

# Bežični prijenos energije

---

Jović, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:986910>

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

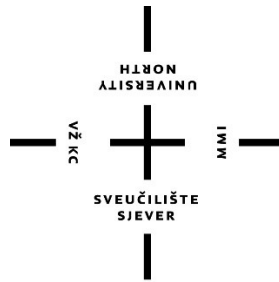
Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-25**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





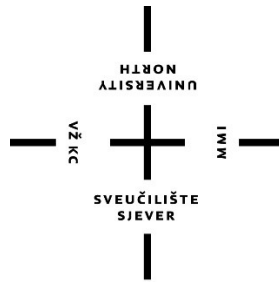
# Sveučilište Sjever

**Završni rad br. 445/EL/2019**

## **Bežični prijenos energije**

**Ivan Jović, 0850/336**





# Sveučilište Sjever

**Odjel za Elektrotehniku**

**Završni rad br. 445/EL/2019**

## **Bežični prijenos energije**

**Student**

Ivan Jović, 0850/336

**Mentor**

Dr.sc Dunja Srpak, dipl.ing.el., predavač

Varaždin, rujan 2019. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za elektrotehniku

STUDIJ preddiplomski stručni studij Elektrotehnika

PRISTUPNIK Ivan Jović

MATIČNI BROJ 0850/336

DATUM 18.06.2019

KOLEGIJ Uređaji energetske elektronike

NASLOV RADA Bežični prijenos energije

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Wireless power transmission

MENTOR dr.sc. Dunja Srpak

ZVANJE predavač

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc. dr. sc. Ladislav Havaš, dipl.ing.el.
2. mr.sc. Ivan Šumiga, dipl.ing.el., viši predavač
3. dr. sc. Dunja Srpak, dipl.ing.el., predavač
4. doc. dr. sc. Emil Dumić, dipl. ing.el., - rezervni član
5. \_\_\_\_\_

## Zadatak završnog rada

BROJ 445/EL/2019

OPIS

U završnom radu je potrebno opisati vrste i načine bežičnog prijenosa energije. Potrebno je posebno objasniti induktivni način prijenosa energije, prikazano na izrađenoj maketi.

U radu je potrebno:

- Opisati vrste i načine bežičnog prijenosa energije,
- Detaljno opisati induktivni način prijenosa energije,
- Izraditi maketu za prikaz principa rada bežičnog prijenosa energije,
- Testirati izrađeni uređaj i komentirati rezultate mjerenja,
- Opisati i komentirati mogućnosti primjene opisanih sustava i njihovih unaprjeđenja.

ZADATAK URUČEN 17.09.2019

POTPIS MENTORA

SVEUČILIŠTE  
SJEVER



## Sažetak

U današnje vrijeme sve više se čuje pojam bežično punjenje. Bežični punjači postaju sve više popularni te su velike kompanije koje proizvode mobitele, kao Samsung, Iphone, Huawei i mnoge druge počele proizvoditi tzv. bežične punjače. Sve većom popularizacijom električnih automobila javila se ideja o bežičnom punjenju automobila. Razvojem tehnologija u budućnosti smatra se da će biti razvijeni sustav za bežično slanje električne energije na Zemlju iz svemira.

Završni rad sadržava povijesni razvoj i nastanak bežičnog prijenosa energije, načine bežičnog prijenosa energije te njihov opis. Posebno je opisan induktivni bežični prijenos energije koji se najčešće koristi u današnje vrijeme. Induktivnim punjenjem danas se pune mobiteli, razni uređaji male snage pa sve do električnih automobila. Također opisane su fizikalne osobine i jednadžbe za induktivno bežično punjenje.

**Ključne riječi:** Bežični prijenos energije, induktivni bežični prijenos energije, magnetska indukcija, promjenljivo magnetsko polje, transmitter, prijarnik, zavojnice

## Abstract

Nowadays, the advent of wireless charging is increasingly being heard. Wireless chargers are becoming more and more popular and large mobile companies such as Samsung, Iphone, Huawei and many others have started to produce so called. cordless chargers. The idea of wireless car charging has become increasingly popular with electric cars. Developed technology will in the future evolve into a system for sending wireless electricity to Earth from space.

The final paper contains the historical development and emergence of wireless energy transfer, which describe wireless front-end energy. In particular, the inductive wireless energy transfer most commonly used today is described. Inductive charging is now full of cell phones, various men's power devices, all the way to electric cars. Physical properties and equations for inductive wireless charging are also described.

**Keywords:** Wireless energy transfer, inductive wireless energy transfer, magnetic induction, variable magnetic field, transmitter, receiver, coils

## **Popis korištenih kratica**

<b>AC-DC</b>	Izmjenična struja - istosmjerna struja
<b>SHARP</b>	Stationary High Altitude Relay Platform (Stacionarna platforma za nadmorsku visinu)
<b>MHI</b>	Mitsubishi Heavy Industries
<b>MOSFET</b>	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Tranzistor
<b>IGBT</b>	Insulated Gate Bipolar Tranzistor
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation

# Sadržaj

1. Uvod.....	4
1.1.Povijest bežičnog prijenosa energije .....	5
2 Tehnike bežičnog prijenosa energije.....	7
2.1.Bežični prijenos energije na velike udaljenosti .....	8
2.2.Bežični prijenos energije na male udaljenosti .....	10
3. Bežični prijenos energije induktivnim i rezonantno induktivnim povezivanjem.....	11
3.1.Fizikalne osnove induktivnog prijenosa energije .....	11
3.2.Samoindukcija i međuiudukcija .....	15
3.3.Zračni transformator .....	18
3.4.Efektivne vrijednosti izmjenične električne struje i napona.....	19
3.5.Opterećenja u krugu izmjenične struje .....	21
3.5.1.Radni (djelatni) otpor u izmjeničnom strujnom krugu .....	21
3.5.2.Induktivni otpor u izmjeničnom strujnom krugu .....	22
3.5.3.Kapacitivni otpor u izmjeničnom strujnom krugu .....	24
3.5.4.Rezonancija.....	26
4. Princip rada induktivnog bežičnog prijenosa energije.....	31
4.1.Primarni krug induktivnog bežičnog prijenosa energije (transmitter).....	31
4.1.1.Ispravljač.....	32
4.1.2.Izmjenjivač.....	34
4.1.3.Zavojnica .....	37
4.2.Sekundarni krug induktivnog bežičnog prijenosa energije (prijamnik) .....	40
5. Izrada modula za induktivni bežični prijenos energije.....	42
5.1.Shema spoja .....	43
5.2.Zavojnice .....	44
5.3.Rezultati mjerenje.....	44
6. Zaključak.....	48
7. Literatura.....	49



## 1. Uvod

Potreba ljudske populacije za električnom energijom svakim danom se povećava. Prijenos električne energije od samih proizvodnih postrojenja do krajnjih potrošača zahtjeva uporabu velikih količina kablova i žica. Dalekovodi, električne mreže, razni strojevi i aparati te mnogobrojni kućanski uređaji povezani su nekom vrstom kabela što stvara bespotrebni nered. Uređaji male snage kao što su mobiteli, fotoaparati, pametni satovi i mnogi drugi te uređaji srednje snaga kao prijenosna računala imaju različite priključke za punjenje što dodatno stvara nered.

Razvojem i korištenjem bežičnog prijenosa energije uvelike bi se riješio ovaj problem. Velika prednost bežičnih punjača je mogućnost punjenja različitih uređaja jednim punjačem. Ovakav prijenos koristi predajnik i prijamnik bez međusobnog povezivanja žicom. Između samog predajnika i prijarnika postoji zračni prostor kroz koji se ostvaruje prijenos energije. Tehnologija bežičnog prijenosa energije ima široki raspon upotrebe, od uređaja malih snaga kao što su električne četkice, mobilni uređaji i sl. do električnih automobila velikih snaga. Prijenos je moguće ostvariti na manje i veće udaljenosti za što se koristi više načina i metoda. Induktivno povezivanje koristi se za prijenos na manje udaljenosti, rezonantno induktivno povezivanje za prijenos na srednje udaljenosti te elektromagnetskim valovima na velike udaljenosti.

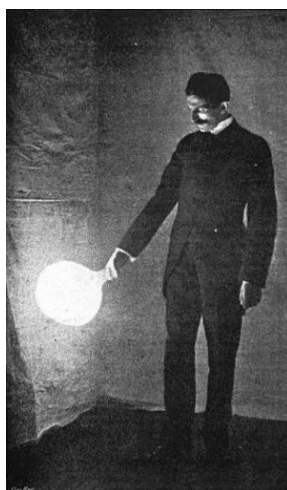
Ideja o bežičnom prijenosu energije stara je više od sto godina. Otkrićem da električna struja protjecanjem kroz vodič stvara magnetsko polje te da su električno i magnetsko polje povezani, Nikola Tesla počeo je istraživati i raditi pokuse na tu temu. Danas se ta istraživanja koriste kao temelj bežičnog prijenosa energije, te uporabom novih tehnologija i elementa povećava njezina učinkovitost i efikasnost.

## 1.1. Povijest bežičnog prijenosa energije

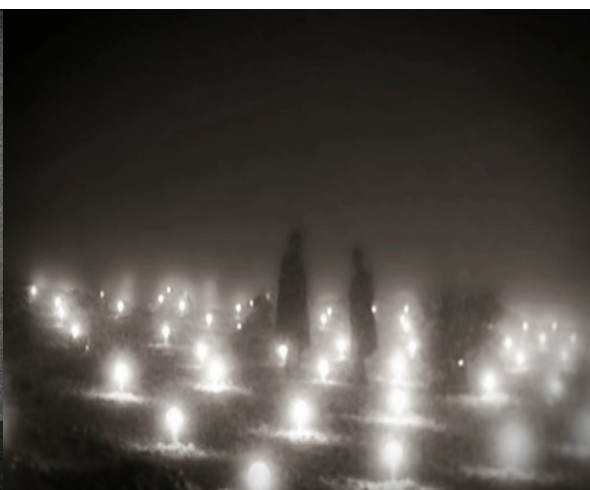
H. C. Oersted 1819. otkriva da električna struja koja teče kroz vodič stvara magnetsko polje oko samog vodiča. Amperov zakon, Biot-Savartov zakon i Faradayev zakon matematički opisuju ovo svojstvo električne struje. J. C. Maxwell 1864. pomoću svojih jednadžbi opisuje povezanost električnog i magnetskog polja te međusobni utjecaj jednog na drugo. Ovim osnovnim zakonima i otkrićima nastaje nova grana fizike, elektromagnetizam.

H. R. Herts 1888. pomoću oscilatora spojenog sa indukcijskom zavojnicom prenosi električnu energiju kroz mali zračni raspor. Ovim pokusom potvrđeno je postojanje elektromagnetskog zračenja. Prijenos energije bežičnim putem jako je zanimao Nikolu Teslu.

Tesla prvi ozbiljnije počinje proučavati i eksperimentirati sa bežičnim prijenosom energije. Ideja Nikole Tesle je bila da bežičnim prijenosom omogući čovječanstvu besplatnu energiju. 1893. osvjetljava fosfornu žarulju bežičnim prijenosom energije (Slika 1.1). 1896. uspijeva poslati signal na udaljenost od 48 km. Nekoliko godina poslije bežičnim putem upalio je 200 žarulja i jedan električni motor i to na udaljenosti od 40 km (Slika 1.2). Zatim započinje gradnju Wardencliff tornja koji bi se koristio za prijenos električne energije bežičnim putem na velike udaljenosti (Slika 1.3). Ali zbog velikih gubitaka i stvaranja velikog električnog polja projekt je ostao bez financijskih sredstva i na kraju bio napušten.



Slika 1.1



Slika 1.2



Slika 1.3

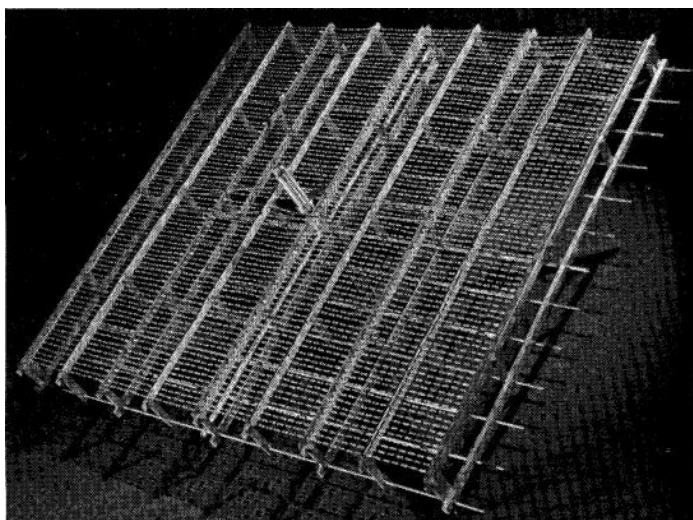
*Slika 1.1 Nikola tesla drži osvjetljenu žarulju napajanu bežičnim prijenosom energije [1]*

*Slika 1.2 200 žarulja osvjetljenih bežičnim prijenosom energije s udaljenosti od 40 km [2]*

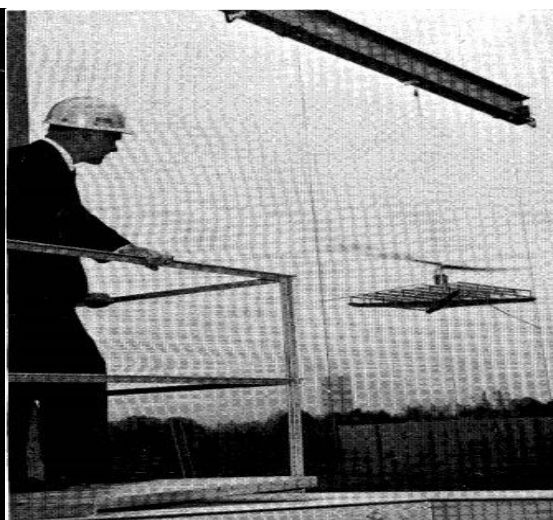
*Slika 1.3 Wardencliff toranj [4]*

Tadašnja tehnologija bila je u mogućnosti samo pretvoriti električnu energiju u mikrovalove ali ne i obrnuto. Ideja o bežičnom prijenosu energije je bila praktički zaboravljena.

W. C. Brown 1964. pomoću ispravljačke antene, rectenne pretvara mikrovalove u električnu energiju (Slika 1.4). Svoj dizajn demonstrira pomoću helikoptera koji je bio napajan pomoću bežičnog prijenosa energije (Slika 1.5). 1968. nastaje koncept bežičnog prijenosa energije sa solarnih satelita. Također u 60-ima se počinje koristiti rezonantno induktivna veza pomoću koje su se bežično napajali medicinski uređaji. 1971. M. Cardullo patentira uređaj za identifikaciju radio frekvencije. Iste godine Don Otto dizajnira kolica koja su bila napajana induktivnim bežičnim prijenosom energije.



