

# Bežični prenos električne energije

Seminarski rad u okviru kursa  
Tehničko i naučno pisanje  
Matematički fakultet

Dobrivoje Vujović  
mi22051@alas.matf.bg.ac.rs

Mila Gligorić  
mi22082@alas.matf.bg.ac.rs

Milan Petrović  
mi22247@alas.matf.bg.ac.rs

Boris Perić  
mi20185@alas.matf.bg.ac.rs

15. Novembar. 2022.

## Sažetak

U ovom tekstu bavićemo se sistemima za bežični prenos električne energije. Ovakvi sistemi nesumljivo imaju široku primenu, a budući da se provlače i kroz svakodnevni život, primena ovih tehnologija postaje sve širi pojam. U ovom tekstu biće izložena kratka istorija bežičnog prenosa električne energije i neki od pionira ovog polja. Naredna poglavlja osvrtaće se više na same principe funkcionisanja kao i na primenu ovih tehnologija. Biće takođe i reči o jednom od svakako najzanimljivijih pokušaja primene bežične tehnologije. Na samom kraju biće pomenute tehničke karakteristike nekih bežičnih tehnologija kao i njihove prednosti i mane. Cilj teksta jeste da čitaocu pruži uvid u osnovne pojmove vezane za bežični prenos energije i na taj način mu približi skup njegovih mogućnosti.

## Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Istorija i pioniri</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Primene</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Održivost</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Svetski bežični sistem</b>	<b>4</b>
5.1	Istorija . . . . .	5
5.2	Princip rada . . . . .	6
<b>6</b>	<b>Načini prenosa energije</b>	<b>6</b>
6.1	Prenos energije na male udaljenosti . . . . .	7
6.2	Prenos energije na velike udaljenosti . . . . .	7
<b>7</b>	<b>Zaključak</b>	<b>8</b>

## 1 Uvod

Jedan od najvećih problema u elektroenergetskom sistemu su gubici koji nastaju prilikom prenosa i distribucije električne energije. Kako se potražnja povećava iz dana u dan, povećava se i proizvodnja električne energije, a povećava se i gubitak energije. Najveći gubitak energije nastaje tokom prenosa i distribucije. Procene su da se četvrtina energije gubi tokom distribucije. Glavni razlog za gubitak energije tokom distribucije je otpor žica koje se koriste za mrežu. Efikasnost prenosa energije može se poboljšati do određenog nivoa korišćenjem kompozitnih provodnika velike čvrstine i podzemnih kablova koji koriste provodnike visoke temperature. Ali, prenos je i dalje neefikasan.

Mnogi problemi se mogu rešiti najsavremenijom tehnologijom. Gore navedeni problem može se rešiti izborom alternativne opcije za prenos energije koja bi mogla da obezbedi mnogo veću efikasnost, nisku cenu prenosa i da izbegne krađu struje. Bežični prenos električne energije može biti pravo rešenje za ove probleme.

## 2 Istorija i pioniri

U 19. veku su se razvile mnoge teorije i kontrateorije o tome kako se električna energija može prenositi. Godine 1826., Andre-Mari Amper je otkrio vezu između struje i magneta. Majkl Faradej je 1831. opisao svojim zakonom indukcije elektromotornu silu koja pokreće struju u petlji provodnika uz pomoć vremenski promenljivog magnetnog fluksa. Prenos električne energije bez žica su posmatrali mnogi pronalazači i eksperimentatori, ali nedostatak odgovarajuće teorije je nejasno pripisao ove pojave elektromagnetnoj indukciji [12].

Koncizno objašnjenje ovih fenomena dolazilo bi iz Maksvelovih jednačina iz 1860-ih Džejmsa Klerka Maksvela, uspostavljajući teoriju koja je ujedinila elektricitet i magnetizam sa elektromagnetizmom, predviđajući postojanje elektromagnetnih talasa kao "bežičnog" nosioca elektromagnetne energije. Nakon toga je usledila validacija teorije od strane Hajnriha Rudolfa Herca iz 1888. godine, koja je uključivala dokaze za radio talase.

