug. Bežični prijenos energije zahtjeva instalacije samo na mjestu gdje se odašilje energija te na mjestu gdje se prima energija i ne zahtjeva nikakve instalacije između njih. Takav prijenos energije potreban je kada je spajanje vodičima nezgodno ili nemoguće. U posljednje vrijeme takav prijenos energije postaje sve rasprostranjeniji, što se može vidjeti na slici 1.1.



Slika 1.1. Svakodnevno korištena bežična tehnologija. [1]

Bežični prijenos moguće je ostvariti na nekoliko načina. To je zajednički naziv za prijenos energije laserom, mikovalovima, ionizacijom zraka, induktivnom i rezonantno induktivnom vezom.

1.1. Povijest bežičnog prijenosa energije

U ovom odjeljku govorit će se o napretku bežičnog prijenosa energije od početka pa sve do danas. Prvi razvoj tehnologije za bežični prijenos energije javlja se u prvoj polovici devetnaestog stoljeća, nakon izuma elektromagneta i otkrića elektromagnetske indukcije i elektromagnetskog zračenja.

1846. godine J. C. Maxwell objavio je potpunu teoriju elektromagnetizma kojom je cjelovito objasnio sve električne i magnetske pojave. Elektromagnetske zakone objasnio je u matematičkom obliku, a poznate su kao Maxwellove jednadžbe.

1888. godine H. Hertz proučavao je Maxwellovu teoriju elektromagnetizma i prvi pokusima dokazao postojanje elektromagnetskih valova s pomoću takozvanog Hertzova oscilatora (dipola).

1892. godine N. Tesla je izvodio pokuse s bežičnim prijenosom, a 1896. započeo je prenositi signale na udaljenosti od 32 kilometra. Tesla je 1897. godine izgradio veliku odašiljačku i prijamnu postaju na osami u Colorado Springsu i u njoj je usavršavao sustave za bežični prijenos signala i električne energije, uz primjenu napona od nekoliko milijuna volta. Godine 1898. sagradio je brod i pustio ga u more kraj New Yorka te je njime upravljao s obale. Iste je godine istaknuo potrebu rezonancije između primarnog i sekundarnoga kruga odašiljača i prijamnika. Tesla je svoje teorije demonstrirao 1899. napajanjem fluorescentnih svjetiljki udaljenih 25 milja od izvora bez upotrebe žica. Nakon ispitivanja u kolovozu 1899. i 1900. godine Tesla obavlja prenošenje električne energije s pomoću elektromagnetskih valova, pod naponom od 12 milijuna volti na udaljenosti od 30 kilometara. U Long Islandu podiže toranj visine 57 metara i bavi se problemima prenošenja velike količine električne energije za potrebe domaćinstava i industrije. [2]

U ranim 1960.-tim godinama *General Electric* je lansirao prvu električnu četkicu za zube.

Početkom 1960.-ih W. C. Brown je pridonio modernom razvoju mikrovalnog prijenosa energije, koji iz mnogih razloga dominira u istraživanju i razvoju bežičnog prijenosa danas. Brown je izumio antenu koja izravno pretvara mikrovalove u istosmjernu struju. Pokazao je svoje dostignuće u 1964. godini napajanjem helikoptera isključivo mikrovalnim prijenosom energije. [3]

1978. godine prvu primjenu induktivnog punjenja, koja se koristila u SAD-u, obavili su J. G. Bolger, F. A. Kirsten i L. S. Ng. Napravili su električno vozilo pokrenuto sustavom koji je radio na 180 Hz i snagom od 20 kW.

Od ranih 1990.-tih godina Oral-B električne četkice za zube tvrtke *Braun* koriste induktivno punjenje.

2006. godine u *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) su uspjeli prenijeti veliku količinu energije na udaljenost od nekoliko metara, bez zračenja. To se pokazalo boljim za komercijalne potrebe, a bilo je i glavni korak prema ostvarivanju induktivnog punjenja.

2007. godine M. Soljačić[1] ostvaruje bežični prijenos energije na udaljenosti od 2 metra magnetskom rezonancom, gdje je postignuta učinkovitost od 45 %.

2008. godine osnovan je *Wireless Power Consortium* u gradu New Jersey, a 2010. godine uspostavljen je Qi standard. Qi standard je najraširenij standard za bežično punjenje, koje koristi induktivni prijenos energije na malim udaljenostima (do 4 centimetra). Namijenjen je za punjenje malih uređaja kao što su pametni telefoni i tableti, ali i „*power bank"* baterije, bluetooth zvučnici, monitori, kamere i brijači.

2013. godine *Samsung* je lansirao Galaxy S4, koji podržava induktivno punjenje s dodatnim stražnjim poklopcem. Nešto kasnije te godine, *Google* i *ASUS* lansirali su Nexus 7 2013 Edition s integriranim induktivnim punjenjem.

2014. godine *Apple* je objavio Apple Watch koji koristi bežično induktivno punjenje.

2016. godine Državno sveučilište Utah demonstriralo je električni autobus s bežičnom tehnologijom punjenja, maksimalne snage 25 kW.

[1] Marin Soljačić (Zagreb, 1974. -) hrvatski je znanstvenik, profesor na odsjeku za fiziku na najprestižnijem svjetskom tehničkom sveučilištu MIT-u, u Massachusettsu, SAD.

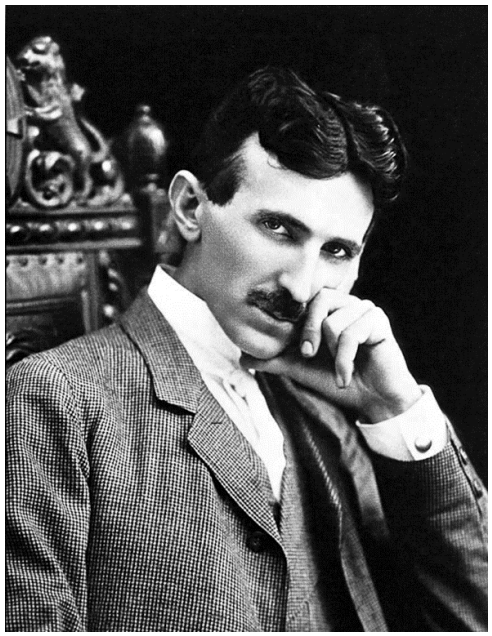
2017. godine su u Shenzhenu (Kina) svi autobusi zamijenjeni električnim autobusima.

2018. godine je njemački BMW predstavio podložak za bežično indukcijsko punjenje baterija na električnim automobilima.

U 2018. godini njemačka tvrtka *Blue Inductive* predstavila je 3 kW bežični sustav punjenja za industrijsku primjenu poput AGV punjenja. Sustav ima najbolju učinkovitost u klasi s ukupnom učinkovitošću prijenosa više od 92 %. [4]

1.2. Nikola Tesla

Nikola Tesla svjetski je poznat po svojim izumima i patentima, usavršavanju elektromotora, generatora i transformatora te po primjeni izmjenične električne struje. Vizionarskim se ocjenjuju njegova istraživanja na polju prijenosa energije, elektromagnetskih zračenja i elektrovodiča iz kojih su, tvrde znanstvenici, danas nastali moderni sustavi radiokomunikacija, televizije, robotike, daljinskoga upravljanja. Taj genijalni istraživač i osebujna ličnost, bio je čovjek ispred svoga vremena i slobodno se može reći da svijet još nije do kraja istražio i spoznao pravu vrijednost svih njegovih ideja i pronalazaka.



Slika 1.2. Nikola Tesla 1896., u dobi od 40 godina. [5]

Nikola Tesla (slika 1.2) rođen je 10. srpnja 1856. godine u Smiljanu pokraj Gospića, u Lici. Nikolin otac Milutin bio je pravoslavni svećenik, a njegova majka Đuka bila je neobrazovana, ali izuzetno inteligentna žena. [6]

Školovanje je Tesla započeo 1862. u Smiljanu, a 1863. obitelj seli u Gospić, gdje je završio osnovnu školu (1866.) i nižu realnu gimnaziju (1870.). Bio je izuzetno marljiv, ali nije se ograničio samo na svladavanje školskoga gradiva. Kada je prilikom prve vatrogasne parade u Gospiću, nakon što unatoč naporima vatrogasaca iz pumpe nije izbila ni kap vode, oslobodio usisnu cijev iz mulja i tako omogućio protok, cijeli se grad uvjerio u njegovu izuzetnost, jer nitko od odraslih nije mogao dokučiti problem. Već tada su ga zanimale vodene turbine, pa se na temelju opisa Niagarinih slapova koji je pročitao u njemu javila ideja kako da iskoristi njihovu energiju, što je kasnije i ostvario, a ideja o iskorištavanju prirodnih sila u službi čovječanstva ostala mu je vodiljom cijelog života. Godine 1870. nastavio je školovanje u Višoj realnoj gimnaziji u Rakovcu kraj Karlovca. Osobito je volio pokuse u kabinetu fizike i odlučio je da će studirati elektrotehniku. Nakon mature vratio se u Gospić. [7]