*Slika 1.4*



*Slika 1.5*

*Slika 1.4 Ispravljača antena napravljena za napajanje helikoptera bežičnim putem pomoću mikrovalova [3]*

*Slika 1.5 Helikopter u letu napajan mikrovalnim bežičnim prijenosom energije [3]*

M. Soljačić, profesor na MIT-u 2007. magnetskim rezonantnim bežičnim prijenosom energije ostvaruje prijenos na udaljenosti od 2m s učinkovitosti od 45%.

2008. nastaje Wireless Power Consortium u kojem su definirani standardi za bežični prijenos energije. [4]

## 2. Tehnologije i načini bežičnog prijenosa energije

Bežični prijenos energije možemo podijeliti na prijenos na male udaljenosti i prijenos na velike udaljenosti kao što je prikazano u Tablici 1.. Prijenos na velike udaljenosti moguće je ostvariti pomoću mikrovalova i lasera. Ovaj tip tehnologije se zadnjih godina sve više razvija. Upotreba ovakve tehnologije moguća je kod bespilotnih letjelica za nadziranje vremena pa sve do slanja električne energije na Zemlju iz svemira. Prijenos na male udaljenosti dijelimo na indukcijско povezivanje i rezonantno indukcijско povezivanje. Indukcijskim povezivanjem predajnik i prijammnik moraju biti na udaljenosti od svega par cm. Kod rezonantno indukcijskom povezivanje prijenos energije je moguć i na nekoliko metara. Ovakav bežični prijenos električne energije koristi se za napajanje uređaja malih i srednjih snaga kao što su kućanski aparati, mobiteli, tableti, razni senzori. Poboljšanjem efikasnosti i udaljenosti prijenosa u kućanstvu bi se svi električni uređaji mogli napajati bežičnim putem. Tablica 2. prikazuje usporedbu tehnologija bežičnog prijenosa energije.

Tablica 1. Načini bežičnog prijenosa energije

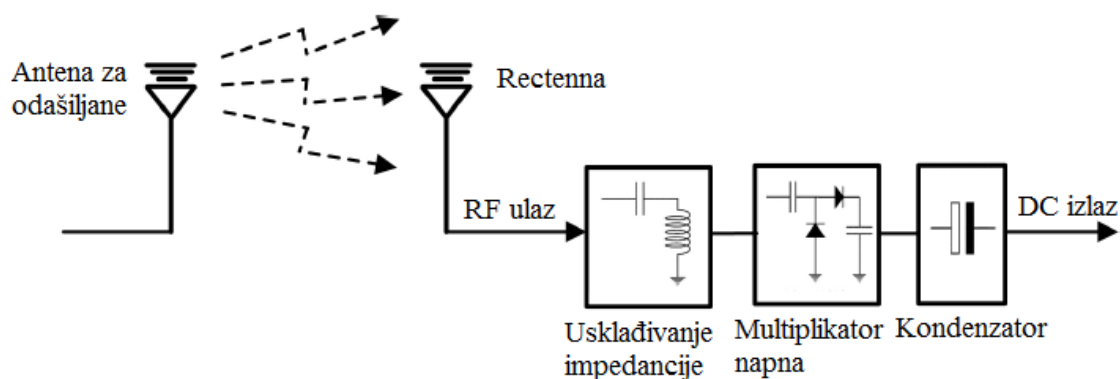
Bežični prijenos energije			
Na velike udaljenosti		Na male udaljenosti	
Mikrovalovima	Laserima	Indukcijskim povezivanjem	Rezonantno indukcijским povezivanjem

Tablica 2. Usporedba tehnologija bežičnog prijenosa energije

	Induktivno povezivanje	Rezonantno induktivno povezivanje	Mikrovalni prijenos	Laserski prijenos
Primljena snaga	Nekolika W	Stotine W	Do desetine kW	Očekivano do MW
Moguća udaljenost	Nekoliko cm	Nekoliko m	Do desetine km	Do desetine km
Frekvencija rada	Nekoliko kHz do desetine kHz	Nekoliko MHz	Do 300 GHz	Više od 1 THz
Efikasnost	Vrlo visoka	Visoka	Srednja	Srednja

## 2.1. Bežični prijenos energije na velike udaljenosti

Bežični prijenos na velike udaljenosti ostvaruje se pomoću mikrovalova i lasera. Prijenos mikrovalovima koristi generator mikrovalova, antenu za odašiljanje te antenu za primanje mikrovalova. Frekvencija prijenosa se kreće od 300MHz do 300GHz. Princip rada prikazan je na Slici 1. Prijenos energije započinje na strani predajnika. Potrebno je pretvoriti izmjeničnu struju u direktnu preko AC-DC ispravljača. Zatim se DC struja pretvara u mikrovalove pomoću magnetrona. Mikrovalovi se šalju u atmosferu preko antene za odašiljanje te se okolnim zrakom šire brzinom svjetlosti. Na strani prijmnika se mikrovalovi ponovo pretvaraju u DC struju potrebnu za napajanje ili punjenje nekog električnog uređaja. Postoji više vrsta antena za odašiljanje mikrovalova te svaka ima drugačiju efikasnost. Neke od odašiljačkih antena koje se koriste su mikro trake, parabolične antene te slotted waveguide antene koje ujedno imaju i najveću efikasnost. Antena na strani prijmnika koja ispravlja mikrovalove u DC struju zove se rectenna. [5]



Slika 2.1 Princip rada bežičnog prijenosa pomoću mikrovalova

Efikasnost ovakvog prijenosa energije kreće se čak i do 95%. Kanadski centar za komunikacijska istraživanja je 80tih godina napravio je bespilotnu letjelicu koja je za let koristila samo energiju dobivenu preko mikrovalnog bežičnog prijenosa energije. Letjelicu su nazvali SHARP. Ova letjelica prikazana na slici 2.1 dobivala je energiju od mikrovalnog odašiljača sa zemlje. Na sebi je imala ispravljačku antenu u obliku diska koja je mikrovalove pretvarala u električnu energiju.

Mogla je letjeti na visini od 21km u krugovima promjera 2km i ako se nalazila u dometu odašiljača dobivala je konstanto energiju te je mogla letjeti mjesecima bez slijetanja.



*Slika 2.2 Bepilotna letjelica SHARP [6]*

Zbog visoke učinkovitosti pretvorbe mikrovalova u električnu energiju nastale su ideje da se energija na Zemlju šalje iz svemira preko solarnih satelita koji bi solarnim panelima prikupljani sunčevu svjetlost. David Criswell sa sveučilišta u Houstonu otišao je korak dalje i predložio ideju da se pomoću tehnologija bežičnog prijenosa električne energije mikrovalovima, energija na Zemlju šalje sa solarnih elektrana koje bi bile smještene na Mjesecu. [6]

Japanski inženjeri i znanstvenici iz tvrtke Mitsubishi Heavy Industries ostvarila je bežični prijenos 10 kW energije na udaljenosti od 500 m koristeći mikrovalove. Uporabom ove tehnologije u kućanstvu svi električni uređaji bi se mogli napajati bežičnim putem, no tvrtka MHI u suradnji s Japan Space System razvija ovo tehnologiju u vidu slanja bežične energije iz svemira na Zemlju. [7]

Kod ove tehnologije bežičnog prijenosa energije mikrovalovi se raspršuju u okolni prostor. Zbog mogućnosti fokusiranja prijenosa energije počela se razmatrati i razvijati tehnologija bežičnog prijenosa energije pomoću zrake svjetlosti ili lasera.

Izvor bežičnog prijenosa energije je visoko intenzivna laserska zraka usmjerena k prijammniku. Ovakav način prijenosa energije sličan je generiranju fotonaponske pomoću solarnih ćelija. Lasersku zraku se usmjerava na fotonaponske ćelije koje pretvaraju svjetlosnu energiju u električnu energiju. [5] Svjetlosna zraka koju laser emitira je monokromatska i koherentna. To znači da se zraka svjetlosti sastoji od jedne boje koja ima jednu valnu duljinu i istu frekvenciju, time se omogućuje prijenos energije na velike udaljenosti ukoliko između predajnika i prijammnika ne postoji neka prepreka. S obzirom da svaka boja svjetlosti ima određenu valnu duljinu i frekvenciju potrebno je odabrati laser koji emitira svjetlost s najboljom efikasnošću pretvorbe svjetlosne energije u električnu energiju. Ova tehnologija se kao i tehnologija bežičnog prijenosa energije

pomoću mikrovalova u budućnosti želi primijeniti za napajanje bespilotnih letjelica, slanje električne energije iz svemira na Zemlju te napajanje lunarnih rovera. Tablica 3. prikazuje usporedbu mikrovalnog i laserskog prijenosa s njihovim prednostima i nedostacima. [8]

Tablica 3. Usporedba bežičnog prijenosa energije pomoću mikrovalova i lasera

	Mikrovalovi	Laser
Prednosti	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Malo slabljenje zbog atmosfere</li> <li>- Visoka efikasnost pretvorbe energije</li> <li>- Elektronsko upravljane zrakom (dobro razvijeno i implementirano)</li> <li>- Idealno za zemaljske aplikacije</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visoka gustoća energije</li> <li>- Usko, fokusirana svjetlosna zraka</li> <li>- Mali predajnik i primatelj</li> <li>- Elektronsko upravljanje zrakom (trenutno u razvoju)</li> <li>- Idealno za svemirske aplikacije</li> </ul>
Nedostaci	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Veliki predajnik i prijammnik (veličina i težina)</li> <li>- Niska gustoća energije</li> <li>- Potrebni sigurnosni sustavi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utjecaj atmosfere</li> <li>- Niska stopa efikasnosti (trenutno)</li> <li>- Sustavi velikih snaga zahtijevaju velike rashladne sustave</li> <li>- Potrebni sigurnosni sustavi</li> </ul>

## 2.2. Bežični prijenos energije na male udaljenosti

Bežični prijenos energije na male udaljenosti dijelimo na induktivno povezivanje i rezonantno induktivno povezivanje. Zbog mogućnosti bežičnog prijenosa snage od nekoliko watta pa sve do kilowatta tehnologija induktivnog bežičnog prijenosa energija koristi se u industrijske, medicinske i svakodnevne svrhe. Najraširenija upotreba ovakvog tipa tehnologije je za napajanje uređaja malih snaga kao što su mobiteli, tableti i sl. Međutim razvijaju se sustavi za bežično napajanje uređaja velikih snaga kao što su električni automobili, te bi u budućnosti ovakav način punjenje mogao zamijeniti današnji način gdje je potrebno prikopčati punjač sa određenim uređajem ili vozilom kako bi se isto moglo napuniti. Efikasnost prijenosa energije ovisi o udaljenosti predajnika i prijammnika. S većom udaljenosti efikasnost pada. Ova dva načina biti će detaljno opisana u poglavlju 3. Bežični prijenos energije induktivnim i rezonantno induktivnim povezivanjem.[4]

### 3. Bežični prijenos energije induktivnim i rezonantno induktivnim povezivanjem

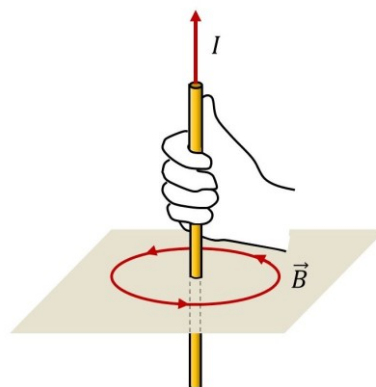
Bežični prijenos energije kod induktivnog povezivanja ostvaruje se stvaranjem promjenjivog elektromagnetskog polja na strani predajnika. Ako se prijammnik nalazi unutar generiranog promjenjivog elektromagnetskog polja, na strani prijammnika se javlja elektromagnetska indukcija čime se inducira električna struja na prijammniku.

#### 3.1. Fizikalne osnove induktivnog prijenosa energije

Danski fizičar Oersted 1819. godine otkrio je da se protjecanjem električne struje kroz vodič oko njega stvara magnetsko polje. Magnetsko polje oko ravnog vodiča je oblika koncentričnih kružnica (Slika 3.1). Razmak između magnetskih silnica se povećava s udaljenosti od vodiča kojim teče struja. To znači da se gustoća magnetskog pola smanjuje s udaljenosti. Smjer magnetskih silnica određuje se pravilom desne ruke, gdje nam palac pokazuje smjer električne struje a savijeni prsti pokazuju smjer magnetskih silnica (Slika 3.2). [9]



Slika 3.1 Magnetske silnice oko ravnog vodiča [9]



Slika 3.2 Pravilo desne ruke [9]

Magnetska indukcija ravnog vodiča opisuje se formulom:

$$B = \mu \frac{I}{2\pi a} \quad [T] \quad (1)$$

Gdje je: B – magnetska indukcija [T]

I – električna struja [A]

$\mu$  - magnetska permeabilnost [H/m , N/A<sup>2</sup>, Vs/Am]

a – udaljenost od vodiča [m]



Magnetska permeabilnost je elektromagnetna osobina materijala koja pokazuje intenzitet magnetizacije tijela kada se ono izloži vanjskom magnetskom polju.