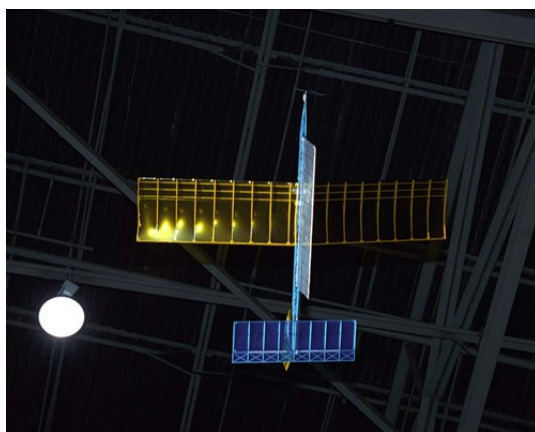
Guljelmo Markoni je 1897. godine uspešno poslao Morzeovu azbuku na rastojanje od 6 km. Na slici 1 su prikazani inženjeri Britanske pošte kako pregledaju Markonijevu radio opremu tokom demonstracije na ostrvu Flat Holm, 13. maja 1897. godine. Predajnik je u sredini, prijemnik ispod njega, a stub koji podržava žičanu antenu je vidljiv na vrhu.

U međuvremenu Nikola Tesla počinje ozbiljno proučavati ideju bežičnog prenosa električne energije. Njegova zamisao je bila da bežičnim putem svetlu obezbedi besplatnu električnu energiju. Godine 1893. osvetljava sijalicu bežičnim putem, a nedugo zatim započinje gradnju Vardenklifskog tornja koji bi se koristio za prenos električne energije bežičnim putem na velike udaljenosti. Zbog velikih gubitaka projekt je ostao bez finansijskih sredstava i na kraju je ugašen.

Vilijam Braun je 1964. godine pokazao model vazduhoplova na mikrotalasni pogon koji je svu za let potrebnu energiju dobijao iz mikrotalasnih zraka [2]. 2003. godine NASA je letela prvim laserskim avionom. Motor malog modela aviona pokretala je električna energija koju su generisale fotoćelije iz snopa infracrvene svetlosti iz zemaljskog lasera, dok je kontrolni sistem držao laser uperen u avion.



Slika 1: Markoni i inženjeri



Slika 2: Prvi let NASA lasersog aviona

Godine 2008. Intel je pokazao da se može bežično poslati energija da bi se upalila sijalica sa efikasnošću prenosa 75 uspešnih pokušaja na prema 100 pokušaja.

### 3 Primene

Bežični prenos električne energije, ako pravilno implementiran, ima mogućnost da unapredi veliki broj industrija. Najveća potražnja je trenutno u sektoru potrošačke elektronike [4], gde jedna od prvih inovacija koje možemo da očekujemo jeste stanica za punjenje na distanci od 1-5 metara. Ideja je da u svakom domaćinstvu postoji par predajnika za punjenje (u zavisnosti od veličine prostora) koji bi punili svu kompatibilnu elektroniku i time potpuno uklonili potrebu za standardnim žičanim punjačima. Ovo rešenje je i dalje nemoguće, delom zbog nedovoljnog razvića tehnologije, ali i zbog skepticizma prosečnog

potrošača o sigurnosti rešenja tog tipa.

Kako je magnetna rezonanca u oblasti bežičnog prenosa energije proteklih decenija zadobila na popularnosti, isti principi magnetne teorije koji se koriste za tehnološki napredak elektronike mogu se primeniti i na medicinski sektor [8]. Sistemi bežičnog prenosa energije su na putu da preobrazu proizvodnju medicinskih uređaja namenjenih za upotrebu unutar tela, specifično onih koji koriste baterije i električna kola. Pejsmejkeri (eng. pacemaker) su uređaji koji regulišu rad srca, a od kojih na globalnom nivou zavise životi oko 5 miliona ljudi. Vek trajanja baterije pejsmejкера (od 5-7 godina) [7] pacijenta može dovesti u ozbiljan zdravstveni rizik, zbog čega naučnici rade na kreiranju uređaja koji se pune eksterno.