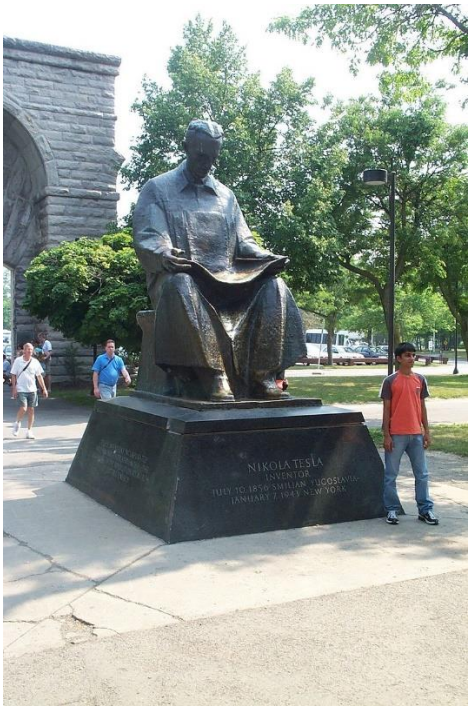
1875. godine započeo je studij na Politehničkoj školi u Grazu, potpomognut stipendijom Vojne krajine. Materijalno osiguran, svom se snagom bacio na učenje. To je urodilo briljantnim uspjehom, ali kad je došao kući, dočekalo ga je očevo negodovanje – profesori su mu pisali da povuče sina s fakulteta ako ne želi da se ubije prenapornim radom. 1880. došao je u Prag, ali nije se mogao upisati na sveučilište jer u gimnaziji nije učio grčki jezik. To ga ipak nije spriječilo da ide na predavanja, u knjižnice i da prati što se novo događa u svijetu elektrotehnike. U siječnju 1881. Tesla se zaposlio u mađarskoj upravi pošte u Budimpešti. 1876. patentiran je telefon, a Budimpešta je bila četvrti grad u svijetu koji je dobio telefonsku centralu. Tesla se odmah iskazao svojim prijedlozima i poboljšanjima, izumio je aparat za pojačavanje glasa u telefonu. Prilikom jedne šetnje 1882.godine Tesla je otkrio načelo okretnog magnetskog polja, što će mu kasnije omogućiti izradu prvih elektromotora izmjenične struje, a time i njezinu sveopću primjenu. [8] Godine 1882. zaposlio se u podružnici Edisonove kompanije u Parizu, uglavnom na instaliranju i usavršavanju centrala istosmjerne struje, a u Strasbourgu je 1883. konstruirao svoj prvi indukcijski motor. U New York je stigao 1884. godine, zaposlio se kod Edisona, ali ta suradnja nije dugo trajala, jer je Edison razvijao istosmjernu struju, dok se Tesla zalagao za izmjeničnu.

1895. osnovao je dioničko društvo za proizvodnju opreme za lučnu rasvjetu. Zbog velike ekonomske krize ta je kompanija propala, pa je 1887. osnovano Teslino električno društvo, s ciljem razvoja sustava izmjenične struje. N. Tesla je u to vrijeme konstruirao nekoliko motora i generatora te razvio sustav prijenosa i razdiobe izmjenične struje, koji i danas prevladava. Njegove patente otkupio je industrijalac G. Westinghouse. Na temelju Teslinih pronalazaka pobijedio je na natječaju za izgradnju hidrocentrale na Nijagarinim slapovima, koja je 1896. godine puštena u pogon. To je bila konačna pobjeda Teslinog sustava izmjenične struje i ostvarenje njegovog dječačkog sna.

Godine 1889. dobio je američko državljanstvo, čime mu je itekako olakšana prijava patenata. U tom se periodu posvećuje istraživanjima visokih napona i visokih frekvencija te rezonancije, što su dotad bila neistražena područja. Najznačajniji izumi – Teslina zavojnica i visokofrekvencijski transformator – steći će svoju sveopću primjenu do danas i omogućiti nastajanje novih tehnoloških grana, od radijske i televizijske tehnike te radarskog sustava do fluorescentne rasvjete, elektroterapije, iskorištavanja sunčeve energije, proizvodnje ozona, snimanja X-zrakama, elektronskog mikroskopa,… U svom laboratoriju u Colorado Springsu izgrađenom 1899. godine postigao je napon od 12 milijuna volti, bio je prvi čovjek koji je uspio proizvesti munje. Bavio se prenošenjem obavijesti i energije na daljinu, bez vodiča, prenio je signale do New Yorka te upalio 200 sijalica udaljenih 40 kilometara. Još 1898. na temelju tih pronalazaka konstruirao je uređaj na daljinsko upravljanje, brod, koji je mogao i zaroniti, a zamišljao je strojeve koji će sami moći upravljati svojim postupcima. Ohrabren time, 1901. godine na Long Islandu započeo je s izgradnjom Svjetskog sustava za bežično slanje obavijesti, slika i vremenskih prognoza u sve dijelove svijeta, kao i za bežično slanje energije. U narednom periodu posvetio se proučavanjima mehanike tekućina i tada je izumio turbinu bez lopatica, mjerač protoka, mjerač i pokazivač brzine, te se bavio njihovim usavršavanjem. Gromobran je patentirao 1918. godine, a kasnije letjelicu s okomitim uzlijetanjem. Nikola Tesla umro je u hotelu Newyorker u New Yorku 7. siječnja 1943. godine. Omogućivši tehnički i tehnološki razvoj modernog doba, vremena u kojem živimo, Tesla je obilježio svaki naš dan. [7]

Njemu u čast, 1956. godine, jedinica za magnetsku indukciju tj. gustoću magnetskog toka prozvana je tesla (T).

Brončani spomenik Nikoli Tesli, rad hrvatskog kipara Frana Kršinića, postavljen je 1976. godine na slapovima Niagare, u državi New York, od strane SAD-a (slika 1.3).



Slika 1.3. Spomenik Nikoli Tesli smješten kod slapova Niagare. [9]

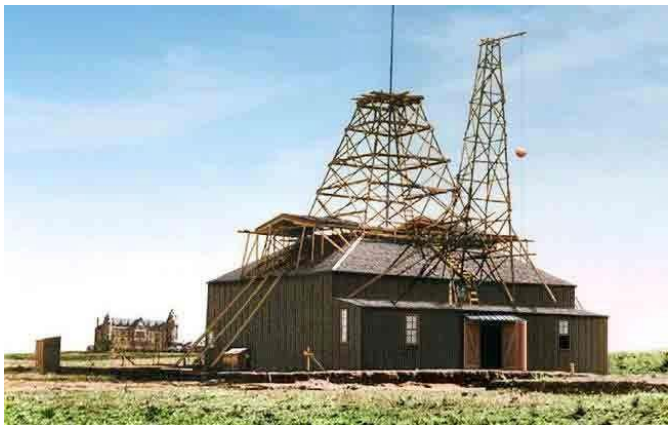
1.3. Wardenclyffe toranj

Jedno od prvih otkrića Nikole Tesle na području elektromagnetizma je dokaz kako Zemljina kora električki oscilira. Do toga je došao korištenjem vrlo snažnog transformatora i preciznih mjernih uređaja. Korištenjem tih uređaja zapazio je i kako katkad udar groma na većim udaljenostima uzrokuje jači signal na površini Zemlje nego udar jednake jačine na manjim udaljenostima, iz čega je zaključio kako se elektromagnetski val prouzročen udarom groma širi Zemljinom korom kao stojni val.

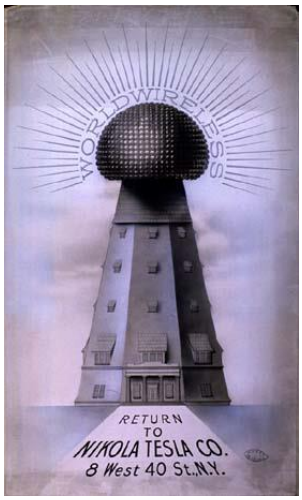
Ovo otkriće navelo je Teslu da svoja istraživanja u mjestu Colorado Springs (slika 1.4) u Sjedinjenim Američkim Državama usmjeri prema projektiranju sustava za bežični prijenos električne energije, koji je kasnije i patentirao. Ideja mu je bila izgraditi visoki toranj sa snažnim transformatorom temeljenim na njegovom prijašnjem izumu, Teslinoj zavojnici s visokom samoindukcijom i malim otporom, koji bi elektrizirao i

povećao vodljivost ionosfere. Za antenu je bio izgrađen stup visok 57 metara, na vrhu s kupolom od žica, promjera 20 metara (slika 1.5). Za realizaciju bila bi potrebna vrlo velika snaga, odnosno visok napon i struja, te visoka frekvencija. Osim toga, toranj je trebao biti uzemljen (slika 1.6), čime bi se Zemljina površina dovela u stanje električnog osciliranja što bi omogućilo prijemnom tornju, koji ima jednaku rezonantnu frekvenciju, da uđe u rezonanciju s odašiljačkim tornjem (slika 1.7) .