Magnetska permeabilnost vakuuma (magnetska konstanta) iznosi:

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ [H/m]} \quad (2)$$

Relativna magnetska permeabilnost fizikalna je veličina koja opisuje magnetsku propusnost tvari o odnosu na permeabilnost vakuuma.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3)$$

Relativna magnetska permeabilnost zraka iznosi  $\mu_r = 1.00000037$

Zakon protjecanja povezuje električnu struju kao pobudu i jakost magnetskog polja. Ukupna obuhvaćena struja jednaka je sumi parcijalnih struja obuhvaćenih krivuljom.

$$\oint \vec{H} * d\vec{l} = \Theta = \sum_s I \quad (4)$$

Gdje je: H – jakost magnetskog polja [A/m]

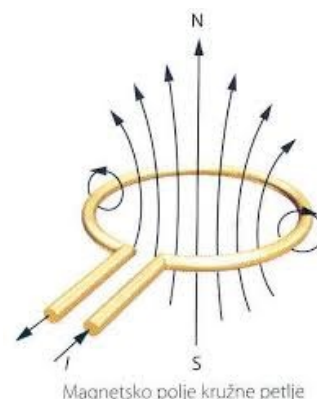
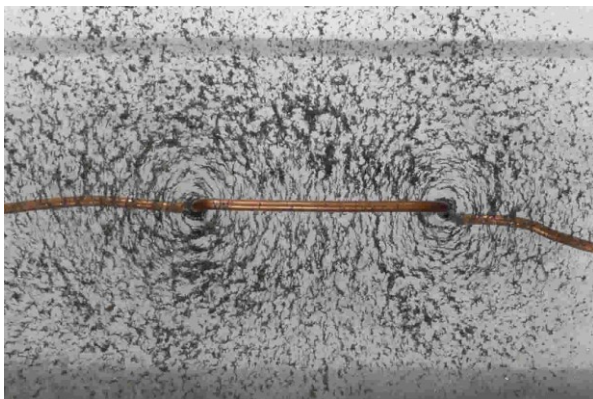
l – duljina zatvorene krivlje [m]

I – električna struja [A]

$\Theta$  – protjecanje

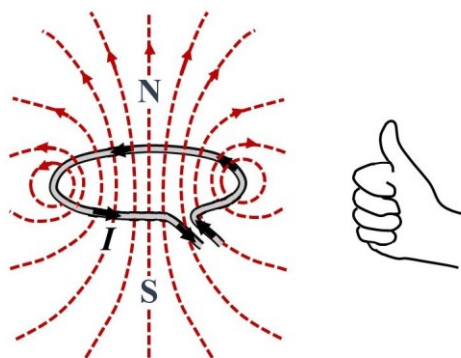
s – površina koju omeđuje krivulja l

Ako ravni vodič savinemo u obliku kružne petlje ili prstena magnetsko polje oko vodiča se povećava. Izgled magnetskih silnica nastalih protjecanjem struje kroz vodič prikazane su slikom 3.3 i slikom 3.4.



Slika 3.3 Magnetsko polje kružne petlje[9] Slika 3.4 Silnice magnetskog polja kružne petlje[10]

Smjer magnetskih silnica također se određuje pravilom desne ruke (Slika 3.5). Međutim kod kružne petlje savijeni prsti pokazuju smjer struje dok ispruženi palac pokazuje smjer magnetskih silnica. Gustoća magnetskog polja najveća je unutar petlje.[9]



Slika 3.5 Određivanje smjera magnetskih silnica kružne petlje [9]

Magnetska indukcija u središtu kružne petlje ili prstena iznosi:

$$B = \mu \frac{I}{2r} [T] \quad (5)$$

Oerstedovim pokusom ustanovljeno je da električna struja oko vodiča stvara magnetsko polje. Međutim postavlja se pitanje da li se pomoću magnetskog polja može inducirati električna struja. Michael Faraday otkrio je kako pomoću magnetskog polja dobiti električnu struju.

Ako se magnet postavi unutar zavojnice i on miruje u zavojnici se ne inducira električna struja. Pomicanjem magneta u oba smjera u zavojnici se inducira električna struja. Bržim pomicanjem magneta inducira se veća struja. Ovo svojstvo vrijedi i u slučaju ako se zavojnica giba u odnosu na magnet. Kod zavojnice s većim brojem zavoja inducirat će se veća struja.

Pojava pri kojoj se promjenjivim magnetskim tokom stvara električno polje i električna struja naziva se elektromagnetska indukcija.[11]

Faradayev zakon elektromagnetske indukcije:

Napon induciran na krajevima zavojnice proporcionalan je broju navoja i brzini promjene magnetskog toka

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} [V] \quad (6)$$

Gdje je:  $\varepsilon_i$  – inducirani napon [V]

$N$  – broja namota zavojnice

$d\Phi$  – promjena magnetskog toka [Wb]

$dt$  – vrijeme [s]

Omjer  $d\Phi/dt$  izražava brzinu promjene magnetskog toka.

Inducirani napon u zavojnici je suprotnog predznaka. Suprotni predznak nam objašnjava Lenzovo pravilo koje glasi da električna struja koja nastaje zbog inducirano napona ima takav smjer da proizvodi magnetski tok koji se suprotstavlja promjeni toka zbog kojeg je nastao. Kada Lenzovo pravilo ne bi vrijedilo inducirana struja bi stalno rasla i dobilo bi se više energije nego što je uloženo.[11]

Magnetski tok se izražava po formuli:

$$\Phi = B * s \text{ [Wb]} \quad (7)$$

Gdje je:  $\Phi$  – Magnetski tog [Wb]

$B$  – Magnetska indukcija [T]

$s$  – površina presjeka [ $m^2$ ]

Za magnetski tok dobiven izmjeničnom strujom vrijedi:

$$\Phi = B * S * \cos\omega t \quad (8)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (9)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (10)$$

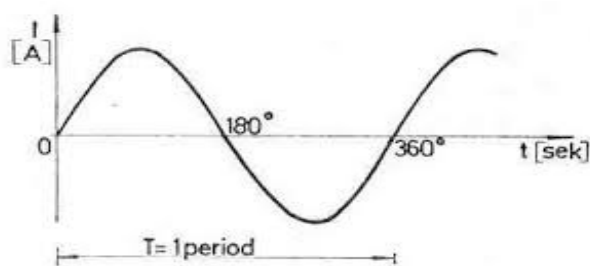
Gdje je:  $\omega$  – kutna brzina [rad/s]

$f$  – frekvencija [Hz]

$T$  – perioda [s]

Iz toga slijedi da je inducirani napon:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = N * B * S * \omega * \sin\omega t \quad (11)$$



Slika 3.6 Izmjenična struja

Usporedba električnog kruga s magnetskim krugom:

Tablica 4. Usporedba električnog kruga s magnetskim krugom

Električni krug	U	I	$\Gamma = \frac{I}{S}$	$E = \frac{U}{l}$	$\gamma = \frac{\Gamma}{E}$	$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{\gamma} * \frac{l}{s}$	$W_{el} = U * I * t$
Magnetski krug	$\Theta$	$\Phi$	$B = \frac{\Phi}{s}$	$H = \frac{\Theta}{l}$	$\mu = \frac{B}{H}$	$R_m = \frac{\Theta}{\Phi} = \frac{1}{\mu} * \frac{l}{s}$	$W_{mg} = \frac{\Theta * \Phi}{2}$

Gdje je: U – Napon [V]

I – Struja [A]

$\Gamma$  – gustoća struje [A/m<sup>2</sup>]

E – električno polje [V/m, N/C]

$\gamma$  – specifična vodljivost [S]

$W_{el}$  – električna energija [Wh]

s – površina presjeka [m<sup>2</sup>]

$\Theta$  – Protjecanje [A]

$\Phi$  – Magnetski tok [Wb, Vs]

B – Magnetska indukcija [T, Wb/m<sup>2</sup>]

H – magnetsko polje [A/m]

$\mu$  - permeabilnost [Vs/Am]

$W_{mg}$  – magnetska energija [J]

l – duljina vodiča [m]

### 3.2. Samoindukcija i međuiudukcija

Bežični prijenos energije induktivnim povezivanjem ostvaruje se pomoću primarne i sekundarne zavojnice. Protjecanjem AC struje kroz primarnu zavojnicu stvara se promjenljivo magnetsko oko primarne zavojnice. Ako se sekundarna zavojnica dovede unutar promjenljivog magnetskog toka primarne zavojnice dolazi do međuiudukcije dviju zavojnica i na sekundaru se inducira električni napon. Međutim silnice promjenljivog magnetskog toka primarne zavojnice obuhvaćaju i nju samu pa dolazi do samoindukcije. Uzrok samoindukcije je vlastito magnetsko polje zavojnice. Zavojnica inducira napon sama u sebi.[12]

Magnetska indukcija je proporcionalna struji kroz zavojnicu pa je i magnetski tok kroz zavojnicu proporcionalan struji

$$\Phi = L * I \quad (12)$$

Gdje je: L – induktivnost zavojnice [H]

Koeficijent samoindukcije ili induktivitet zavojnice se dobije tako da u osnovnu jednadžbu (6) uvrstimo izraz  $d\Phi = N \frac{di}{R_m}$ , pa će napon samoindukcije biti jednak:

$$\varepsilon_s = - \frac{N^2}{R_m} \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (13)$$

Gdje je:  $L = \frac{N^2}{R_m}$  koeficijent samoindukcije, induktivitet ili induktivnost zavojnice

Supstitucijom izraza  $\Phi = \frac{IN}{R_m}$ , koeficijent L se može prikazati i u obliku:

$$L = \frac{N * \Phi}{I} = \frac{\Psi}{I} \quad (14)$$

Gdje je:  $\Psi$  – ukupni ili ulančani tok

$$\Psi = N * \Phi = N * B * S \quad (15)$$

Magnetska indukcija B dobivena promjenjivim magnetskim poljem ovisi o jakosti električne struje I, broju zavoja zavojnice N po duljini zavojnice l.

$$B = \mu \frac{N * I}{l} \quad (16)$$

$$\Psi = N * \mu \frac{N * I}{l} * S = \mu \frac{N^2 * I}{l} * S$$

Iz usporedbe sa izrazom (11) dobiva se:

$$L = \frac{\mu * N^2}{l} * S [H] \quad (17)$$

Induktivnost zavojnice karakterizira zavojnicu. Ovisi o broju namota, površini presjeka oblika same zavojnice, duljini zavojnice i magnetskim svojstvima prostora u koje se nalazi.

$$[U] = [L] \frac{[\Delta I]}{[\Delta t]} \rightarrow [L] = [U] \frac{[\Delta t]}{[\Delta I]} = V \frac{s}{A} = H$$

Mjerna jedinica za induktivitet zavojnice je henri H.

Pojava međuidukcije nastupa između dvije ili više zavojnica. Ukoliko se sekundarna zavojnice nalazi unutar promjenljivog magnetskog polja primarne zavojnice u njoj se inducira elektromotorna sila, odnosno inducira se električni napon [13]

$$\varepsilon_{i2} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (18)$$

$$d\Phi = N_1 \frac{di}{Rm} \quad (19)$$

$$\varepsilon_{i2} = -\frac{N_1 N_2}{Rm} * \frac{di_1}{dt} = -M \frac{di_1}{dt}$$

Gdje je:  $\varepsilon_{i2}$  – inducirani napon na sekundarnoj zavojnici [V]

$Rm$  – magnetski otpor [ $H^{-1}$ ]

$M$  – koeficijent međuidukcije ili međuiduktivnost dvije zavojnice

Ako je promjenjivi magnetski tok stvoren u zraku ( $\mu = \text{konst.}$ ) slijedi:  $Rm = \text{konstantan}$

$L = \text{konstantan}$

$M = \text{konstantan}$

$$L_1 L_2 = \frac{N_1^2}{Rm} * \frac{N_2^2}{Rm} = \left( \frac{N_1 N_2}{Rm} \right)^2 = M^2$$

$$M = \sqrt{L_1 L_2} \quad (20)$$

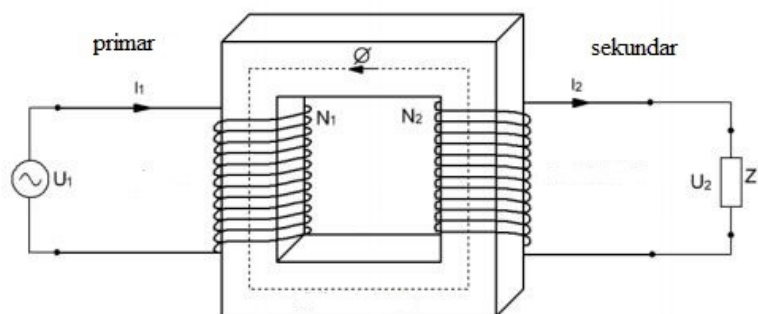
Ovaj uvjet vrijedi samo ako je magnetski tok primarne zavojnice u potpunosti povezan sa svim zavojima sekundarne zavojnice. Cijeli prostor oko zavojnica je vodljiv za magnetski tok, zbog toga dolazi do rasipanja magnetskih silnice i smanjenja koeficijenta M uslijed slabije magnetske povezanosti primarne i sekundarne zavojnice. U tom slučaju uvodi se faktor magnetske veze k

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (21)$$

Kod potpunog magnetskog povezivanja  $k=1$ , a za nepotpuno  $k<1$

### 3.3. Zračni transformator

Transformatori također koriste magnetsku indukciju i međuinukciju za transformiranje električne energije na veličine potrebne određenom trošilu. Bežični prijenos energije induktivnim povezivanjem je ubiti transformator bez željezne jezgre, zračni transformator.[14]



Slika 3.7 Shema transformatora

Transformator se sastoji od dvije zavojnice, primarne i sekundarne namotane oko željezne jezgre. Željezna jezgra omogućuje veliku magnetsku povezanost između dvije zavojnice, nema velikih gubitaka. Svaka zavojnica ima N broj zavoja.

Promjenjivi magnetski tok inducira u primarnoj zavojnici napon prema (6) je  $\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ , dok je inducirani napon u sekundarnoj zavojnici  $\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{-N_1 \frac{d\Phi}{dt}}{-N_2 \frac{d\Phi}{dt}}$$

Prva transformatorska jednačba:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (22)$$

Prema izrazu (4) slijedi  $\oint \vec{H} * d\vec{l} = \Theta = N_2 I_2 - N_1 I_1 = I_0 N_1$

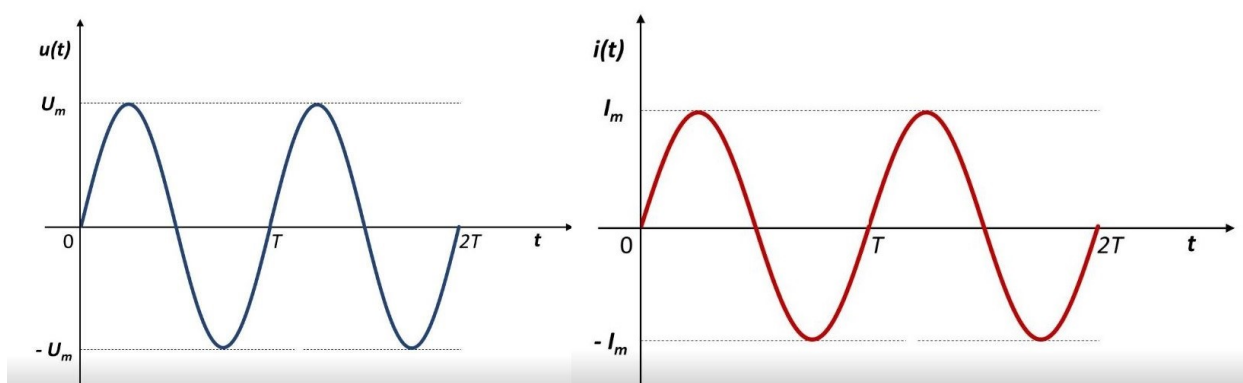
$$\Theta_2 - \Theta_1 = \Theta_0; I_2, I_1 \gg I_0 \rightarrow \Theta_0 \approx 0$$

Druga transformacijska jednačba:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (23)$$

### 3.4. Efektivne vrijednosti izmjenične električne struje i napona

Izmjenična struja i napon stalno i u jednakim vremenskim razmacima mijenjaju svoj smjer i iznos. Promjena iznosa i smjera izmjenične struje i napona pokazuje sinusoida. [15]



Slika 3.8 Sinusni oblik izmjeničnog napona i struje [15]

Trenutne vrijednosti izmjenične struje i napona:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m * \sin \omega t \\ i(t) &= I_m * \sin \omega t \end{aligned} \quad (24)$$

Gdje su:  $U_m, I_m$  maksimalne vrijednosti



Efektivne vrijednosti struje i napona dobivaju se iz izraza:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (25)$$

Efektivna vrijednost izmjenične struje definira se kao vrijednost istosmjerne struje stalne jakosti koja bi proizvela jednaki toplinski učinak kao i ta izmjenična struja. Instrumenti za mjerenje izmjeničnih struja i napona kao što su voltmetri i ampermetri pokazuju efektivnu vrijednost, jer je sila koja otklanja kazaljku instrumenta dobivena na osnovi toplinskog ili elektrodinamičkog učinka.