Bežični prenos energije je na putu da unapredi i automobilsku industriju. Kako se svake godine proizvodi sve više električnih vozila, traže se i inovativni načini za njihovo punjenje. Trenutno se radi na stanicama gde automobili mogu parkirati da se pune bežično. U planu za budućnost je izrada tehnologije pomoću koje će automobili moći da se napune čak i dok su u pokretu, a punjači će biti raspoređeni po putevima tako da će vozila moći da rade bez stajanja. Kao rezultat ove promene, mnogo više ljudi bi biralo električna vozila.

Još neke sfere u kojima će se bežični prenos energije koristiti:

- građevina: uklanjanje žica iz domova
- odbrambeni sektor: smanjenje težine baterija na bojnom polju
- biomedicina: izrada protetskih uređaja
- solarne ploče itd.

## 4 Održivost

Standardne primene bežičnog prenosa energije nemaju dokazan štetan uticaj na životnu sredinu. U velikoj razmeri predviđa se da će bežična energija proizvoditi samo 20g ugljen-dioksida, jednog od glavnih uzroka globalnog zagrevanja, po kilovatsatu [4]. Obračun za nuklearnu energiju je otprilike isti, dok ga nafta proizvodi čak i 40 puta više. „Leed“ sertifikovani profesionalci smatraju da je tehnologija bežičnog prenosa energije sastavni deo pokreta održivosti i 'zelene' gradnje [9], posebno kako maloprodajna cena električne energije nastavlja da raste. Bežična energija pruža mogućnost smanjenja potrebe za novim ožičenjem kuća i preduzeća, kao i eliminisanja potencijalno rastuće potražnje za baterijama u budućnosti, što je posledica povećanja energetske potrebe IoT i 5G mreže.

## 5 Svetski bežični sistem

Svetski bežični sistem je bio projekat koji je dizajnirao Nikola Tesla na osnovu svojih teorija o korišćenju Zemlje i njene atmosfere kao električnih provodnika. Bitnost ovog projekta ogleda se u činjenici da je njime Tesla pokazao da je moguće prenositi energiju na daljinu, bez korišćenja drugih provodnika, osim

vazduha. On je tvrdio da će ovaj sistem omogućiti “prenos električne energije bez žica” na globalnom nivou, kao i bežičnu komunikaciju i emitovanje radio signala. Projekat je napušten 1906. godine zbog nedostatka sredstava i nikada posle toga nije završen.



Slika 3: Teslin Toranj

## 5.1 Istorija

Kada se Tesla vratio iz Kolorado Springsa u Njujork, napisao je senzacionalan članak za Century Magazine [10]. U ovoj detaljnoj, futurističkoj viziji on je opisao sredstvo za prikupljanje sunčeve energije pomoću antene. On je sugerisao da bi bilo moguće kontrolisati vremenske prilike električnom energijom. Predvideo je mašine koje će rat učiniti nemogućim i predložio je globalni sistem bežične komunikacije. Većini ljudi ideje su bile gotovo nerazumljive, ali Tesla je bio čovek koji se nije mogao potceniti.

Ovaj članak privukao je pažnju jednog od najmoćnijih ljudi toga vremena, J.P. Morgan-a. Budući da su se lično poznavali, Tesla je Morganu izložio svoju ideju, koja se tada graničila sa naučnom fantastikom. “Kada se bežična mreža u potpunosti primeni, Zemlja će se pretvoriti u ogroman mozak, sposoban da reaguje u svakom svome delu” [6], tvrdio je Tesla.