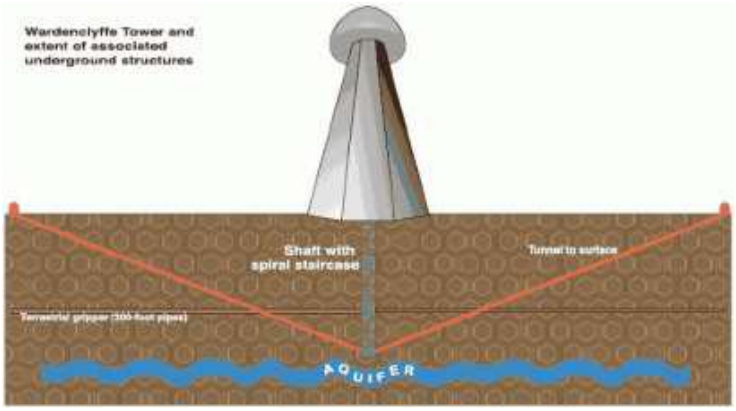
Sustav se u rezonanciji ponaša kao veliko njihalo, izmjenjuje energiju, pa je stoga zračenje zanemarivo, a gubici minimalni. Iako je ovakav toranj izgrađen (toranj Wardenclyffe), projekt nikada nije dovršen, primarno zbog pomanjkanja novaca, ali i zbog straha javnosti od mogućih negativnih posljedica. Toranj je srušen 1917. godine.[10]



Slika 1.4. Vanjski izgled Teslinog Wardenclyffe laboratorija, Shoreham, 1899. [11]

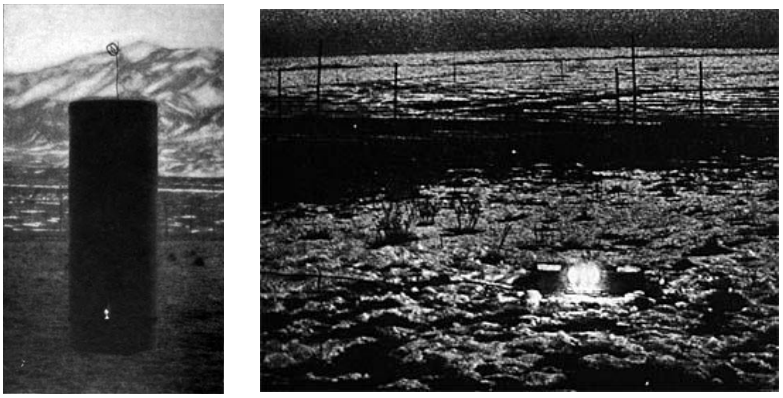


Slika 1.5. Ilustracija tornja sa propagandnog letka. [12]



Slika 1.6. Tuneli ispod tornja su se vjerojatno koristili zbog evakuacije pare i tlaka, koji su se stvarali u uzemljenju zbog jake struje. [11]

a) b)



Slika 1.7. Rezonantni bežični prijenos na srednju (a) i na kratku udaljenost (b) između Teslinog Colorado Springs odašiljača i petlje. [13]

Usprkos svim svojim izumima, Tesla je izgubio patentnu prednost za radio uređaj pred Talijanom G. Marconijem koji je izvodio slične pokuse u isto doba povijesti. 1904. godine Marconi je za svoj izum primio Nobelovu nagradu, što je izazvalo tugu kod Tesle, ultimativno ga tjerajući da ostavi rad s bežičnim izumima. Izgleda da je jedna ovakva stvar koju je on smatrao nepravdom bila dovoljna da se udalji od svijeta bez žica. [12]

Ipak, u današnje doba ovakve su se tehnologije poprilično razvile i osim radio valova, pomoću kojih se komunicira s npr. satelitima ili podmornicama, poznaju se TV valovi, bežični internet i slični izumi.

2. NAČINI BEŽIČNOG PRIJENOSA ENERGIJE

Bežični prijenos energije moguće je ostvariti na nekoliko načina, stoga to je zajednički naziv za prijenos energije laserom, mikovalovima, ionizacijom zraka, induktivnom i rezonantnom induktivnom vezom. Ovisno o udaljenosti, razlikujemo prijenose na :

- velike udaljenosti (korištenjem *lasera i mikrovalova);*
- male udaljenosti (s pomoću *ionizacije zraka, induktivne veze, rezonantne induktivne veze).*

2.1. Laserski prijenos

Jedan od mogućih načina bežičnog prijenosa energije je korištenjem lasera. Pomoću lasera se fokusira elektromagnetsko zračenje i tako se može prenositi kroz zrak, vakuum ili optički kabel na velike udaljenosti.

Laser (prema eng. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) je uređaj koji emitira koherentnu svjetlost, što znači da sva svjetlost koju emitira ima istu frekvenciju. Za razliku od nekoherentnih izvora svjetlosti kod kojih se svjetlost emitira u svim smjerovima, laser emitira svu svjetlost u jednom smjeru. To omogućava fokusiranje velike količine svjetlosti na malu površinu preko velikih udaljenosti.

Prvi laser je konstruirao 1960. godine T. H. Maiman, a zasnovan je na teoretskom radu C. H. Townesa i A. L. Schawlowa. To je bio pulsni laser koji je emitirao svijetlost valne duljine 694 nm. Te iste godine A. Javan, W. R. Bennett i D. Herriott su konstruirali prvi laser koji je mogao kontinuirano emitirati svijetlost. [14] [15]

Laseri imaju jako mnogo primjena u industriji, medicini i znanstvenim istraživanjima gdje god je potrebno fokusirati mnogo energije na malu površinu, jer s ostalim elektromagnetskim izvorima nije moguće ostvariti toliku preciznost. Zbog toga se u novije vrijeme laseri aktivno koriste za bežični prijenos energije.



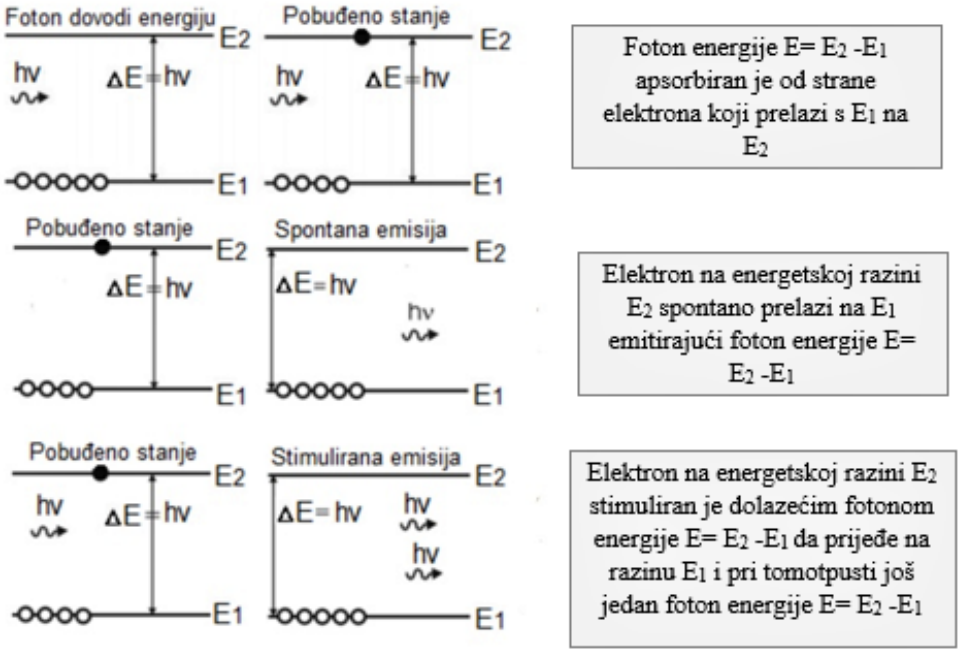
Slika 2.1. Laserska zraka. [15]

Laserska zraka (slika 2.1) proizvodi se fenomenom stimulirane emisije zračenja. Postoje tri različita fizikalna procesa kroz koje atom može prelaziti iz jednog u drugo stanje: apsorpcija, spontana emisija i stimulirana emisija (slika 2.2).