Trenutnoj vrijednosti izmjeničnog napona u zavojnici suprotstavlja se inducirana elektromotorna sila.

$$u(t) = U_m * \sin \omega t = \sqrt{2} * U * \sin \omega t$$

Inducirana elektromotorna sila (inducirani napon unutar zavojnice)

$$u(t) = \varepsilon i = -N \frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow d\Phi = \frac{u(t)}{N} * dt$$

Integracijom se dobiva

$$\Phi(t) = \frac{1}{N} * \int u(t) * dt = \frac{1}{N} * \sqrt{2} * U * \int_0^t \sin(\omega t) dt = \frac{1}{N} * \frac{\sqrt{2} * U}{\omega} * \cos(\omega t)$$

Gdje je  $\Phi_{max} = \frac{1}{N} * \frac{\sqrt{2} * U}{\omega}$

$$U = \frac{N * 2\pi f * \Phi_{max}}{\sqrt{2}} = 4,44 * N * \Phi_{max} * f [Vs] \quad (26)$$

### 3.5. Opterećenja u krugu izmjenične struje

Otpor u krugu izmjenične struje daju elementi: otpornik (otpor R), zavojnica (induktivitet L) i kondenzator (kapacitet C). Kod radnog (djelatnog) otpora R električna energija se nepovratno pretvara u toplinsku energiju. Prolaskom električne energije kroz zavojnicu ili kondenzator električna energija se pretvara u magnetsku ili energiju električnog polja.[16]

Ukupni otpor realnih trošila izmjenične struje sastoji se od:

- djelatnog otpora R ( $\Omega$ )
- reaktivnog otpora (reaktancije) X ( $\Omega$ )
  - induktivni reaktivni otpor  $X_L$
  - kapacitivni reaktivni otpor  $X_C$

#### 3.5.1. Radni (djelatni) otpor u izmjeničnom strujnom krugu

U krugu izmjenične struje vrijednost napona i struje stalno se mijenja u pravilnim vremenskim razmacima. Ako se u strujnom krugu s čistim radnim otporom narine izmjenični napon  $u(t) = U_m \cdot \sin \omega t$ , uz pretpostavku  $L = 0$  i  $C = 0$  vrijedni Ohmov zakon.

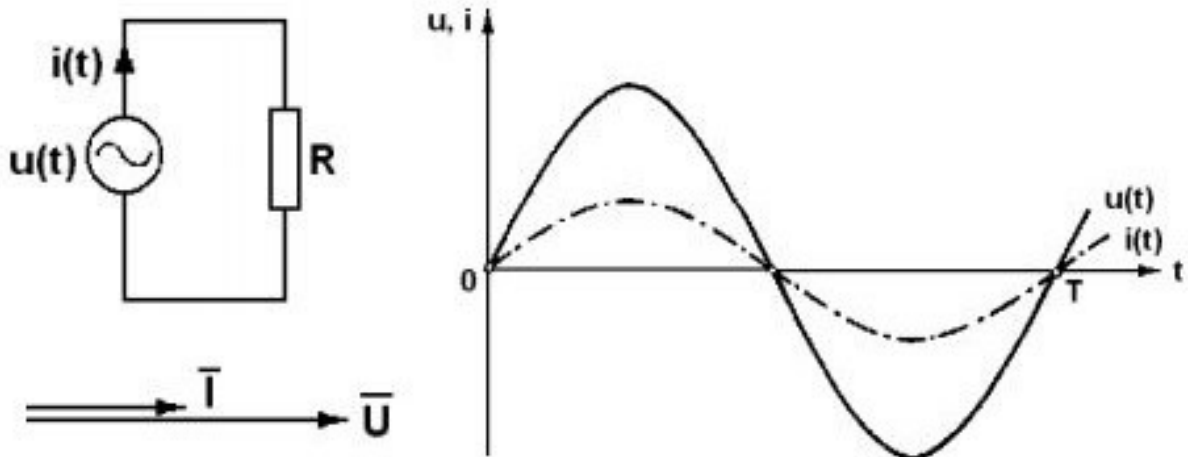
$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cdot \sin \omega t}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \cdot \sin \omega t \quad (27)$$

Efektivna vrijednost izmjenične struje jednaka je iznosu onoj stalnoj vrijednosti istosmjernje struje koja za isto vrijeme na istom otporniku razvija jednaku količinu topline.

$I_m = U_m/R$  je amplituda struje, te se efektivna vrijednost dobije dijeljenjem sa  $\sqrt{2}$ . Pa vrijedi

$$I = \frac{U}{R} \quad U = I \cdot R \quad (28)$$

Ako su jednadžbe kod izmjenične struje pisane kao efektivne vrijednosti tada je izraz isti kao i za istosmjernu struju. Kod idealnom radnog otpora R struja je u fazi s naponom ( $\varphi=0$ ), što je prikazano u vremenskom i vektorskom dijagramu (Slika 3.9)



Slika 3.9 Vremenski i vektorski dijagram kod idealnog radnog otpora

### 3.5.2. Induktivni otpor u izmjeničnom strujnom krugu

Ako se na izvor izmjeničnog napona  $u(t) = U_m \cdot \sin \omega t$  priključi idealna zavojnica induktivnosti  $L$ , uz pretpostavku da je radni otpor  $R$  zanemariv ( $R = 0$ ) i kapacitivnost  $C = 0$ , prema izrazu (13) izmjenična struja u zavojnici inducira napon samoindukcije  $\varepsilon_s = -L \frac{di}{dt}$ . Inducirani napon samoindukcije se prema Lenzovom pravilu suprotstavlja uzroku indukcije, a to je izmjenični napon izvora. Suprotstavljanje napona samoindukcije izmjeničnom naponu izvora naziva se induktivni otpor.[17]

Prema drugom Kirchhoffovom zakonu koji glas da suma napona u svakom zatvorenom strujnom krugu mora biti jednaka nuli slijedi:

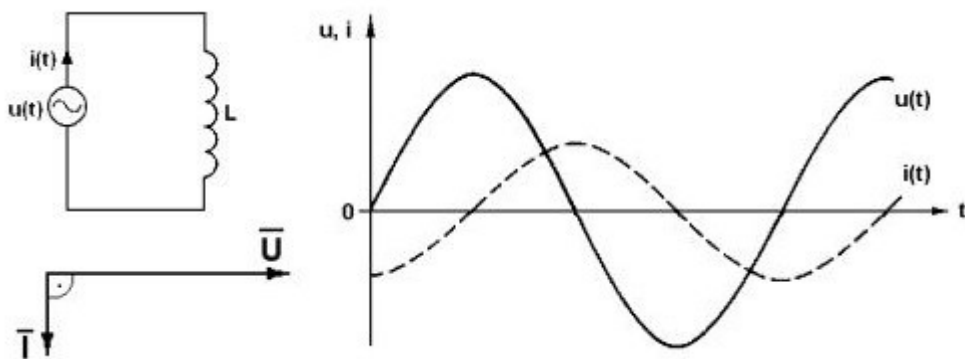
$$u + \varepsilon_s = 0$$

$$L \frac{di}{dt} = U_m \sin \omega t$$

$$i = \frac{U_m}{L} \int \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{\omega L} \cos \omega t$$

$$i = \frac{U_m}{\omega L} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (29)$$

Struja je sinusoidna, iste frekvencije kao i napon, ali vremenski fazno zaostaje za naponom. Struja za naponom zastoje za  $\pi/2$  odnosno fazni pomak je  $\varphi = -90^\circ$ .



Slika 3.10 Vremenski i vektorski dijagram kod idealnog induktivnog otpora  $X_L$

Zavojnica  $L$  se u istosmjernom strujnom krugu ponaša kao kratki spoj, a kod izmjeničnih strujnih krugova predstavlja induktivni otpor  $X_L$ .

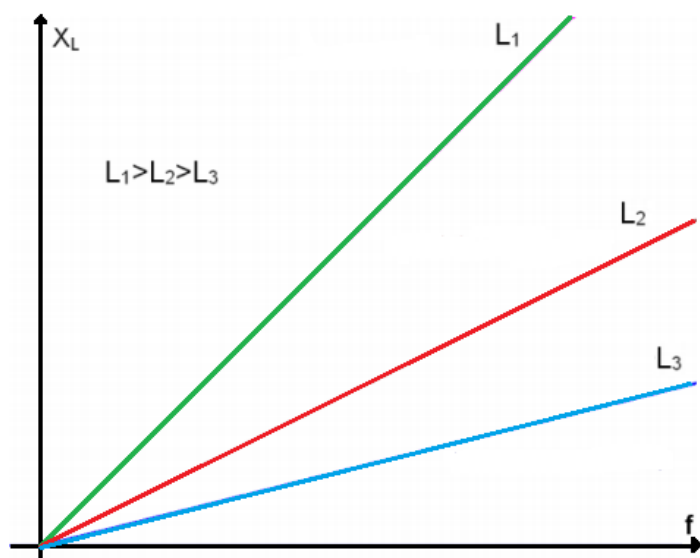
Induktivni otpor zavojnice iznosi:

$$X_L = \omega L = 2\pi f * L \quad (30)$$

Kompleksni oblik:

$$\vec{X}_L = j\omega L = j2\pi f * L \quad (31)$$

Induktivni otpor  $X_L$  ovisi o frekvenciji  $f$  i induktivnosti zavojnice  $L$ . Povećanjem je frekvencije ili induktivnosti povećava se induktivni otpor.



Slika 3.11 Ovisnost induktivnog otpora  $X_L$  o frekvenciji

Električna energija se kod induktivnog otpora  $X_L$  pretvara u magnetsku energiju magnetskog polja zavojnice.

### 3.5.3. Kapacitivni otpor u izmjeničnom strujnom krugu

Ako se na izvor izmjeničnog napona  $u(t) = U_m \cdot \sin \omega t$  spoji idealni kondenzator kapacitivnosti  $C$  uz pretpostavku da je radni otpor  $R = 0$  i induktivnost  $L = 0$ , u dielektriku kondenzatora pojaviti će se protok struje dielektričnog pomaka.

Odnos napona i struje kod kondenzatora izražava se jednačinom [17]

$$u = \frac{1}{C} \int i dt$$

Slijedi

$$\frac{i}{C} = \frac{d}{dt} (U_m \sin \omega t)$$

$$i = \frac{U_m}{1/\omega C} \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (32)$$

Pri tome je

$$I_m = \frac{U_m}{1/\omega C} = \frac{U_m}{X_C}$$

Kod efektivnih vrijednosti iznosi

$$I = \frac{U}{X_C}$$

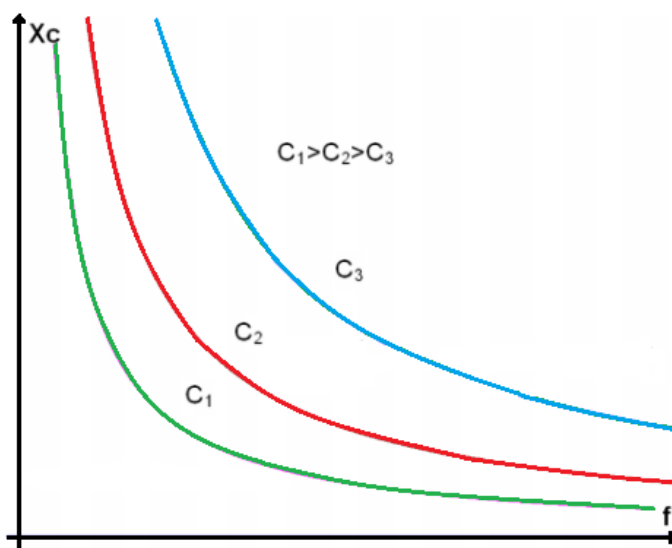
Gdje je  $X_C$  kapacitivni otpor kondenzatora C

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (33)$$

Kompleksni oblik:

$$\vec{X}_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (34)$$

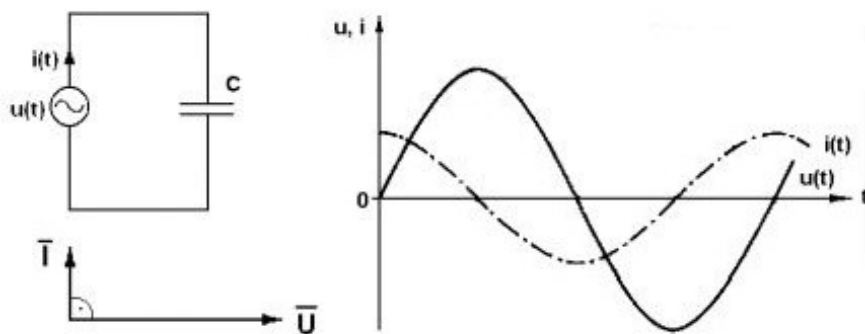
Povećanjem frekvencije ili kapaciteta kondenzatora C kapacitivni otpor  $X_C$  se smanjuje



Slika 3.12 Ovisnost kapacitivnog otpora  $X_C$  o frekvenciji

Kod kapacitivnog otpora  $X_C$  električna energija se pretvara u energiju električnog polja kondenzatora C.