Morgan je Tesli ponudio 150 000 dolara, da napravi prenosni toranj i elektranu. Iako je Tesli trebalo mnogo više novca za projekat, prihvatio je ponudu i odmah krenuo sa radovima.

Kao mesto za svoj projekat Tesla je izabrao zemljište Vardenklif (engl. Wardenclyffe) na liticama Long Island-a. Projekat je bio u izgradnji sve do 1901. godine, a konstrukcija je uključivala toranj koji se uzdizao 57 metara u visinu i koji je na svom vrhu nosio čeličnu kuglu tešku 55 tona. Ispod tornja, 35 metara duboko, nalazilo se udubljenje, nalik na bunar, a par metara dublje nalazilo se šesnaest gvozdениh cevi učvršćenih u zemlju.

Kako je izgradnja tornja odmicala, postalo je jasno da početna investicija neće biti dovoljna, ali Morgan nije reagovao. Zatim je krajem 1901. objavljena vest da je Markoni (ital. Guglielmo Marconi) signalizirao slovo “S” preko Atlantika od Kornvola u Engleskoj do Njufaundlenda, što je dalje poljuljalo Markonija

u odluci da nastavi da finansira Teslin projekat buduci da je Markoni bio glavni Teslin konkurent na polju tehnologija bežičnog prenosa.

Tesla je molio Morgana za dodatnu finansijsku podršku, ali je investitor odlučno odbio; berza je doživela krah, a cene materijala su se udvostručile. Visoke cene u kombinaciji sa neuspehim pokušajem pronalaska investitora, na kraju su dovele do propasti projekta.

## 5.2 Princip rada

Teslina ideja za Vardenklifski toranj 3 rodila se početkom 1890-ih godina. Glavni cilj njegovog istraživanja bio je da razvije novi sistem bežičnog prenosa energije. Odbacio je ideju o korišćenju novootkrivenih Hercovih radio Talasa, koje je 1888. otkrio nemački fizičar Hajnrih Rudolf Herc. Tesla je sumnjao u njihovo postojanje, pošto mu je osnovna fizika, kao i većini drugih naučnika iz tog perioda, govorila da će talasi putovati pravolinijski, što znači da će putovati pravo u svemir, postajući izgubljeni [5].

Tokom prethodnih eksperimenata izvedenih u Kolorado Springsu 1899. godine, Tesla je razvio sopstvene ideje o tome kako će funkcionisati svetski bežični sistem. Iz ovih eksperimenata izneo je teoriju da bi ako bi pustio električnu struju u Zemlju na određenoj frekvenciji, mogao da iskoristi ono za šta je verovao da je Zemljin sopstveni električni potencijal, i da izazove da struja rezonuje na frekvenciji koja bi se pojačavala po principu stojecih talasa [1]. Energiji ovih talasa moglo bi se pristupiti bilo gde na Zemlji za pokretanje raznih uređaja. Ovakav sistem zasnivao se više na idejama o električnoj provodljivosti iz 19. veka umesto o modernijim teorijama o elektromagnetnim talasima.

Februara 1901. u Collier-ovom članku pod nazivom "Razgovor sa planetama"[11] Tesla je opisao svoj bežični sistem kao izum koji koristi Zemlju kao medijum za prenošenje struje i po principu rada podseća na pumpu koja crpi struju iz Zemlje i vraća je nazad u ogromnoj brzini stvarajući pri tome vibracije koje bi mogle biti detektovane specijalno podešenim prijemnicima. Tesla tvrdi da je na ovaj način uspeo da prenese na daljinu slabe signale, ali i značajne količine energije. Verovao je da će isto tako sistem moći da se iskoristi u industrijske svrhe uz niske cene i na bilo koju udaljenost.

Iako je Tesla demonstrirao bežični prenos energije osvetljavajući sijalice postavljene ispred zgrade u kojoj je postavio svoj eksperimentalni kalem [10], nije naučno dokazao svoje teorije. Verovao je da je pronašao način za slanje talasa kroz Zemljinu koru koji bi, prema njegovoj teoriji, delovao na bilo kojoj udaljenosti [3].