Apsorpcija se događa kada atom, koji se nalazi u osnovnom stanju, apsorbira foton, čija energija je jednaka energiji potrebnoj za prelazak atoma u više energetsko stanje, pobuđeno stanje. Energija fotona jednaka je razlici E_2 -E_1, gdje je E_1 energija elektrona atoma u nižoj energetskoj razini, a E_2 energija više energetske razine. [16,17]

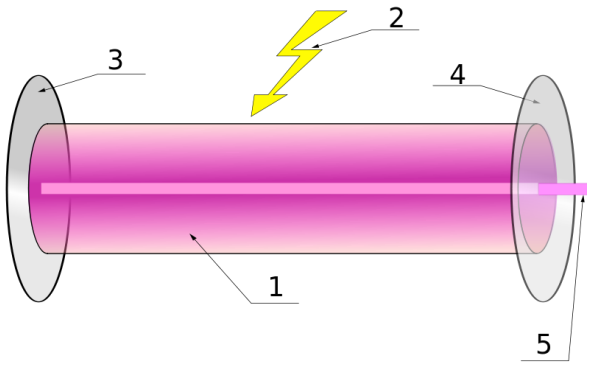
Spontana emisija je proces u kojemu atom koji se nalazi u višem energetskom stanju spontano prijeđe u nižu energetsku razinu. Pri tome dolazi do otpuštanja fotona čija je energija jednaka energetskoj razlici energetskih razina. Proces se naziva spontana emisija jer se zbio bez vanjskog utjecaja. Atom će zatim ostati u tom energetskom stanju određeno vrijeme. Srednje vrijeme života atoma u pobuđenom stanju je 10^{-6} s - 10^{-9} s. Za neka pobuđena stanja, ovo srednje vrijeme života može biti i do 10^5 puta veće. Takva stanja zovu se metastabilna stanja i važna su za rad lasera. [16,18]

Stimulirana emisija je temelj rada lasera. Neka se atom nalazi u pobuđenom stanju. Drugi foton koji je jednake energije kao prvi stimulira atom na prelazak u osnovno stanje i tijekom tog procesa emitira dodatni foton. Ovaj proces se naziva stimulirana emisija jer je događaj pobuđen vanjskim fotonom. Vanjski foton nije apsorbiran od strane atoma već on uzrokuje emitiranje oba fotona. Emitirani foton je u potpunosti identičan vanjskom fotonu, tj. imaju istu energiju, polarizaciju i smjer kretanja. [17,18]



Slika 2.2. Interakcija fotona s elektronom. [16]

Laser se sastoji od laserskog medija, mehanizma za pobuđenje laserskog medija i optičkih reflektora (slika 2.3). Laserski medij još zvan i aktivni medij lasera, može biti plin, kristal ili plazma. To mora biti tvar kod koje postoji metastabilno stanje atoma. Svjetlost određene valne duljine koja prolazi kroz laserski medij se pojačava. Mehanizam za pobuđenje laserskog medija opskrbljuje laserski medij energijom u obliku svjetlosti. To su najčešće ksenonske lampe ili slično, koje stvaraju vrlo jaku svjetlost. Za optičke reflektore se najčešće koriste 2 paralelna zrcala od kojih jedno reflektira svu svjetlost, a drugo je djelomično prozirno tako da dio svjetlosti prolazi kroz njega.



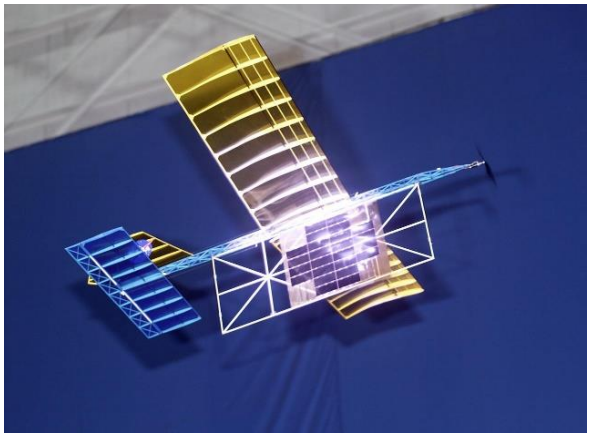
Slika 2.3. Komponente lasera (1-laserski medij, 2-energija za pobuđivanje laserskog medija, 3-neprozirno zrcalo, 4-djelomično prozirno zrcalo, 5-laserska zraka). [17]

Za laserski prijenos energije potrebna je izravna vidljivost između prijemnika i predajnika. Radne instalacije koje koriste energiju laserske zrake već su stvorene.

2012. godine, L. Martin, američki proizvođač vojne opreme i zrakoplova, testirao je *Stalker* bespilotnu letjelicu koja se napaja laserskom zrakom i ostaje u zraku 48 sati.

Prednost ovakvog prijenosa jest činjenica da samo oni uređaji koji su pogođeni laserom primaju energiju, bez interferencije s postojećim mobitelima ili Wi-Fi pristupnim točkama. Nedostatci su očiti – intenzitet lasera (sljepoća, oštećenja kože), neefikasnost (do 50 %), te oblaci, kiša, magla velika su zapreka, pa gubitci mogu biti i 100 %-tni.

NASA i druge agencije razmatraju korištenje lasera u svemiru za prijenos energije između satelita i Zemlje, Mjeseca, Marsa i ostalih planeta, za napajanje svemirskih postaja, pokretanje svemirskih liftova i pokretanje svemirskih letjelica (slika 2.4).



Slika 2.4. Avion NASA-e koji se puni laserom. [19]

Prijenos električne energije laserom (eng. *Laser power beaming)* šalje koncentriranu energiju kroz zrak ili optički kabel pomoću lasera do udaljenog prijamnika koji pretvara svjetlosnu energiju u električnu. To funkcionira slično kao korištenje solarne energije, gdje solarne ćelije pretvaraju energiju Sunca u električnu, ali umjesto toga se koriste laseri jakog intenziteta i specijalizirane foto ćelije koje pretvaraju lasersku energiju u električnu. Pošto laseri emitiraju svu svjetlost u jednom smjeru, ta svjetlost se može fokusirati na jednu točku. Glavne razlike od solarne

energije su da se s laserima mogu postići mnogo veće gustoće energije od sunčeve svjetlosti, može se usmjeriti bilo gdje dok god je čista linija od odašiljača do prijamnika te može raditi 24 sata na dan. Laser se napaja električnom energijom i generira svjetlosnu energiju u obliku laserske zrake. Laserska zraka se oblikuje pomoću seta leća da bi se dobio željeni oblik zrake kod prijamnika. Zraka tada putuje kroz zrak, vakuum u svemiru ili optički kabel dok ne dođe do prijamnika. Kod prijamnika se nalaze foto ćelije koje pretvaraju svjetlosnu energiju lasera natrag u električnu.

Znanstvenici zaposleni na *LIGO* projektu (prema eng. *Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*) prvi put su potvrdili otkriće gravitacijskih valova u veljači 2016. godine. Njihov rad na detektorima poremećaja prostor-vremena proizvedenih tijekom spajanja masivnih crnih rupa rezultirao je dobitkom Nobelove nagrade za fiziku 2017. godine. Prva eksperimentalna potvrda gravitacijskih valova značajan je događaj jer je njime dodatno potvrđena Einsteinova teorija relativnosti. [20]

Journal of Optical Technology 2009. godine, objavljuje koncept sustava za izravno pretvaranje solarne energije u lasersko zračenje na osnovi lasera s fuleren-kisikom i jodom. Pokazano je da ovaj sustav ima prednosti i konkurentan je drugim sličnim sustavima za pretvorbu solarne energije. Provedeno je eksperimentalno istraživanje procesa pretvaranja solarne energije u lasersko zračenje pomoću prototipa koji je razvijen od lasera s fuleren-kisikom-jodom s pumpanjem pomoću simulatora solarnog zračenja. Postignuta je energija po jedinici volumena aktivnog medija od 9J/L. [21]

2.2. Mikrovalni prijenos

Postojanje mikrovalova predvidio je još 1864. godine Maxwell u svojim jednadžbama. Mikrovalovi su elektromagnetski valovi valnih duljina od 0,1 mm do 1 m. Zauzimaju područje frekvencija od 300 MHz do 300 GHz. Prefiks mikro kod mikrovalova ne sugerira da se ti valovi nalaze u mikrometarskom području već ukazuje na njihovu malu valnu duljinu u usporedbi s radiovalovima. Nedugo nakon otkrića mikrovalova počela je i njihova praktična primjena.

Danas se mikrovalovi koriste u mikrovalnim pećnicama, mobilnoj telefoniji (GSM, WLAN, Bluetooth), astronomiji, komunikacijskim satelitima i radarima. Zbog svoje primjene u radarskoj tehnologiji nekada se mikrovalovi nazivaju radarski valovi.