Struja u kondenzatoru prethodi naponu za  $\pi/2$ , što odgovara faznom pomaku od  $\varphi = +90^\circ$



Slika 3.13 Vremenski i vektorski dijagram kod idealnog kapacitivnog otpora  $X$

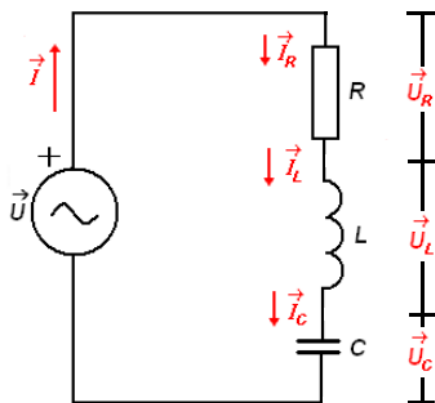
### 3.5.4. Rezonancija

Za bolju efikasnost prijenosa kod induktivnog bežičnog prijenosa energije koriste se rezonantni induktivni prijenos energije. Kod takvog prijenosa povećava se efikasnost, te je prijenos moguće ostvariti na veće udaljenosti. Ako se u strujni krug s zavojnicom doda kondenzator dobiva se rezonator. Kondenzator je potrebno dodati na strani predajnika i prijarnika. Kako bi primarni i sekundarni krug bili u rezonanciji potrebno ih je podesiti na rezonantnu frekvenciju. Kod rezonantne frekvencije energije se s predajnika na prijarnik prenosi tzv. tuneliranjem. Prilikom rezonancije povećava se učinkovitost naizmjenične pretvorbe jednog oblika energiju u drugi, kinetičke u potencijalnu ili energije električnog polja u energiju magnetskog polja.

Rezonanciju je moguće postići kod serijskog i paralelnog spajanja strujnih krugova. Kod serijskog spajanja otpornika otpora  $R$ , zavojnice induktivnog otpora  $X_L$  i kondenzatora kapacitivnog otpora  $X_C$  priključenog na izvor izmjeničnog napona  $u(t) = U_m \cdot \sin \omega t$  vrijede Kirchhoffovi zakoni u kompleksnom obliku:[18]

$$\vec{I} = \vec{I}_R = \vec{I}_L = \vec{I}_C$$

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$$



Slika 3.14 Serijski spoj RLC strujnog kruga

Uvjet za dobivanje rezonantne frekvencije je da su reaktancije, odnosno induktivni otpor  $X_L$  i kapacitivni otpor  $X_C$  jednaki ( $X_L = X_C$ )

Iz čega slijedi da je impedancija (ukupni otpor RLC strujnog kruga) jednaka otporu  $R$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R \quad (35)$$

Dok je fazni pomak impedancije:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R} \quad (36)$$

Ukupni napon jednak je:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad (37)$$

Struja iznosi:

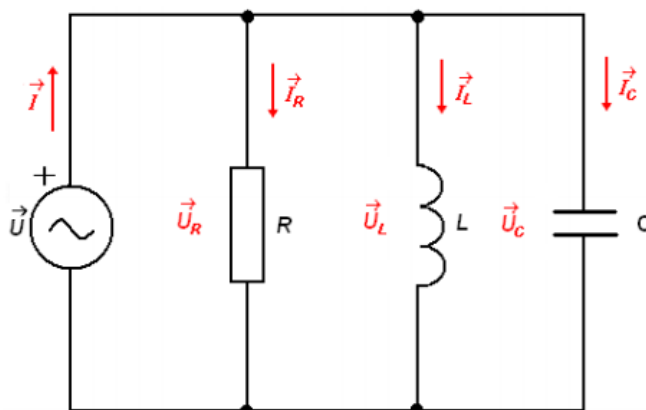
$$\vec{I} = \frac{\vec{U}}{\vec{Z}} = \frac{\vec{U}}{R + jX_L - jX_C} \quad (38)$$



Kod paralelnog spoja RLC strujnog kruga vrijede Kirchhoffovi zakoni u kompleksnom obliku [19]

$$\vec{I} = \vec{I}_R + \vec{I}_L + \vec{I}_C$$

$$\vec{U} = \vec{U}_R = \vec{U}_L = \vec{U}_C$$



Slika 3.15 Paralelni spoj RLC strujnog kruga

Kod paralelnog spoja u proračunu se umjesto otpora uzima recipročna vrijednost, vodljivost. Mjerna jedinica za vodljivost je Siemens [S]

$$G = \frac{1}{R}; \quad B_L = \frac{1}{X_L}; \quad B_C = \frac{1}{X_C} \quad (39)$$

Gdje je: G – omska vodljivost [S]

$B_L$  – induktivna vodljivost [S]

$B_C$  – kapacitivna vodljivost [S]

U paralelnom spoju rezonancija nastaje kada su induktivna vodljivost i kapacitivna vodljivost jednake ( $B_L = B_C$ ). Admitancija takvog strujnog kruga jednaka je omskoj vodljivosti.

Iznos admitancije jednak je:

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2} = G \quad (40)$$

Fazni pomak admitancije jednak je:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{B_C - B_L}{G} \quad (41)$$

Ukupna struja jednaka je:

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} \quad (42)$$

Ukupni napon jednak je:

$$\vec{U} = \frac{\vec{I}}{\vec{Y}} = \frac{\vec{I}}{G + jB_C - jB_L} \quad (43)$$

Za dobivanje rezonantne frekvencije potrebno je znati vrijednost induktiviteta zavojnice i kapacitete kondenzatora. Uvjet rezonantne frekvencije je da su induktivni otpor i kapacitivni otpor jednaki, odnosno  $X_L = X_C$

Iz čega slijedi:

$$X_L = X_C$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$f^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}$$

Rezonantna frekvencija računa se po formuli:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (44)$$

Iz formule se zaključuje da se rezonancija može postići i mijenjati na dva načina:

- zadana frekvencija ostaje ista a mijenja se vrijednosti induktivnosti L i kapacitivnosti C
- vrijednosti L i C ostaju isti a frekvencija f se podešava na vrijednost rezonantne frekvencije  $f_r$

Efikasnost prijenosa računa se po formuli:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100 \quad (45)$$

Gdje je :  $P_{out}$  – izlazna snaga

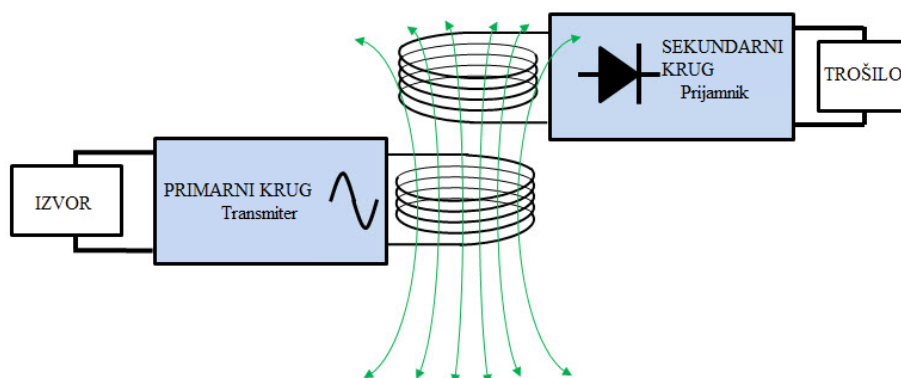
$P_{in}$  – ulazna snaga

Kod rezonantnog sustava induktivni otpor i kapacitivni otpor su jednaki te se oni poništavaju ( $X_L=X_C$ ). Ostaje samo radni omski otpor R kod kojeg su struja i napon u fazi ( $\varphi=0$ ). Te se snaga za izmjeničnu struju i napon računa isto kao i za istosmjerni napon i struju

$$P = U * I \quad (46)$$

## 4. Princip rada induktivnog bežičnog prijenosa energije

Induktivni bežični prijenos energije dijeli se na dva zrakom odvojena strujna kruga. Primarni krug kod kojeg se električna energija pretvara u promjenljivo magnetsko polje i sekundarni krug ukoliko se nalazi unutar promjenjivog magnetskog polja primarnog kruga pretvara magnetsku energiju nazad u električnu energiju.



Slika 4.1 Blok dijagram induktivnog bežičnog prijenosa energije

### 4.1. Primarni krug induktivnog bežičnog prijenosa energije (transmitter)

Primarni krug induktivnog bežičnog prijenosa energije može se podijeliti na 3 dijela. Transformator kojim se smanjuje napon na željeni iznos, ispravljač za promjenu izmjeničnog AC napona u direktni DC napon te izmjenjivač za promjenu istosmjernog DC napona u visoko frekventni AC napon koji se šalje na primarnu zavojnicu.

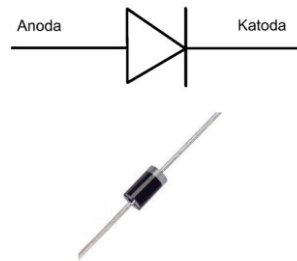


Slika 4.2 Blok dijagram primarnog kruga induktivnog bežičnog prijenosa energije

Princip i rad transformatora opisan je u poglavlju 3.3. Kod induktivnog bežičnog prijenosa energije malih snaga koristi se za snižavanje napona izvora (utičnice) od 220 V na nivo potreban za rad određenog strujnog kruga.

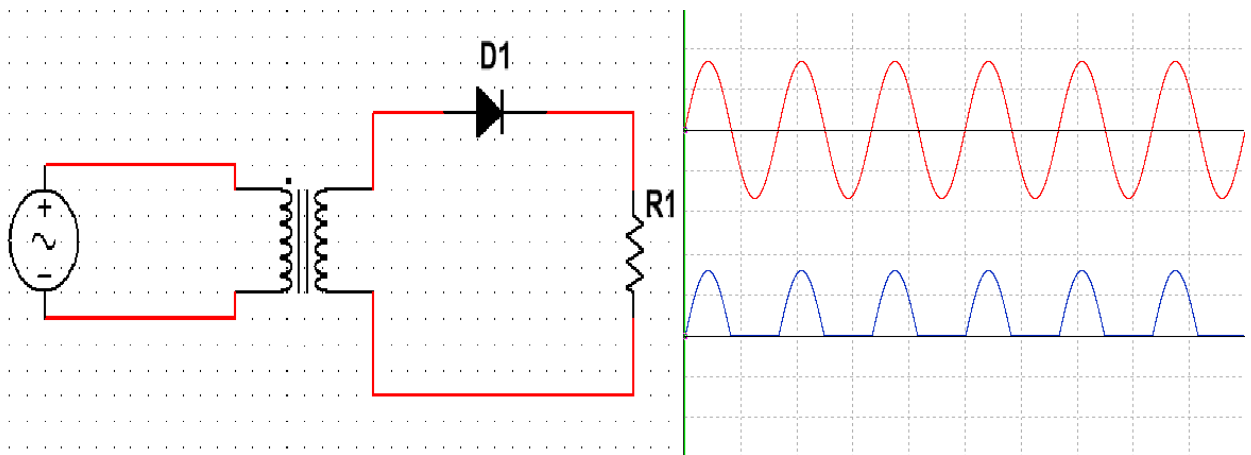
### 4.1.1. Ispravljač

Ispravljač služi za ispravljanje izmjeničnog napona dobivenog od transformatora u istosmjerni napon. Postoje poluvalni i punovalni ispravljači. Za ispravljanje napona najčešće se koriste diode. Dioda je elektronički element koji se sastoji od dviju elektroda. Kod dioda električna struja se propušta u samo jednom smjeru, od anode prema katodi ne i obrnuto.



Slika 4.3 Simbol i izgled diode

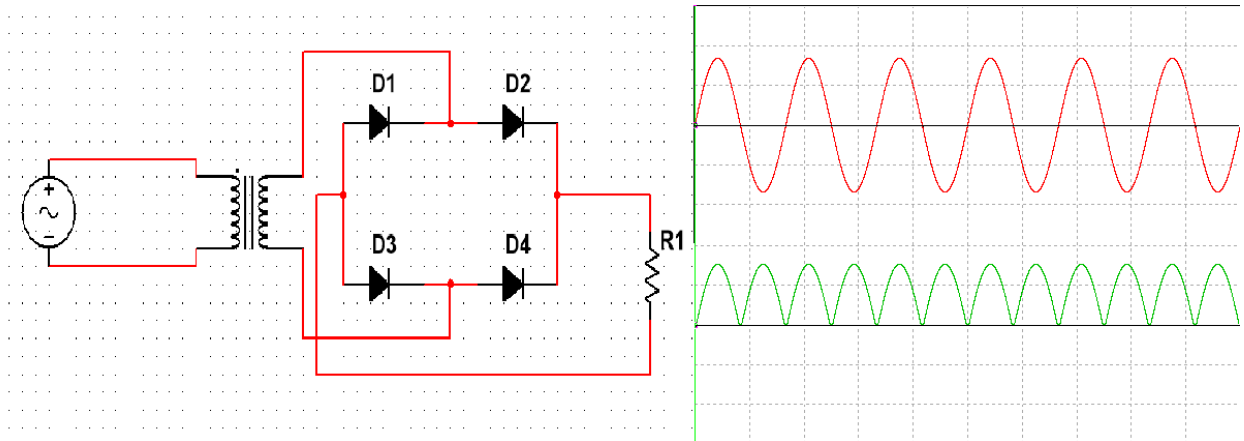
Poluvalni ispravljač je najjednostavniji oblik ispravljača. Potrebna je samo jedna dioda za izgradnju poluvalnog ispravljača. Takav ispravljač propušta samo jedan polu ciklus (pozitivan ili negativan) sinusnog izmjeničnog napona. Zbog takvog načina ispravljeni napon ima veliku valovitost i malu vrijednost istosmjerne komponente te se poluvalni ispravljač slabo koristi.[20]



Slika 4.4 Shema spoja poluvalnog ispravljača i izgled poluvalnog ispravljenog napona

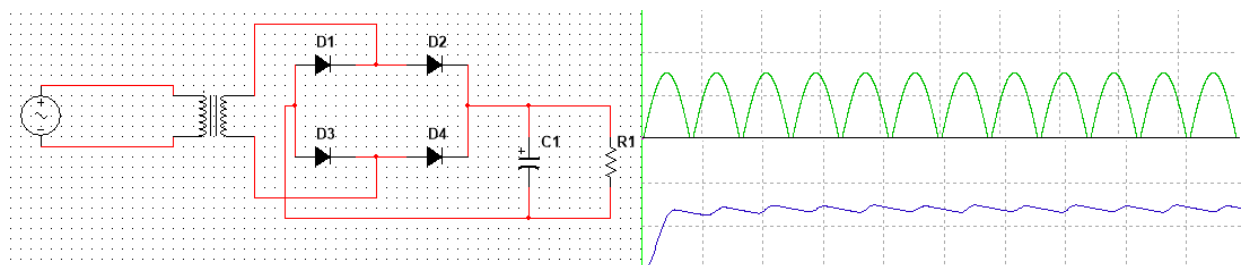
Punovalni ispravljači ispravlja cijelu periodu sinusnog izmjeničnog napona. Punovalni ispravljač dobiva se s dvije diode i transformatorom s dva sekundarna namotaja. Prilikom pozitivne poluperiode vodi dioda D1, a kod negativne poluperiode vodi dioda D2.