## 6 Načini prenosa energije

Za prenos električne energije koriste se tehnologije za prenos na blizinu i na velike razdaljine odnosno near-field (neradijativna) i far-field (radijativna)<sup>1</sup>.

### 6.1 Prenos energije na male udaljenosti

Near-field se zasniva na principu da se u polju dometa električni i magnetni talasi razdvajaju. Ovaj princip se zasniva na elektromagnetnoj indukciji između

Tabela 1: Poređenje metoda za bežični prenos energije

	Induktivno povezivanje	Rezonantno induktivno povezivanje	Mikrotalasni prenos	Laserski prenos
Prijemna snaga	nekoliko w	nekoliko stotina W	desetine kW	do MW
Moguća udaljenost	nekoliko cm	par m	do desetine km	do desetine km
Frekvencija talasa	nekoliko kHz	desetine kHz	nekoliko MHz	od 300GHz do 1 THz
Efikasnost	Vrlo visoka	visoka	srednja	srednja

žica i namotaja pomoću koje se energija prenosi putem magnetnog polja odnosno elektrostatičke indukcije između dve metalne elektrode kod električnog polja. Kod ovakog prenosa odašiljač i prijemnik se mogu povezati indukcijom i rezonantnom indukcijom. Kod obične indukcije udaljenost je svega par centimetara dok je kod rezonantne indukcije prenos moguć i na nekoliko metara. Jedna od glavnih odlika ovog pristupa je izuzetno velika efikasnost.

Induktivno povezivanje zahteva svega nekoliko W struje pa je zbog svog malog dometa potrebna i mala frekvencija talasa od svega nekoliko kHz i što je čini najefikasnijom metodom za prenos energije, njena primena je u glavnom punjenje i napajanje malih uređaja u domaćinstvu.

Rezonantno induktivno povezivanje koristi više energije od induktivnog s toga mu je i domet veći i pa je i frekvencija u opsegu od nekoliko MHz, efikasnost ovog prenosa je malo manja od običnog induktivnog povezivanja ali je i dalje visoka.

## 6.2 Prenos energije na velike udaljenosti

Far-field tehnologije služe za prenos na mnogo veće udaljenosti i za takav prenos energije se koriste mikro talasi odnosno laseri.

Mikrotalasi koriste par hiljada puta više energije od indukcije odnosno do par desetina kW, njihov domet zajedno sa laserima prelazi desetine kilometara i opseg frekvencija ovih talasa se kreće od 300MHz do 300GHz. Sistem se sastoji od generatora talasa koji naizmjeničnu struju pretvara u jednosmernu a nakon toga jednosmernu struju u elektromagnetne talase. Pomoću antene za prijem, koja se drugačije nazivaju i rectenna, elektromagnetni talasi se pretvaraju u jednosmernu struju. Ideja iza ovog principa je ta da se u orbitu lansiraju svemirske stanice koje bi pomoću solarnih panela proizvodile struju i emitovale je nazad na Zemlju.

Problem kod ovog načina slanja energije je sto je aparatura neophodna za njen rad ogromna i antena za slanje zauzima 1km u prečniku dok antena za prijem zauzima preko 10km prečnika. Sa druge strane plantaža solarnih panela ovih dimenzija može da proizvede 10 hiljada MW električne energije u poređenju sa 750 MW koje bi antena mogla da primi.

Takođe jedna od mana ovog pristupa je lomljenje talas u susretu sa preprekama što rezultuje gubitku efikasnosti.

Lasери su gusto zbijeni svetlosni talasi koji za razliku od elektromagnetnih

mogu da budu vidljivi. Princip rada lasera je da se velike količine struje pretvore u laserski zrak i direktno upere u prijemnik koji će laser pomoću fotonaponskih ćelija pretvoriti u jednosmernu struju.