Frekvencije mikrovalova bliske su onima kojima titraju atomi i molekule u tvarima pa se upotrebljavaju za proučavanje atomske strukture tvari. Ako se u prostoru gdje prolazi mikroval nađe elektrizirana čestica, ona će se pokrenuti pod djelovanjem mikrovala na račun njegove energije, a val će oslabiti za toliko izgubljene energije. Energija koju mikroval posjeduje može u biološkome tkivu pokrenuti slobodne elektrizirane čestice (elektrone i ione) i polarizirane čestice, ali ne može sam izvršiti ionizaciju, niti razbiti molekule i time promijeniti kemijski sastav sredine kroz koju prolazi. Zbog toga se mikrovalovi svrstavaju u neionizirajuće elektromagnetsko zračenje. [22]

Ideja korištenja mikrovalova za bežični prijenos energije se prvi put javlja nakon Drugog svjetskog rata. 1964. W. Brown je demonstrirao maketni helikopter koji je bio napajan mikrovalnom zrakom. Na helikopteru se nalazio uređaj koji je bio kombinacija antene i ispravljača. Taj uređaj je pretvarao mikrovalove u električnu energiju s velikom korisnošću – u optimalnim uvjetima čak preko 90 %. Kasniji eksperimenti su postigli bežični prijenos energije pomoću mikrovalova na većoj skali, gdje je 30 kW snage uspješno preneseno preko jedne milje pomoću mikrovalova s korisnošću od 84 %. Nakon toga je u SHARP-u (*Stationary High Altitude Relay Platform*) tehnologija uspješno primijenjena za bežično napajanje cijelog aviona, bez dodatnog goriva (slika 2.5). [23] [24]

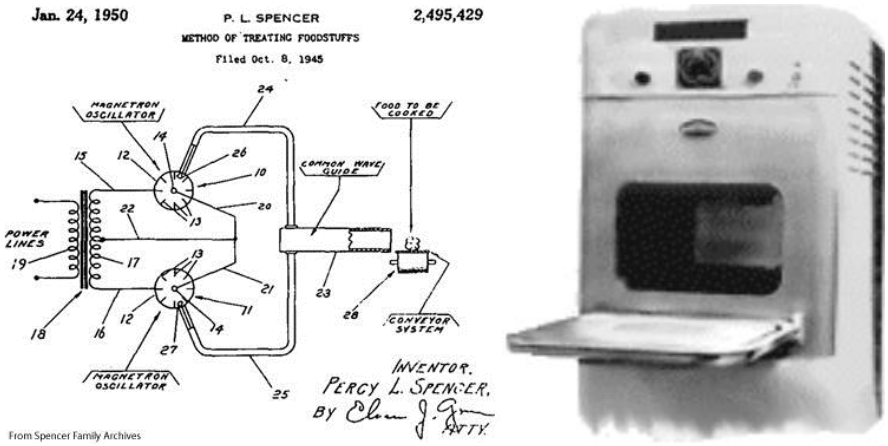


Slika 2.5. SHARP-ov avion na napajanje mikrovalovima. [25]

Mikrovalne tehnike naglo se počinju razvijati tijekom Drugog svjetskog rata pogotovo u vojne svrhe za navigaciju, komunikaciju i radare.

Godine 1946. P. Spencer je istraživao tehnologiju koju su razvijali za vojne potrebe - radar. Tijekom testiranja tada novo razvijene elektronike – „magnetrona", Spencer je zapazio da mu se u džepu potpuno rastopila čokoladica. Kako mu se to učinilo neobičnim, izveo je i drugi eksperiment. Pred magnetron je postavio kukuruz koji se je zbog djelovanja magnetrona počeo mijenjati u kokice. Sljedećeg dana je, zajedno s kolegom, probao i s jajetom koje je odmah koaguliralo.

Tako su došli do zaključka da zračenje, koje emitira magnetron, uzrokuje zagrijavanje tvari. Kasnije je P. Spencer patentirao metalno kućište u koje je postavio magnetron. Prva kućna mikrovalna pećnica (slika 2.6) pojavila se na tržištu 1947. godine u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD).



a) b)

Slika 2.6. Nacrt (a) i izgled (b) prve mikrovalne pećnice. [26]

1986. godine R. Gedye i suradnici objavljuju prvi rad u primjeni mikrovalnog zračenja za ubrzanje četiri tipa organskih reakcija. Danas se mikrovalno ili dielektrično zagrijavanje primjenjuje kao alternativa klasičnom zagrijavanju, a temelji se na svojstvu materije (tekućina i krutina) da apsorbira magnetsku energiju i pretvara je u toplinu. [27]

2.3. Ionizacija zraka

Ova metoda bežičnog prijenosa energije je komercijalno neisplativa i najteže ostvariva. Primjer ovoga u prirodi su munje i izboji između žica, koji su vrlo nepraktični, a često i nepoželjni.

U fizici i elektrotehnici, korona je svjetleći izboj koji se pojavljuje obično na mjestima gdje su vodiči visokog napona svinuti pod oštrim kutom. Uz određene meteorološke uvjete koji pogoduju stvaranju iona, korona se opaža na prostoru oko ovjesišta dalekovodnih žica (slika 2.7). Pojava djeluje korozivno, a uzrokuje i gubitke električne energije, pa se pri konstrukciji dalekovoda nastoje izbjeći oštre promjene smjera vodiča.



Slika 2.7. Korona. [28]



Slika 2.8. Munje. [29]

Sloj Zemljine atmosfere između 60 km i 400 km naziva se i *ionosfera,* zato što postoji više ioniziranih slojeva zraka nastalih djelovanjem ultraljubičastog zračenja, X-zraka te naglih struja elektrona sa Sunca. U sloju između 60 km i 90 km postoji tzv. D-sloj, između 90 km i 150 km E-sloj (sloj *Heaviside-Kennely*) te na visinama između 150

km i 400 km F-sloj *(Appletonov sloj).* Ti slojevi provode električnu struju i reflektiraju radiovalove sa Zemlje. Prije pojave umjetnih telekomunikacijskih satelita, to je bio jedini mogući način bežičnog prijenosa radiovalova na velike udaljenosti. [28]

Munja (slika 2.8) je visokonaponsko (reda milijuna volti) električno pražnjenje između dva nabijena kišna oblaka (najčešće kumulonimbusa) ili između oblaka i tla, a do kojeg dolazi zbog gomilanja električnog naboja u oblacima. Munja svojim prolaskom ionizira zrak, zbog čega on postaje vodljiv. Zrak se zagrijava i naglo širi, pa to čujemo kao prasak (pojava groma). Jakost takve struje može biti i do 20.000 A, a temperatura se poveća i do 30.000°C. [29]

Teslin životni san je bio da tu energiju stavi pod kontrolu i pretvori u koristan rad.

2.4. Induktivna veza

Pojave i zakoni u induktivnoj i rezonantnoj induktivnoj vezi nalaze se u skupu jednadžbi koje univerzalno opisuju elektromagnetna međudjelovanja - Maxwellove jednadžbe.

J. C. Maxwell objavljuje 1873. godine djelo *A Treatise on Electricity and Magnetism* u kojem ujedinjuje elektricitet, magnetizam i svjetlost – tri različite pojavnosti jedne prirodne pojave: elektromagnetizma. Koristeći u to doba poznate zakone (Ampèreov zakon, Faradayev zakon indukcije i Gaussov zakon) te postavivši hipotezu o struji pomaka, Maxwell ih je sve skupa ujedinio u skladu s jednadžbom kontinuiteta.

Elektromagnetska teorija se temelji na Maxwellovim jednadžbama i konceptu polja. Maxwell je u svojim jednadžbama elektromagnetne valove objasnio jednadžbama za električna i magnetska polja.[30] Prema tome elektromagnetski valovi nastaju zato što:

- promjenljivo magnetsko polje $\vec{B}$ stvara promjenljivo električno polje $\vec{E}$,
- promjenljivo električno polje $\vec{E}$ stvara promjenljivo magnetno polje $\vec{B}$.

Na taj način iz Maxwellovih jednadžbi slijedi niz uzajamnih promjena električnih polja koji se prostiru prostorom kao elektromagnetski valovi. Ti „lanci“ električnih i magnetnih polja mogu se odvojiti od električnih naboja i struja te se

slobodno širiti prostorom u obliku elektromagnetskih valova. Oni postoje i nakon što se ukloni njihov izvor. Polja su tada samostalna i mogu postojati i širiti se bez postojanja električnih naboja i struja.