Drugi način je pomoću četiri diode u tzv. Grectzovom spoju. Kod Grectzovog spoja uvijek vode dvije diode.[21]



*Slika 4.5 Shema spoja punovalnog ispravljača pomoću Grectzovog spoja i izgled ispravljenog napona*

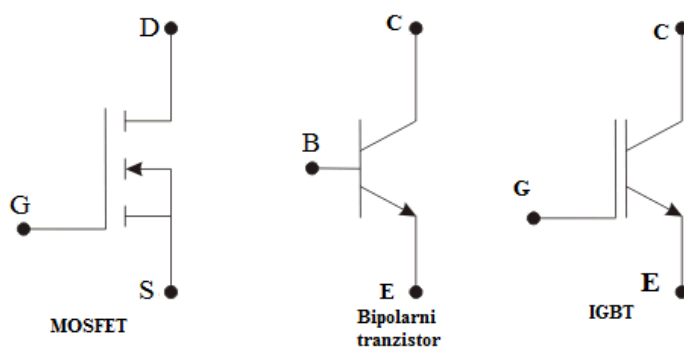
U jednoj poluperiodi vode D2 i D3 a u drugoj D1 i D4. Iz slike 4.4 vidi se da je sinusni oblik izmjeničnog napona u potpunosti ispravljen i da je svaka poluperioda pozitivna. Međutim napon je i dalje jako valovit. Kako bi se dobio što bolji istosmjerni napon koriste se glađenje ili filtriranje napona. Najjednostavnije peglanje napona postiže se paralelnim spajanjem kondenzatora na izlazu Grectzovog spoja. Izgled spoja i ispeglanog napona prikazan je na slici 4.5. Kondenzator se odupire brzim promjenama napona i služi kao spremnik električne energije. Za vrijeme jedne poluperiode se puni, napunjen drži napon na visokom nivou te se u ovisnosti o njegovom kapacitetu prazni do druge poluperiode kada se opet puni.



*Slika 4.6 Shema spoja Grectzovog spoja s kondenzatorom za filtriranje napona i izgled filtriranog napona*

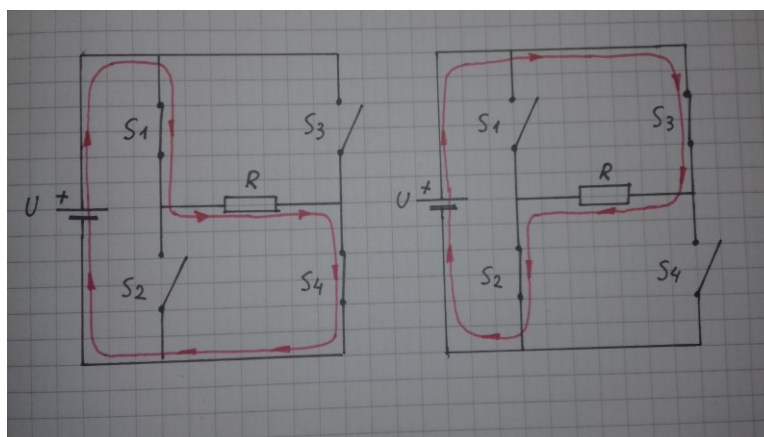
## 4.1.2. Izmjenjivač

Nakon AC-DC pretvorbe, istosmjerni DC napon se pretvara u izmjenični AC napon visoke frekvencije. Kako bi primarna zavojnica mogla proizvesti promjenljivo magnetsko polje (što je uvjet induktivnog povezivanja dviju zavojnica) potrebno je dobiti istosmjerni DC napon ponovo izmijeniti u izmjenični AC napon. Izmjenjivači se mogu podijeliti u mrežne ili mrežom vođene izmjenjivače, te autonomne izmjenjivače. Kod mrežom vođenih izmjenjivača, izmjenjivač je spojen s mrežom te mora imati sklopove za sinkronizaciju s mrežom i sklopove za automatsko odvajanje od mreže, uslijed ispada mreže van sustava. Za induktivni bežični prijenos energije potrebni su nam autonomni izmjenjivači koji stvaraju vlastitu izmjeničnu mrežu unutar strujnog kruga. Takvi izmjenjivači za izmjenu DC napona u AC napon koriste poluvodičke sklopke kao što su bipolarni tranzistori, MOSFET i IGBT. [22]



Slika 4.7 Simboli elemenata: MOSFET, bipolarni tranzistor, IGBT

Frekvencija dobivenog izmjeničnog napona ovisi o brzini sklapanja elementa koji se koristi. Princip rada izmjenjivača prikazan je jednofaznim izmjenjivačem u mosnom spoju (Slika 4.7).



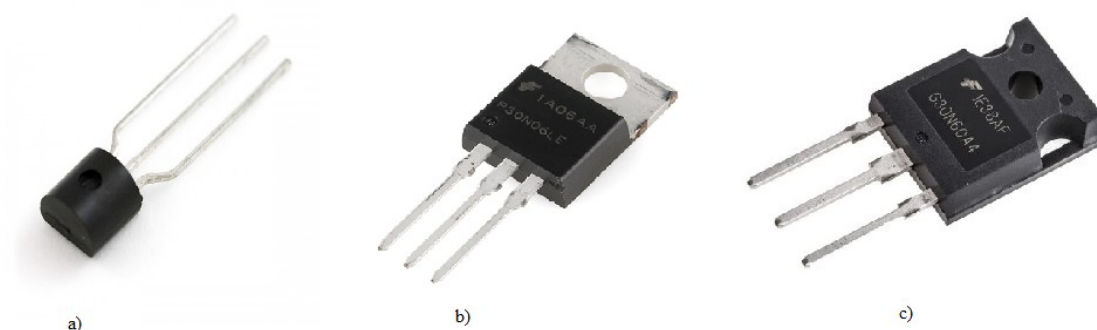
Slika 4.8 Mosni sklop četiri sklopke ili H-most

Mosni sklop s četiri sklopke ili H-most je sklop koji kontrolira smjer struje kroz trošilo. Iz slike 4.7 se vidi dok su uključene sklopke S1 i S4 a sklopke S2 i S3 isključene struja kroz vodič teče u jednom smjeru. Ako su uključene sklopke S2 i S3 a sklopke S1 i S4 isključene struja kroz vodič teče u drugom smjernu. Sve sklopke ili sklopke na istim stranama strujnog kruga S1, S2 i S3, S4 ne smiju biti uključene u isto vrijeme jer bi došlo do kratkog spoja u krugu. Naizmjeničnim ukapčanjem i iskapčanjem sklopki na način objašnjen prije struja teče u dva smjera te se istosmjerna veličina struje pretvara u izmjeničnu. Sklopke se zamjenjuju poluvodičkim elementima (bipolarni tranzistor, MOSFET, IGBT) koji se mogu jako brzo uključivati i isključivati.

Bipolarni tranzistor je aktivni poluvodički element. Sastoji se od tri elektrode. Emiter koji je nositelj naboja, baza upravlja tokom naboja i kolektor sakuplja nositelje naboja. Postoje dva tipa tranzistora PNP i NPN. Bipolarni tranzistor ima iznimno mali pad napona na sebi u stanju vođenja struje, što znači da ima malu vlastitu potrošnju. Strujno je upravljani i radi toga dosta spor.

Poluvodička sklopka MOSFET naponski je upravljana te može raditi uklope i isklope na frekvencijama do 20kHz. Zbog brže promjene uklapanja i isklapanja razvijaju manje topline nego bipolarni tranzistori. Međutim kod MOSFET-a prilikom vođenja struje, napon je nešto viši te pri većim strujama nije prikladan za uporabu u izmjenjivačima.

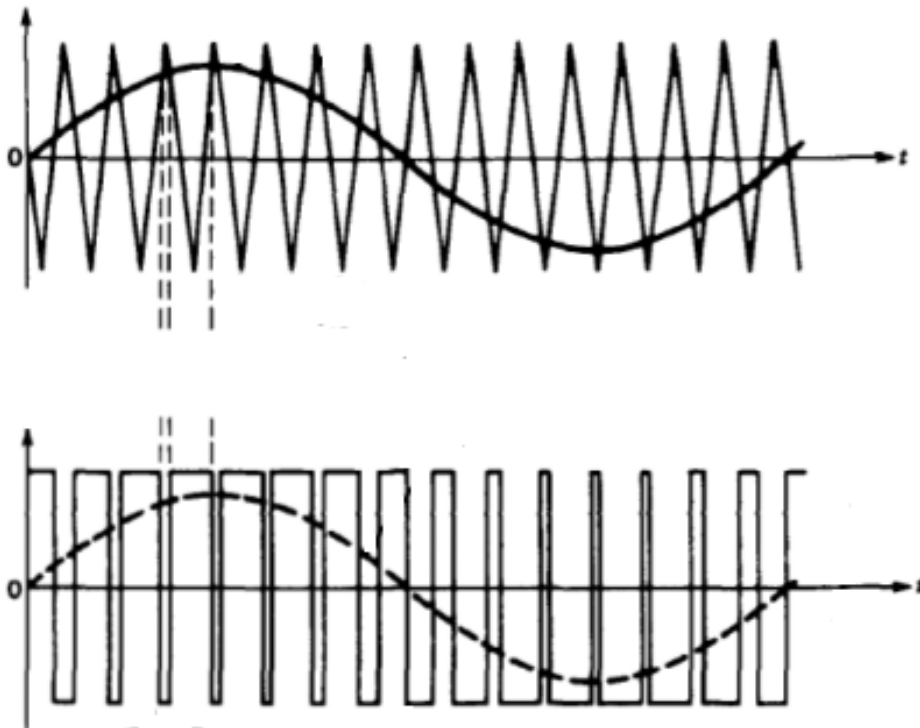
IGBT poluvodička sklopka spoj je dobrih osobina bipolarnog tranzistora i MOSFET-a. Prilikom vođenja struje ima mali napon kao bipolarni tranzistor, te je IGBT sklopkom upravljanje naponsko kao kod MOSFET-a. Može vrlo brzo uklopiti i isklopiti sklopku preko upravljačkog ulaza. Kod IGBT poluvodičke sklopke vrijeme uklapanja i isklapanja iznosi svega 20 do 30 ns. Navedene osobine ovu poluvodičku sklopku čine idealnom za uporabu u izmjenjivaču. [23]



Slika 4.9 Izgled poluvodičkih sklopki: a) bipolarni tranzistor, b) MOSFET, c) IGBT



Naizmjeničnim uklapanjem i isklapanjem na prethodno objašnjen način dobije se pravokutni oblik signala. Kako bi se pravokutni signal promijenio u sinusni koristi se tehnika pulsno širinske modulacije PWM. Ideja je da se širina, tj. vrijeme u kojem je poluvodička sklopka uključena mijenja u ovisnosti o amplitudi sinusnog signala. Za određivanje vremena uključenosti poluvodičkih sklopki koristi se trokutasti signal visoke frekvencije, frekvencije veće od sinusnog signala koji se uspoređuje sa sinusnim naponom željene frekvencije. Slika 4.9 prikazuje princip PWM.



*Slika 4.10 Princip rada PWM*

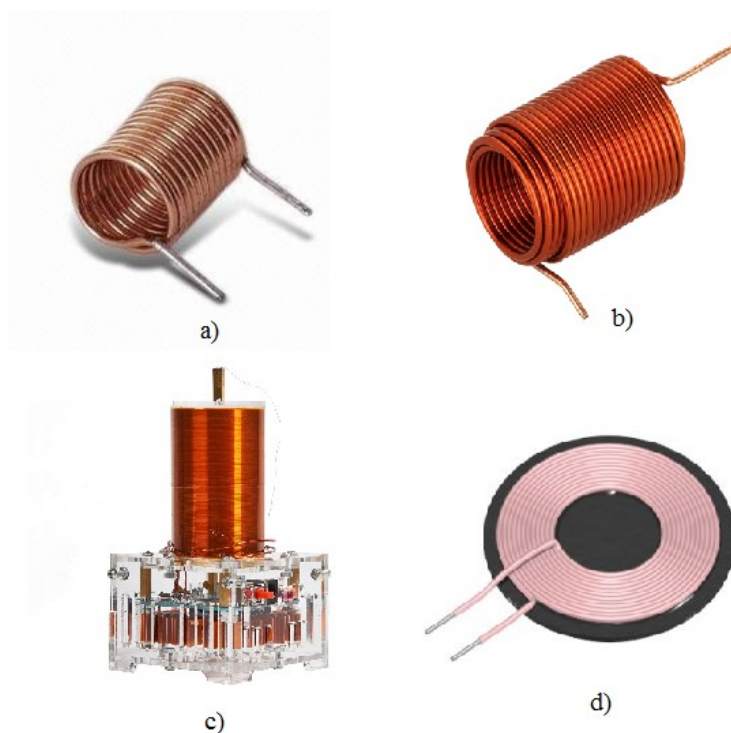
U pozitivnoj poluperiodi sinusnog signala duže vrijeme uključenosti imaju sklopke S1 i S4, dok su sklopke S2 i S3 kratko uključene. Iz slike 4.9 se vidi da kada sinusni signal ide prema najvećoj amplitudi, širina pravokutnog signala je najveća, odnosno vrijeme uključenosti sklopki je najduže. Kod negativne poluperiode duže vrijeme uključenosti imaju sklopke S2 i S3, a kraće S1 i S4. Za kontroliranje uključivanje i isključivanje te vrijeme uključenosti koriste se razni brojači, kao što su 555 brojač (555 timer).[23]

### 4.1.3. Zavojnica

Visoko frekventni signal AC napona dobiven na izmjenjivaču šalje se u induktivnu zavojnicu. Prolaskom izmjenične AC struje kroz zavojnicu, oko zavojnice stvara se promjenljivo magnetsko polje. Ako se sekundarna zavojnica nalazi unutra promjenljivog magnetskog polja primarne zavojnice u njoj se inducira napon, te se ostvaruje prijenos energije. Količina prenesene energije najviše ovisi o međuindukciji i faktoru magnetske povezanosti induktivnih zavojnica (izraz 20, 21). Što su međuindukcija i faktor magnetske povezanosti veći biti će efikasniji bežični prijenos energije.