Prednost lasera je ta što su talasi monohromatski i jednakih talasnih dužina što omogućava optimizaciju u nalaženju idealnog talasa koji ima najbolju stopu prevođenja svetlosti u električnu energiju. Takođe aparatura je znatno manja i kompaktnija i laserski zraci ne ometaju radio komunikacije za razliku od elektromagnetnih.

Sa druge strane mane ovog pristupa su te što su laseri štetni po ljude i zahtevaju velike sigurnosne protokole za ispravan rad, u poređenju sa prijemnicima koji su znatno manji nego kod mikrotalasa, hladnjaci za fotoćelije su ogromni zbog količine energije koja se nalazi u laseru i trenutno maloj efikasnosti pretvaranja svetlosti u fotonaponskim ćelijama. Atmosferski uslovi kao magla i kiša u potpunosti mogu blokirati lasere što ih čini beskorisnim u lošim vremenskim uslovima jer za funkcionisanje potrebno je laser uperiti direktno u prijemnik što je još jedan problem ako između odašiljača i prijemnika ne postoji direktna linija već se između nalaze prepreke. Ovo se može izbeći korišćenjem optičkih kablova čija efikasnost takođe nije optimalna za funkcionisanje.

## 7 Zaključak

Bežični prenos energije ima potencijal da promeni ovu planetu na toliko različitih nivoa. Bilo da se radi o punjenju ručnog uređaja, ili za promenu efekta globalnog zagrevanja na ovoj planeti, bežični prenos energije ima odgovor. Komercijalno najizvodljivija primena koja se pojavljuje u borbi protiv efekata globalnog zagrevanja i sve veće potražnje za električnom energijom je bežični prenos energije mikrotalasnim putem iz svemira. Ova primena će obezbediti neograničenu energiju na Zemlji i takođe otvoriti mnoge nove mogućnosti za istraživanje svemira. Sa bežičnim prenosom energije nove tehnološke kompanije su u moći da prošire mogućnosti većine malih elektronika. Prema prognozi, bežični prenos energije će biti najviše isplativa i održiva alternativa fosilnim gorivima. Sa napretkom u ovoj oblasti koji se dešava sve vreme, svetski bežični sistem prenosa energije je mogućnost u bliskoj budućnosti.

## Literatura

- [1] Standing wave. <https://www.britannica.com/science/standing-wave-physics>. Pogledano: 14.11.2022.
- [2] William C Brown. The history of wireless power transmission. *Solar energy*, 56(1):3–21, 1996.
- [3] W. Bernard Carlson. Tesla: Inventor of the electrical age. *Princeton University Press*, 2013.
- [4] Emmanuel Chukwujioke. Wireless power transfer : The future. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 2015.
- [5] A. David Wunsch. Nikola tesla's true wireless: A paradigm missed [scanning our past]. *Proceedings of the IEEE*, 106:1115–1123, 2018.



- [6] John B. Kennedy. *Collier magazine*, 1926.
- [7] Mengyang Li. Study on wireless power transfer technology toward the application for cardiac pacemaker. [https://siyss20.ungaforskare.se/Mengyang.li\\_report.pdf](https://siyss20.ungaforskare.se/Mengyang.li_report.pdf).
- [8] Castellanos University of York Moore, Julian. Applications of wireless power transfer in medicine : State-of-the-art reviews. *Journal of biomedical optics*, 2019.
- [9] Doug Stovall. How real wireless power will enable a more sustainable future. <https://blog.ossia.com/how-real-wireless-power-will-enable-a-more-sustainable-future>.
- [10] Nikola Tesla. The problem of increasing human energy. *Century magazine*, 1900.
- [11] Nikola Tesla. Talking with the planets. *Collier magazine*, 1901.
- [12] Wikipedia contributors. Wireless power transfer — Wikipedia, the free encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wireless\\_power\\_transfer&oldid=1118144890](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wireless_power_transfer&oldid=1118144890), 2022. [Online; accessed 21-November-2022].