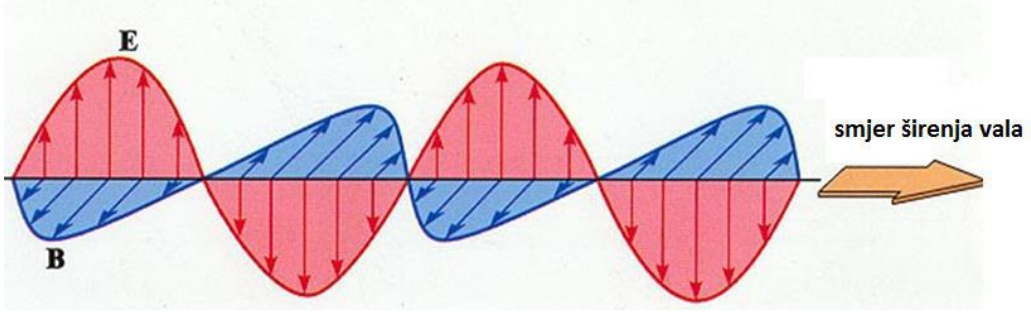
U Maxwellovoj teoriji elektromagnetski valovi nalaze svoje prirodno objašnjenje. Elektromagnetski val (slika 2.9) sastoji se od promjenljivog električnog polja $\vec{E}$ i magnetskog polja, najčešće opisanog magnetskim tokom (magnetskom indukcijom) $\vec{B}$. Oba polja periodički se mijenjaju, titrajući u fazi, a po smjeru su uvijek međusobno okomita. Smjer širenja vala okomit je i na smjer električnog i na smjer magnetskog polja, a to znači da su elektromagnetski valovi transverzalni valovi. U vakuumu se elektromagnetski val prostorom širi brzinom, koja je upravo jednaka brzini svjetlosti,

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} \ , \qquad (1)$$

gdje je ε_0 dielektrična konstanta vakuuma (permitivnosti), a μ_0 označava magnetsku permeabilnost vakuuma.
Brzina elektromagnetskog vala (svjetlosti) c, u vakuumu iznosi:

$$c = 299\,792{,}458 \text{ km/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1} .$$

Uzrok nastanka elektromagnetskog vala je titranje električnih naboja. Zbog toga može se zaključiti da izvor elektromagnetskih valova može biti električni titrajni krug, ali isto tako i titranje atoma i molekula u tvarima. Frekvencija kojom titra izvor određuje i frekvenciju elektromagnetskog vala te je ona jednaka u svim sredstvima.



Slika 2.9. Elektromagnetski val. [31]

Maxwellove jednadžbe su temeljni zakoni kojima se podvrgavaju sve električne i magnetske pojave. Da bi se napisale u tzv. diferencijalnom obliku, potrebno je poznavati vektorsku analizu koja omogućava definiciju divergencije ($\vec{\nabla} \cdot \vec{E}$ i $\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathrm{B}}$ u jednadžbama (2) i (3)) i rotacije ($\vec{\nabla} \times \vec{E}$ i $\vec{\nabla} \times \vec{B}$ u jednadžbama (4) i (5)) električnog i magnetskog vektorskog polja.

Prva Maxwellova jednadžba

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

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho_0}{\varepsilon_0}\,, \tag{2}$$

gdje je ρ_0 gustoća električnog naboja. Jednadžba (2) je poznata i kao Gaussov zakon za električno polje.

Druga Maxwellova jednadžba

Ne postoji magnetni monopol, tj. izvor ili ponor magnetnog polja. Silnice magnetnog polja su zatvorene krivulje. Druga Maxwellova jednadžba glasi:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0\,. \tag{3}$$

Izrazi (2) i (3) su temeljne jednadžbe elektrostatike i magnetostatike. Oni opisuju statička električna i magnetska polja. Ta je dva izraza Maxwell izabrao kao prve dvije od četiri jednadžbe pomoću kojih je opisao elektromagnetske pojave.

Sljedeće dvije jednadžbe Maxwell je uzeo iz zakona koji opisuje promjenljiva električna i magnetska polja. To su Faradayev zakon elektromagnetske indukcije i Amperov zakon.

Treća Maxwellova jednadžba – Faradayev zakon elektromagnetske indukcije

Promjenjivo magnetsko polje uzrokuje električno polje:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\,. \tag{4}$$

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

Četvrta Maxwellova jednadžba– Amperov zakon

Vodič kojim teče struja ili promjenjivo električno polje uzrokuju magnetno polje:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \ , \tag{5}$$

gdje je $\vec{J}$ gustoća struje.

U ovom radu posebno će se promotriti treća Maxwellova jednadžba - Faradayev zakon koji je osnova svake induktivne veze.

Tok magnetskog polja Φ (Wb) je proporcionalan broju silnica koje prolaze kroz određenu površinu u prostoru polja, a ovisi o jačini polja, veličini površine i njihovom međusobnom položaju.

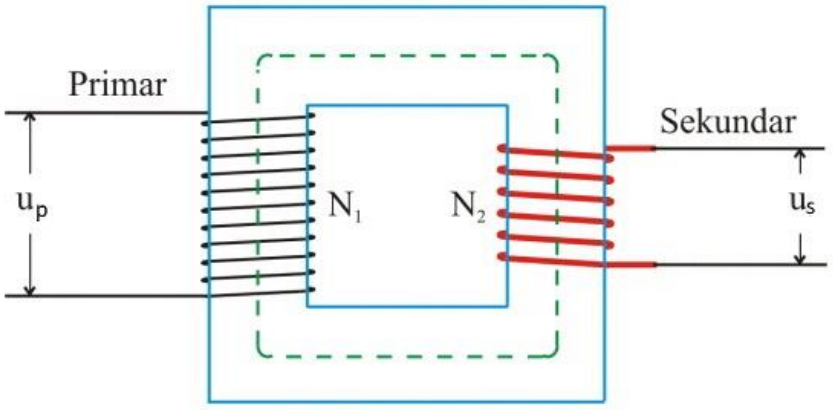
Faradayev zakon: Inducirani napon, U_i (V) u zatvorenoj petlji jednak je brzini promjene magnetskog toka obuhvaćenog tom petljom.

$$U_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} . \tag{6}$$

Inducirana elektromotorna sila ima takav polaritet da u zatvorenoj petlji generira struju koja se svojim magnetskim tokom, suprotstavlja promjeni magnetskog toka koju je izazvala magnetska indukcija (*Lenzov zakon*).

Transformator, najjednostavniji i najčešće korišten uređaj za bežični prijenos energije, zasniva se na međuindukciji.

Transformator se sastoji od dva električki izolirana svitka namotana oko zajedničke željezne jezgre. Razlog za željeznu jezgru je što se želi izbjeći rasap magnetskog polja, a time i energije.



Slika 2.10. Transformator.

Izmjenična struja u jednom svitku uzrokuje promjenljivi magnetski tok u jezgri, koji onda inducira izmjeničnu elektromotorna sila u drugom svitku. Električna energija se prenosi iz jednog svitka u drugi putem željezne jezgre. Svitak koji prima energiju zove se *primar*, a svitak u koji se energija prenosi zove se *sekundar* (slika 2.10).

Ako je promjena magnetskog toka u zavojnici s N navoja nastala zbog promjene jakosti struje koja protječe kroz zavojnicu, u njoj se inducira elektromotorna sila samoindukcije nazvana napon samoindukcije U_s (V). Cijela se pojava zove *samoindukcija*.

Napon samoindukcije dan je izrazom:

$$U_s = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}\ , \tag{7}$$

gdje je L (H) - induktivitet zavojnice.

Induktivitet zavojnice ovisi o njezinoj geometriji, o obliku (broju navoja, dužini, presjeku...), te o permeabilnosti sredstva unutar zavojnice. Unošenjem magnetske jezgre permeabilnosti μ u zavojnicu njezin se induktivitet povećava μ puta. Induktivitet prstenaste zavojnice tada je dan izrazom:

$$L = \frac{\mu S N^2}{l}, \tag{8}$$

gdje je *N*- broj zavoja, *S*- površina presjeka zavojnice i *l*- duljina zavojnice.

Međudjelovanje dviju ili više zavojnica koje su međusobno povezane zajedničkim magnetskim tokom naziva se *međuindukcija*. Zbog promjene jakosti struje u jednom strujnom krugu - primaru, inducira se struja u drugom strujnom krugu -

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

$$U_2 = -N_2 \frac{\Delta\phi_{12}}{\Delta t} = -M_{12} \cdot \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \ , \tag{9}$$

gdje je M_{12} (H) koeficijent međuindukcije, koji ovisi o geometriji prostora i materijalu zavojnica:

$$M_{12} = \frac{N_2 \cdot \phi_{12}}{I_1} \ . \tag{10}$$

Koeficijenti međuindukcije između dvije zavojnice, M_{12} i M_{21}, uvijek su međusobno jednaki tj. $M_{12} = M_{21} = M$.