Postoji više vrsta i načina namotavanja induktivnih zavojnica. U usporedbi s zavojnicama na transformatoru, glavna razlika je što nisu povezane s željeznom jezgrom. Neke od zavojnica koje se koriste za bežični prijenos energije su:

- a) Jednoslojna zavojnica
- b) Višeslojna zavojnica
- c) Teslina zavojnica
- d) Ravna spiralna zavojnica

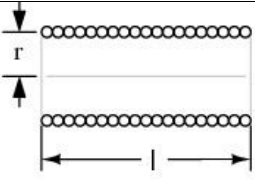
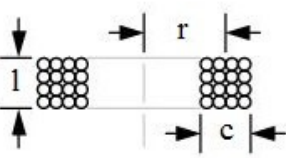
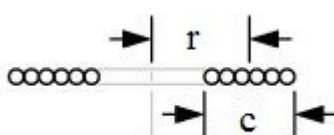


*Slika 4.11 Tipovi zavojnica za induktivni bežični prijenos energije*

Također zavojnice se mogu namotavati u kružnom ili pravokutnom obliku. Najčešće danas korišteni dizajn zavojnice je ravna spiralna zavojnica koja se koristi kod većine bežičnih punjača za mobitele i uređaje male snage.

Unutar zavojnice javlja se induktivni otpor  $X_L$  prema izrazu (30) ovisi o frekvenciji i induktivitetu zavojnice. Induktivitet ravnog vodiča izračunava se prema izrazu (17). Za proračun induktiviteta zavojnica određenog oblika koriste se Wheelerove formule.

Tablica 5. Wheelerove formule za proračun induktiviteta zavojnica

Proračun induktiviteta zavojnica		
Jednoslojna zavojnica		$L = \frac{N^2 r^2}{9r + 10l}$
Višeslojna zavojnica		$L = \frac{0.8N^2 r^2}{6r + 9l + 10c}$
Spiralna ravna zavojnica		$L = \frac{N^2 r^2}{8r + 11c}$

Gdje je: N – broj zavoja

r – radijus zavojnice [inches]

l – dužina zavojnice [inches]

c – debljina zavojnice [inches]

1 inches = 0.3937 cm

Iz formula je vidljivo da dizajn zavojnica ovisi o metodi namatanja zavojnice, broju zavoja, dužini zavojnice, debljini zavojnice i promjeru zavojnice. Ako su zavojnice u rezonanciji tada se induktivni otpor  $X_L$  i kapacitivni otpor  $X_C$  poništavaju te nam ostaje otpor vodiča od kojeg je namotana zavojnice.

Otpor vodiča računa se po formuli:

$$R = \rho * \frac{l}{s} \quad (47)$$

Gdje je:  $\rho$  – električna otpornost [ $\Omega\text{m}$ ]

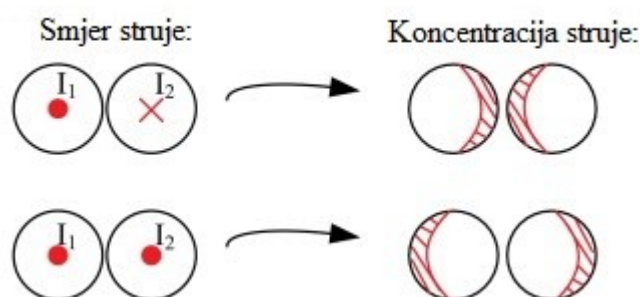
$l$  – duljina vodiča [m]

$s$  – poprečni presjek vodiča [ $\text{m}^2$ ]

Električna otpornost za bakar iznosi  $\rho = 1.7 * 10^{-8} \Omega\text{m}$ .

Kod izmjenične struje pri visokim frekvencijama javlja se skin efekt što povećava otpornost vodiča. Kod skin efekta struja teče uz rub vodiča. Zbog toga se otpor vodiča povećava, jer se efektivna površina kojom teče struja smanjuje. Iz formule za otpor vodiča vidljivo je da manja površina odnosno poprečni presjek vodiča izaziva veću otpornost. Kod skin efekta gustoća struje je najmanja u sredini vodiča a najgušća na njegovim rubovima.

Kod visokih frekvencija izmjenične struje javlja se i proximity efekt ili učinak blizine. Kada se dva ili više vodiča kojima teče visoko frekventan izmjenična struja nađu jedna blizu drugog, u vodičima se stvaraju vrtložne struje zbog utjecaja promjenljivog magnetskog polja jednog vodiča na drugi. Kada struja u vodičima teče u istom smjeru struja se koncentrira na najudaljenijoj strani vodiča, dok se kod vodiča u kojima struje teče u suprotnim smjerovima struja koncentrira na najbližoj strani vodiča (Slika 4.11) [24]



Slika 4.12 Prikaz učinka blizine u ovisnosti o smjeru struje

Kako bi se smanjili gubici kod induktivnog bežičnog prijenosa energije, kod dizajniranja zavojnica koriste se posebni tipovi žica, kao što su magnetna žica i litz žica.

Litz žica sastoji se od više žica malog presjeka koje su međusobno izolirane jedan od druge tankim slojem laka te međusobno upletene u jednu žicu.

## 4.2. Sekundarni krug induktivnog bežičnog prijenosa energije (prijamnik)

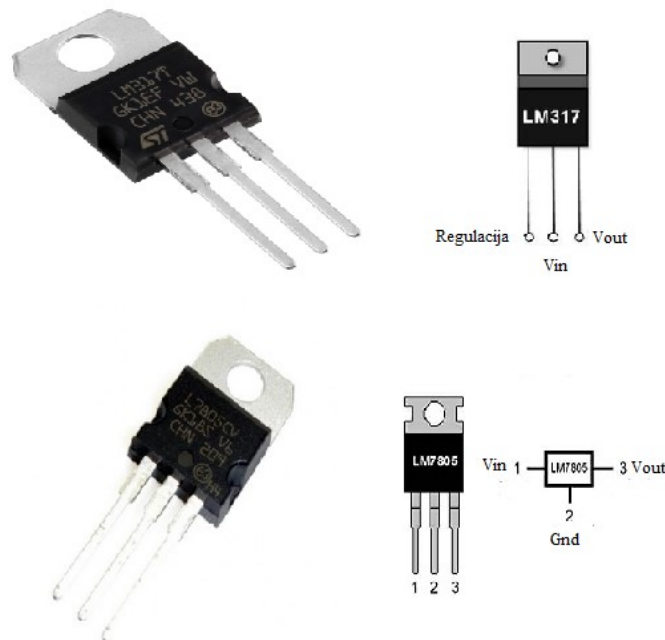
Sekundarni krug induktivnog bežičnog prijenosa energije služi za napajanje ili punjenje nekog uređaja. Sastoji se od zavojnice, ispravljača, filtera za filtriranje napona, regulatora napona i izlaza



Slika 4.13 Blok dijagram sekundarnog kruga induktivnog bežičnog prijenosa energije

Zavojnica, ispravljač i filtriranje napona objašnjeni su u poglavlju 4.1

Regulator napona koristi se kako bi na izlazu imali čisti DC napon određene voltaže potrebne za napajanje nekog uređaja. Mogu se koristiti promjenljivi regulatori napona kao lm317 ili konstantni regulatori napona kao lm7805.



Slika 4.14 Izgled i raspored pinova kod regulatora napona lm317 i lm7805

## 5. Izrada modula za induktivni bežični prijenos energije

Za demonstraciju induktivnog bežičnog prijenosa energije na sekundarnoj strani kao izvor izmjeničnog sinusnog signala koristio se funkcijski generator SIGLENT SDG 125 (Slika 5.1), za prikaz i mjerenje koristio se osciloskop Tektronix TDS 2104B (Slika 5.2).



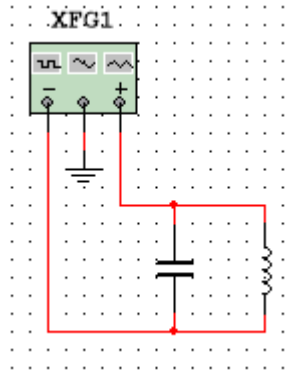
*Slika 5.1 Funkcijski generator SIGLENT SDG 125*



*Slika 5.2 Osciloskop Tektronix TDS 2014*

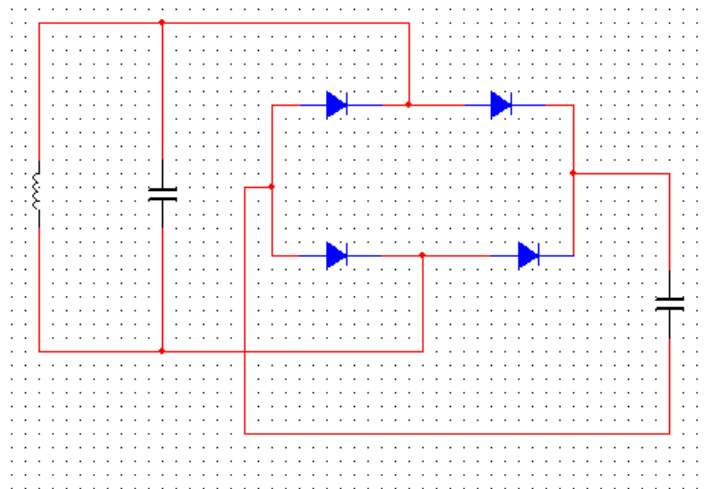
## 5.1. Shema spoja

U primarnom krugu kao izvor napajanja koristio se funkcijski generator SIGLENT SDG 125 te sa primarnom zavojnicom u paralelu spojeni kondenzator (Slika 5.3)



Slika 5.3 Shema spoja primarnog kruga

U sekundarnom krugu paralelno s sekundarnom zavojnicom spojeni je kondenzator. Četiri diode spojene u Greatzov spoj za ispravljanje izmjeničnog napona te kondenzator za peglanje napona (Slika 5.4)



Slika 5.4 Shema spoja sekundarnog kruga

Tablica 6. Korišteni elementi

Korišteni elementi	
Kondenzator	2 X 100nF
Kondenzator	1 X 0.47 $\mu$ F
Diode	4 X 1N4007
Zavojnice	2 X 5.58 $\mu$ H

## 5.2. Zavojnice

Primarna i sekundarna zavojnica namotane su od jednog vodiča instalacijskog kabla H05VV-F 3G 1.5 mm<sup>2</sup>.



Slika 5.5 Primarna i sekundarna zavojnice

Tablica 7. Specifikacija zavojnica

Broj zavoja N	Promjer D (mm)	Dužina l (mm)	Induktivitet L (μH)
7	90	20	5.58

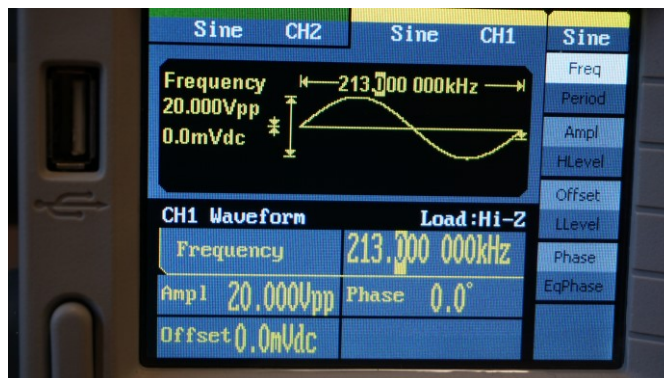
## 5.3. Rezultati mjerenje

Na funkcijskom generatoru podesile su se vrijednosti:

sinusni izlazni signal

rezonantne frekvencije  $f_r = 213\text{kHz}$

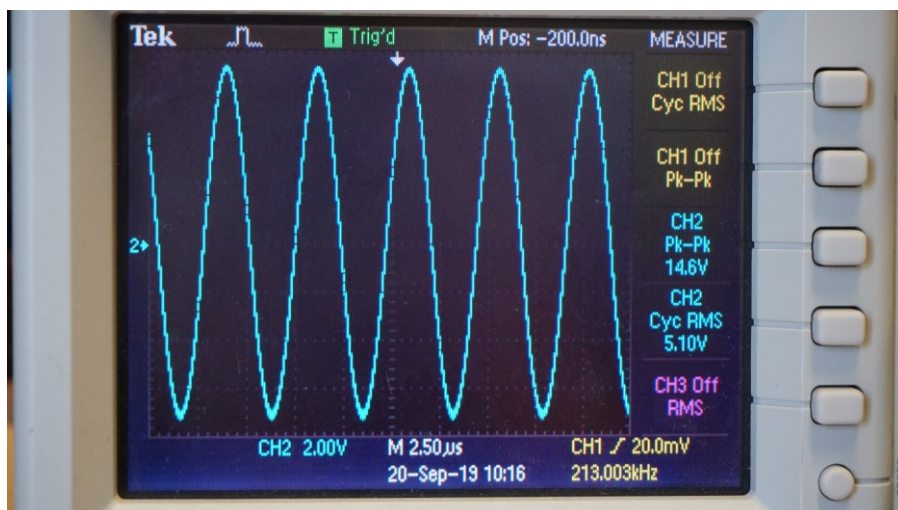
amplitude signala = 20 V<sub>pp</sub>



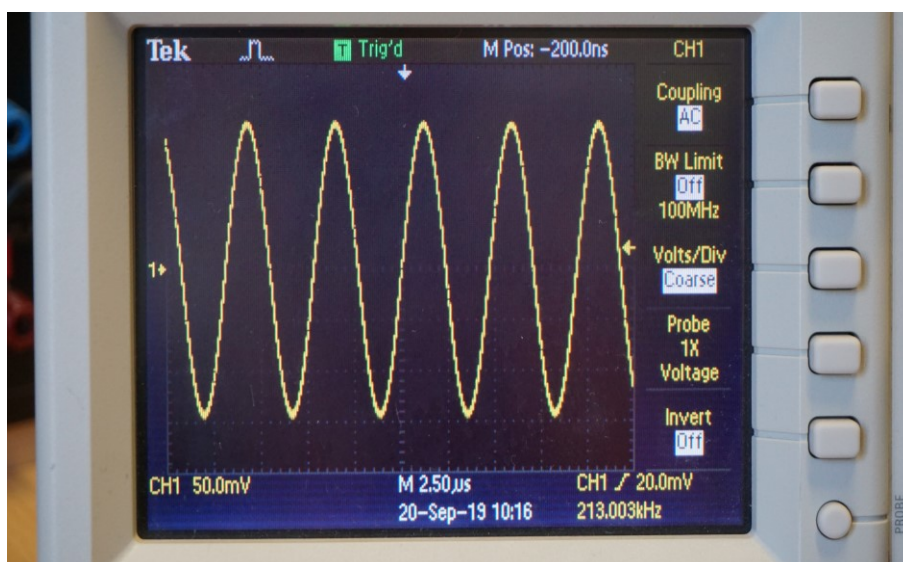
Slika 5.6 Podešene vrijednosti funkcijskog generatora



Pomoću osciloskopa mjerio se napon na primarnoj i sekundarnoj strani.