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

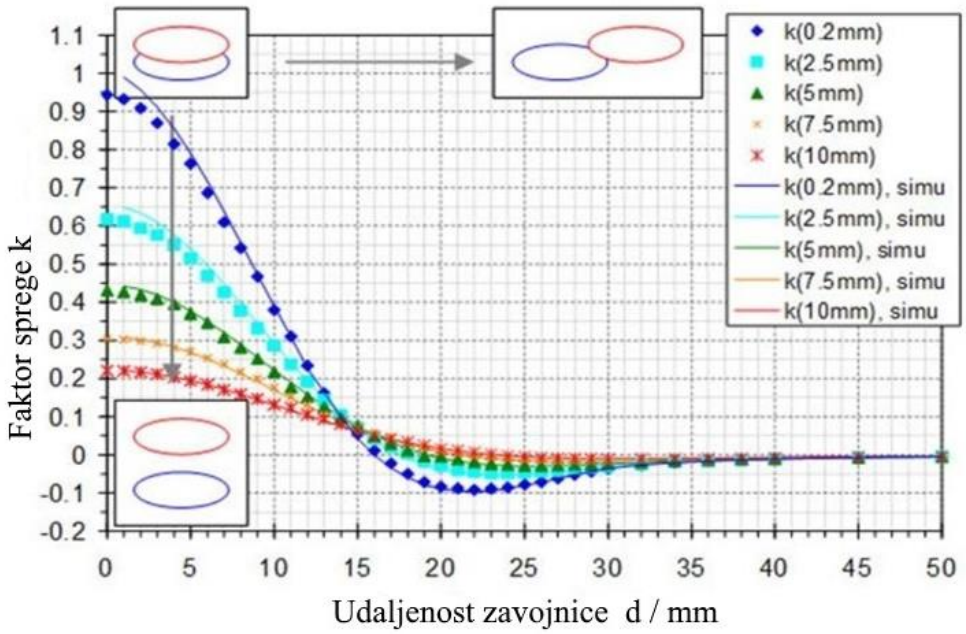
$$\frac{U_S}{U_P} = \frac{N_S}{N_P} \qquad U_s \cdot I_s = U_P \cdot I_P \ . \tag{11}$$

Velika korist transformatora uviđa se pri transformiranju visokih napona u niske i obrnuto, ali u stvarnosti svaki transformator ima svoje gubitke. Glavni razlog za gubitke je međusobna udaljenost zavojnica. Što su zavojnice bliže, magnetna polja su jača. Dobar prijenos energije je ostvariv samo na manjim udaljenostima, pa prijamnik mora biti vrlo blizu odašiljača ili induktora kako bi se mogao s njim spojiti i ostvariti tu vezu.

Faktor sprege k je bezdimenzionalna veličina koja pokazuje koliko će biti dobra induktivna veza ovisno o tome koliko je magnetskog toka prošlo kroz zavojnice. Faktor sprege dan je relacijom:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \ . \tag{12}$$

Vrijednosti *k* se kreću između 0 (nema nikakvog toka, nema induktivne veze) i 1 (sav tok prolazi, 100 % uspostavljena induktivna veza). Ovisnost faktora sprege o udaljenosti zavojnice prikazana je na slici 2.11.



Slika 2.11. Ovisnost faktora sprege o udaljenosti zavojnica. [32]

2.5. Rezonantna induktivna veza

Rezonancija je fenomen koji se u prirodi javlja u različitim oblicima. Pa tako se razlikuju pojave rezonancije u mehanici, elektromagnetizmu, akustici, ostalim granama fizike te kemiji. Ukoliko je neki titrajni sustav pobuđen od strane nekog drugog sustava koji vibrira na nekoj svojoj frekvenciji, kaže se da se radi o rezonanciji. Amplituda titranja je najveća onda kada su frekvencije tih dvaju sustava jednake.

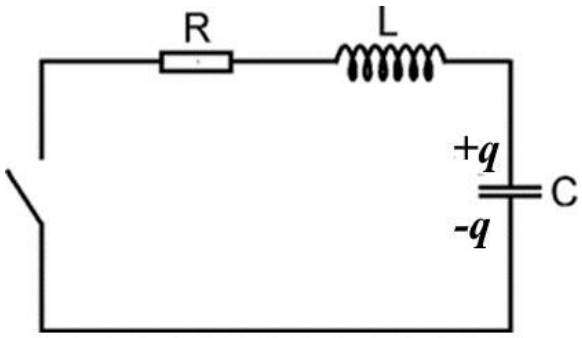
Frekvencija kod koje se javlja rezonancija kod ova dva sustava se naziva *rezonantna frekvencija* i pri njoj je amplituda titraja maksimalna. Sustav može rezonirati pri različitim frekvencijama. To su rezonantne frekvencije tog sustava. Pri ovim frekvencijama male pobudne oscilacije imaju mogućnost stvaranja većih amplituda oscilacija zato što sustav pohranjuje energiju titranja.

Rezonancija također uključuje izmjenu energije iz jednog oblika u drugi i obratno. Primjerice električne u magnetsku energiju ili kinetičke u potencijalnu. U ovim sustavima je moguća pohrana energije, ako je uložena energija veća od one koja se troši na njima. [32]

Posljedice rezonancije u mehaničkim sustavima su vibracije. U elektroenergetskim sustavima zbog rezonancije nastaju neplanirani porasti napona koji oštećuju električne strojeve. U elektroničkim, radiokomunikacijskim, telekomunikacijskim i radarskim sustavima se rezonancija koristi za npr. izdvajanje korisnog signala, selektivno pojačanje neke frekvencije, itd.

U osnovi rezonantne induktivne veze zapravo su električni titrajni krugovi, stoga će se ukratko objasniti princip rada električnog titrajnog kruga.

Najjednostavniji električni titrajni krug je serijski spoj idealne zavojnice induktiviteta L, idealnog kondenzatora kapaciteta C i idealnog otpora R (slika 2.12.). [33]



Slika 2.12. Shema jednostavnog električnog strujnog kruga.

Kondenzator i zavojnica se spoje u strujni krug preko prekidača bez vanjskog izvora. Prije zatvaranja nabije se kondenzator količinom naboja q. Struja je nula, a u kondenzatoru je pohranjena najveća energija električnog polja. Zatvaranjem kruga, poteče struja od pozitivno nabijene ploče prema negativnoj i počinje pražnjenje kondenzatora težeći ravnotežnoj raspodjeli naboja. 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 nula. Struja u krugu ponovno uzrokuje promjenu magnetskog toka unutar zavojnice, inducira se napon i

struja i cijeli slučaj se ponavlja u suprotnom smjeru. Ploče kondenzatora se nabijaju i završava jedan puni titraj.

Struja se može definirati preko Ohmovog zakona:

$$I = \frac{U}{Z} \ , \tag{13}$$

gdje je *Z* ukupni otpor u strujnom krugu:

$$\mathrm{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \ . \tag{14}$$

X_L je induktivni otpor, a X_C kapacitivni otpor, prema izrazima:

$$X_L = 2\pi f L \qquad X_C = \frac{1}{2\pi f C} \ , \tag{15}$$

gdje je *f* (Hz) frekvencija titranja električnog titrajnog kruga.

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 se vidi da će rezonantna frekvencija ovisiti jedino o *L* i *C*, pa se ciklus ponavlja frekvencijom:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \ . \tag{16}$$

Ukupna energija u električnom titrajnom krugu je jednaka zbroju električne i magnetske energije. Parametri koji se promatraju 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 izražava se brojem *Q* kojeg se naziva Q faktor ili faktor dobrote:

$$Q = \frac{pohranjena\ energija}{gubitak\ energije\ u\ jednom\ titraju} \ . \tag{17}$$

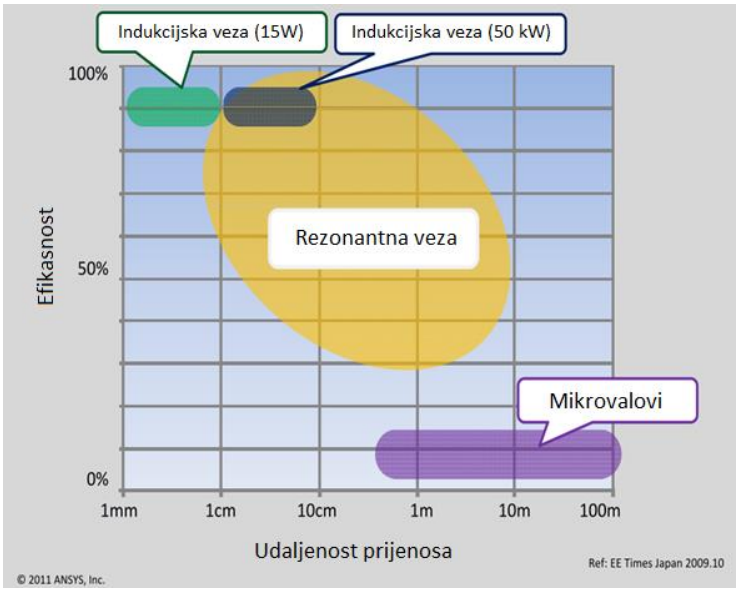
U električnim titrajnim krugovima prigušenja nisu poželjna, a dobar krug imat će velik Q faktor, što se posebno vidi pri rezonanciji. Ako nema gušenja, Q je beskonačno velik. Također, faktor dobrote nekog kruga možemo izraziti kao:

$$Q = \frac{2\pi f_0 \cdot L}{R}, \tag{18}$$

gdje je f_0 rezonantna frekvencija.

Primjena rezonantno induktivne veze danas je u porastu. Kako je induktivni rezonantni prijenos najpogodniji za primjenu punjenja električnih vozila sukladno tome se najviše i razvija u praksi. Bežično punjenje najperspektivnija je tehnologija jer omogućuje punjenje tijekom vožnje, gdje se autobusu sustavom indukcije bežično puni akumulatorska baterija bez potrebe za fizičkim kontaktom.

Primjer prvog javnog prijevoza nulte emisije u Republici Hrvatskoj bio je u gradu Koprivnici. Gradski autobusi idealni su za prelazak na električnu energiju budući da pomažu u rješavanju zagađenja zraka u gradovima i smanjenju emisije ugljikovog dioksida u prometu koji su u prošloj godini ostali na istoj razini kao i godinu prije. Električni autobusi su također popularniji među putnicima nego dizelski autobusi jer su čisti, tihi, s manje vibracija i bez mirisa. Električnom flotom u Europi prednjače Britanci, a cilj im je do 2037. godine kompletnu flotu učiniti električnom. Slijede Francuzi i Nizozemci, a na četvrtom mjestu su Poljaci. [34] Osim u prijevozu, ovaj način prijenosa bežične energije pronalazi se u električnoj četkici za zube, indukcijskim kuhalima, vojnoj opremi, medicinskim uređajima…



Slika 2.13. Efektivnost načina prijenosa energije s obzirom na udaljenost. [35]

Zanimljivo je promotriti korisnost bežičnog prijenosa energije s obzirom na udaljenost (slika 2.13). Uočava se da je induktivni način najbolje koristiti za udaljenosti do 10 cm gdje mu je korisnost izrazito velika (preko 90 %) i za prijenos malih snaga do 15 W i velikih do 50 kW. Rezonantna indukcijska veza ima područje primjene od 1 cm do nekoliko metara. Ipak, korisnost ovog prijenosa energije je širokog intervala (od 30% do preko 90%), ovisno o realizaciji same veze. Sa slike 2.13 je vidljivo da najmanju korisnost ostvaruje prijenos energije mikrovalovima, ali s druge strane taj prijenos je moguć s dosta veće udaljenosti.

3. ZAKLJUČAK

- Bežični prijenos energije je proces koji se odvija u bilo kojem sustavu gdje se električna energija prenosi od izvora do trošila, bez spajanja istih u električni krug.

- Ovaj način prijenosa energije je otkriće Nikole Tesle i veliki je izazov za današnji svijet tehnologije.

- Prijenos energije bežičnim putem može se ostvariti laserom, mikovalovima, ionizacijom zraka, induktivnom i rezonantnom induktivnom vezom. Proučavanje fizikalnih osnova svakog prijenosa zasebno, daje uvid u neraskidivu vezu između temeljnih fizikalnih znanja i ostvarenih načina bežičnih prijenosa energije.

- Od svih načina bežičnog prijenosa energije najveću današnju primjenu ostvaruju prijenosi mikrovalovima, induktivnom i rezonantnom induktivnom vezom. Ipak, induktivna veza ima najveću korisnost na malim udaljenostima (do 10-tak cm).

- Glavni nedostatak ovih načina bežičnog prijenosa je što s povećanjem udaljenosti stupanj korisnosti cjelokupnog sustava opada.

- Primjene bežičnog prijenosa energije zauzimaju skoro svako polje stvarnosti od medicine, transporta, astronomije, kućanskih uređaja, tehnologije, …

4. LITERATURA

1. URL:https://www.image-illustration.net/shop/vector-smartphone-and-wireless-devices-isometric-infographic/ Pristupljeno u kolovozu 2019.

2. V. Muljević, Život i djelo Nikole Tesle, Energija, 55, 2 (**2006**) 218-235

3. A. Bomber, Wireless Power Transmission: An Obscure History, Possibly a Bright Future, **2006.**

URL:http://web.pdx.edu/~larosaa/Applied_Optics_464-564/Projects_Presented/Projects-2006/Andrew_Bomber_Report_Wireless_Power_Transmission_PH464.pdf
Pristupljeno u kolovozu 2019.

4. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Inductive_charging Pristupljeno u kolovozu 2019.

5. S. Popović, Matematičko-fizički list, Zagreb, LXIV 4, (**2013 – 2014**) 241-249

6. M. Vinković, TEHNIČKA KULTURA, priručnik za učitelje tehničke kulture od 5. - 8. razreda osnovne škole, PROFIL, Zagreb, **2002**.

7. D.Roša, M.Roca, I.Matić, N.Jakuš, M.Varat, FIZIKA 2, udžbenik za osmi razred, drugo izdanje, ALFA, Zagreb, **2002.**

8. I. Knežević, AUDIO TEHNIKA I TELEVIZIJSKA TEHNIKA, Školska knjiga, Zagreb, **1999**.

9. B. Štih, Računalni model za analizu bežičnog prijenosa snage, Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, **2015.**

10. URL:https://www.image-illustration.net/shop/vector-smartphone-and-wireless-devices-isometric-infographic/ Pristupljeno u rujnu 2019.

11. J. Cvetić, Tesla's Magnifying Transmitter Principles of Working, First International Congress Nikola Tesla - History of the Future, Beograd, **2015.**

12. Teslino nasljeđe u fizici, 22. ljetna škola mladih, Labin 2016, Hrvatsko fizikalno društvo, Zagreb, **2016**.

13. M. Škiljo, Bežični prijenos snage, FESB, Sveučilište u Splitu, Split, **2014.**

14. T. H. Maiman, Stimulated Optical radiation in Ruby, Nature 187 (**1960)** 493–494

15. J. Hecht, Beam: The Race to Make the Laser, Oxford University Press, **2005**., 25-29.

16. L. Bistričić, Fizika lasera, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, **2014.**

17. URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Laser.svg Pristupljeno u rujnu 2019.

18. N. Godinović, Autorizirana predavanja iz kolegija Eksperimentalne metode moderne fizike, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, **2006.-2007.**

19. URL: https://images.nasa.gov/details-ED03-0249-18.html Pristupljeno u rujnu 2019.

20. URL:https://www.hrastovic-inzenjering.hr/primjena-energije/energetski-clanci/alternativne-tehnologije/item/937-ligo-detektor-gravitacijskih-valova.html
Pristupljeno u rujnu 2019.

21. A. A. Mak, I. M. Belousova, V. M. Kiselev, A. S. Grenishin, O. B. Danilov, and E. N. Sosnov, Converting Solar Energy Into Laser Radiation Using a Fullerene-oxygen-iodine Laser with Solar Pumping, J. Opt. Technol 76 (2009) 172-186

22. I. Puharić, Mikrovalovi i njihove primjene, Završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Osijek, **2016.**

23. W. C. Brown, Experimental Airborne Microwave Supported Platform, MA Microwave and Power Tube Div, Raytheon Co, Burlington, **1965.**

24. G. W. Jull, A. Lillemark, R. M. Turner, SHARP (Stationary High Altitude Relay Platform) Telecommunications missions and systems, GLOBECOM, New Orleans, **1985**., 955- 959.

25. URL: http://www.ripublication.com/ijepa/ijepav1n3_2.pdf Pristupljeno u rujnu 2019.

26. M. Hranjec, Sinteze potpomognute mikrovalovima, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, **2017.**

27. I. Zrinski, M. Eckert-Maksić, Primjena mikrovalnog zračenja u organskoj sintezi, Kem. Ind. 54 (2005) 469-476

28. Leksik. Hrvatska enciklopedija. Zagreb. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, **2015.**

URL: http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=33237 Pristupljeno u rujnu 2019.

29. Leksik. Hrvatska enciklopedija. Zagreb. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, **2015.**

URL: http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=42456 Pristupljeno u listopadu 2019.

30. N. Cindro, Fizika 2, Elektricitet i magnetizam, Zagreb, Školska knjiga, **1985.**

31. URL:https://ldap.zvu.hr/~msusak/Elektromagnetsko%20zracenje_web.pdf Pristupljeno u listopadu 2019.

32. J. Macharia, Wireless Inductive Chargingfor Low Power Devices, Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, Bacherol of Engineering Electronics Thesis, **2017.**

33. M. Kesler, Highly Resonant Wireless Power Transfer: Safe, Efficient, and over Distance, WiTricity Corporation, **2013.**

34. URL: https://www.fpz.unizg.hr/prom/?p=11393 Pristupljeno u rujnu 2019.

35. URL: https://support.ansys.com/staticassets/ANSYS/Conference/Irvine/downloads/Wireless%20Power%20Transfer%20for%20HEV%20-%20Vincent%20Delafosse.pdf Pristupljeno u rujnu 2019.