*Slika 5.7 Sinusni signal na primarnoj strani*



*Slika 5.8 Sinusni signal na sekundarnoj strani*

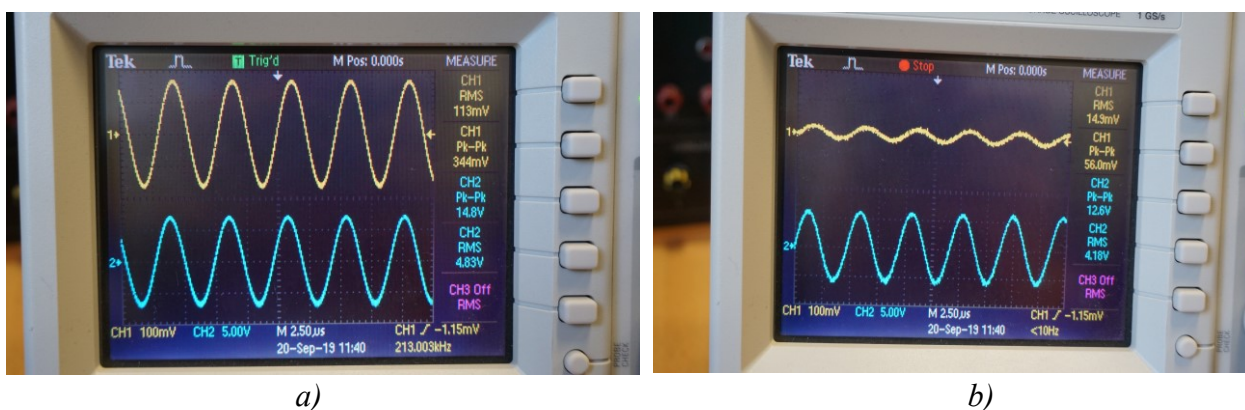
Iz slika 5.7 i 5.8 vidi se da je iznos napona na primarnoj strani u voltima dok je na sekundarnoj strani u milivoltima što znači da je efikasnost prijenosa mala ali dovoljna za demonstraciju induktivnog bežičnog prijenosa energije. Efikasnost sustava bila bi veća korištenjem posebnih žica kao što su magnetna žica ili litz žica kojim bi se omogućilo namatanje većeg broja namota bez mijenjanja samih dimenzija zavojnice čime bi se povećao induktivitet zavojnice i magnetsko polje oko zavojnice.

Mjerenjem su dobiveni sljedeći rezultati prikazani u Tablici 8. Mjerio se napon  $V_{pp}$  i napon RMSa u ovisnosti o udaljenosti na primarnoj i sekundarnoj zavojnici. Udaljenost se svakim mjerenjem povećavala za 5mm te se mjerilo od 0mm do 50mm.

Tablica 8. Rezultati mjerenja

Udaljenost zavojnica mm	Primarna zavojnica		Sekundarna zavojnica		Efikasnost %
	$V_{pp}$ (V)	RMS (V)	$V_{pp}$ (mV)	RMS (mV)	
0	14.8	4.87	344	113	2.32
5	15	4.97	268	88.9	1.79
10	14	4.68	188	60.3	1.29
15	13.8	4.56	156	49.7	1.09
20	13.4	4.43	124	38.3	0.86
25	13.2	4.38	112	33	0.75
30	13	4.33	92	27.2	0.63
35	12.8	4.29	80	22.5	0.52
40	12.8	4.27	72	19.2	0.44
45	12.6	4.21	60	16.8	0.4
50	12.4	4.1	56	14.3	0.35

Izgled signala na primarnoj i sekundarnoj zavojnici vidljiv je na Slici 5.9, gdje je pod a) prikazan izgled signala na udaljenosti od 0mm a pod b) izgled signala na udaljenosti od 50 mm. Kanal 1 (žuti signal) predstavlja izgled signala na sekundarnoj zavojnici dok kanal 2 (plavi signal) predstavlja izgled signala na primarnoj zavojnici.

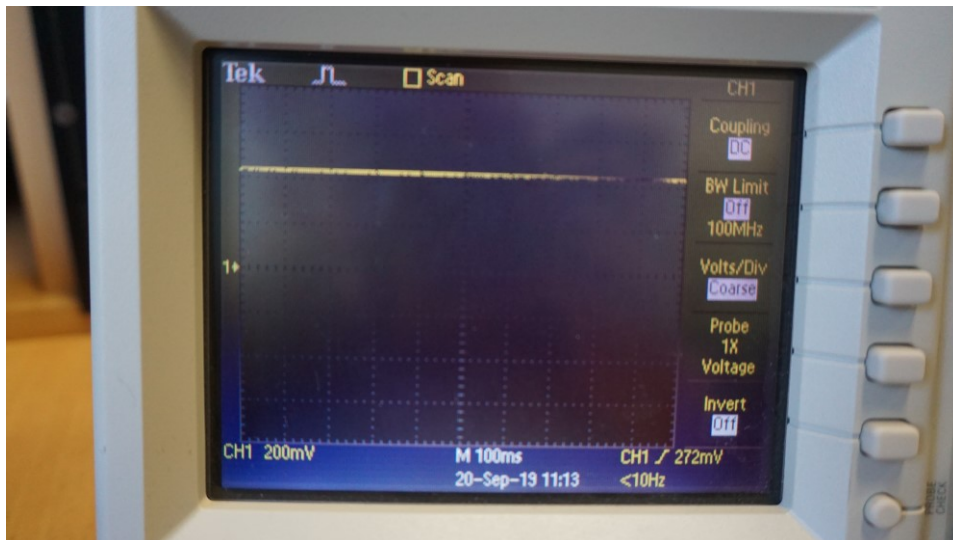


Slika 5.9 Izgled izlaznog signala

a) na udaljenosti 0mm

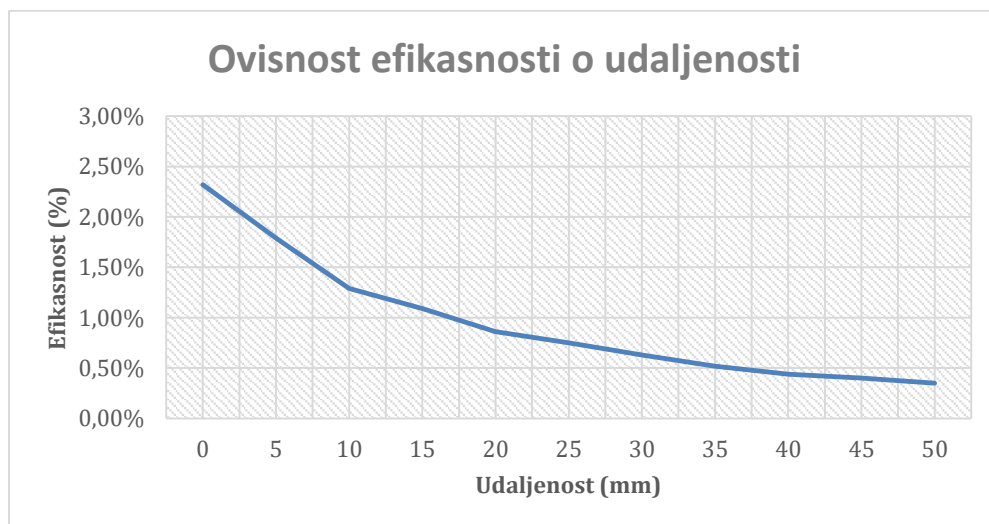
b) na udaljenosti 50m

Na slici 5.10 prikaz je istosmjerni DC signal na sekundarnoj strani spoja. Istosmjerni DC signal dobo se prolaskom izmjeničnog AC signala kroz 4 diode spojene u Greatzov spoj, te ispeglan pomoću kondenzatora za filtriranje.



Slika 5.10 Ispeglani istosmjerni napon na sekundarnoj strani

Grafom na slici 5.11 vidi se pad efikasnosti s porastom udaljenosti između dvije zavojnice.



Slika 5.11 Ovisnost efikasnosti o udaljenosti

## 6. Zaključak

Iako tehnologija bežičnog prijenosa energije nije nova ideja, tek se u današnje vrijeme počela intenzivnije razvijati. Korištenjem sve više električnih uređaja u kućanstvu, kao što su mobiteli, prijenosa računala, tableti i sl. zahtjeva više kablova za njihovo napajanje i punjenje što stvara nepotreban nered. Tehnologija bežičnog prijenosa energije rješava taj problem. Induktivno bežično punjenje pokazalo se kao najbolje rješenje za napajanje i punjenje električnih uređaj malih snaga na malim udaljenostima kada se govori o bežičnom prijenosu energije.

Rezonantni induktivni bežični prijenos energije povećava efikasnost i udaljenost samog prijenosa energije. Korištenjem posebnih žica kao što su magnetska žica i litz žica kod dizajniranja induktivnih zavojnica, smanjuju se gubici i otpor a povećava se induktivitet i magnetsko polje samih zavojnica što direktno utječe na bežični prijenos energije između zavojnica.

U Varaždinu

---

Datum

---

Potpis

## 7. Literatura

[1] Jamie MacFarlane: Wireless Power Transfer, Decembar 11.2018

[2] <https://www.youtube.com/watch?v=q0i67E48OV0>

[3] Willism C. Brown: The History of Power Transmission by Radio Waves, 9 septembar 1984

[4] Xiao Lu, Ping Wang, Dusit Niyato, Dong In Kim, and Zhu Han: Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications, 2015

[5] A. Mahmood, A. Ismail, Z. Zaman, H. Fakhar, Z. Najam, M. S. Hasan, S.H. Ahmed: A Comparativ Study of Wireless Power Transmission Techniques, 2013

[6] <https://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/wireless-power3.htm>

[7] <https://www.vidi.hr/Sci-Tech/Znanost/Ostvaren-bezicni-prijenos-10-kilovata-struje-na-500-metara>

[8] Stephanie Shreck, Shahram Latifi University of Nevada, Las Vegas Department of Electrical and Computer Engineering: Wireless Power Transmission

[9][https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7582\\_Magnetsko\\_polje\\_elektricne\\_struje.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7582_Magnetsko_polje_elektricne_struje.html)

[10] [www.veleri.hr/files/datotekep/nastavni\\_materijali/k\\_sigurnost\\_1/ELEK\\_POG\\_04.pdf](http://www.veleri.hr/files/datotekep/nastavni_materijali/k_sigurnost_1/ELEK_POG_04.pdf)

[11] [https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7585\\_Elektromagnetska\\_indukcija.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7585_Elektromagnetska_indukcija.html)

[12]<http://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektrotehnika.pdf>, str 128

[13]<http://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektrotehnika.pdf>, str 129

[14]<http://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektrotehnika.pdf>, str 136-137

[15][https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7589\\_Izmjenicna\\_struja.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7589_Izmjenicna_struja.html)

[16]<http://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektrotehnika.pdf>, str 134-135

[17]Elvis Bulić,Sveučilište u rijeci Tehnički fakultet: REZONANCIJA U IZMJENIČNIM STRUJNIM KRUGOVIMA, Rijeka, rujan 2016. str 2-6

[18] Elvis Bulić,Sveučilište u rijeci Tehnički fakultet: REZONANCIJA U IZMJENIČNIM STRUJNIM KRUGOVIMA, Rijeka, rujan 2016. str 9

[19] Elvis Bulić,Sveučilište u rijeci Tehnički fakultet: REZONANCIJA U IZMJENIČNIM STRUJNIM KRUGOVIMA, Rijeka, rujan 2016. str 21

[20]<https://riverglennapts.com/hr/rectifier/741-half-wave-rectifiers.html>

[21][https://www.fpz.unizg.hr/hgold/ES/AE/pog\\_1/pog132.htm](https://www.fpz.unizg.hr/hgold/ES/AE/pog_1/pog132.htm)

[22] Josip Hulak, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, fakultet elektrotehnike,računarstvai informacijskih tehnologija, IZVEDBA DC - AC PRETVARAČA KOD BEŽIĆNOG PRIJENOSA ENERGIJE, Osjek 2016, str 5-9

[23]<https://www.schrack.hr/know-how/alternativni-izvori/elektromobilnost/autonomni-izmjenjivac/>

[24] Tahsin, Naim Muhammad, Siddiqui, Md. Murtoza, Zaman, Md. Anik, Kayes, Mirza Imrul, Department of Electrical and Electronics Engineering Faculty of Engineering American International University- Bangladesh: Wireless Charger for Low Power Devices using Inductive Coupling, April 2012, str 14-18

## Popis slika

*Slika 1.1 Nikola tesla drži osvijetljenu žarulju napajanu bežičnim prijenosom energije [1]*

*Slika 1.2 200 žarulja osvijetljenih bežičnim prijenosom energije s udaljenosti od 40 km [2]*

*Slika 1.3 Wardencllyff toranj [4]*

*Slika 1.4 Ispravljača antena napravljena za napajanje helikoptera bežičnim putem pomoću mikrovalova [3]*

*Slika 1.5 Helikopter u letu napajan mikrovalnim bežičnim prijenosom energije [3]*

*Slika 2.1 Princip rada bežičnog prijenosa pomoću mikrovalova*

*Slika 2.2 Беспilotna letjelica SHARP [6]*

*Slika 3.1 Magnetske silnice oko ravnog vodiča [9]*

*Slika 3.2 Pravilo desne ruke [9]*

*Slika 3.3 Magnetsko polje kružne petlje [9]*

*Slika 3.4 Silnice magnetskog polja kružne petlje [10]*

*Slika 3.5 Određivanje smjera magnetskih silnica kružne petlje [9]*

*Slika 3.6 Izmjenična struja*

*Slika 3.7 Shema transformatora*

*Slika 3.8 Sinusni oblik izmjeničnog napona i struje*

*Slika 3.9 Vremenski i vektorski dijagram kod idealnog radnog otpora  $R$*

*Slika 3.10 Vremenski i vektorski dijagram kod idealnog induktivnog otpora  $X_L$*

*Slika 3.11 Ovisnost induktivnog otpora  $X_L$  o frekvenciji*

*Slika 3.12 Ovisnost kapacitivnog otpora  $X_C$  o frekvenciji*

*Slika 3.13 Vremenski i vektorski dijagram kod idealnog kapacitivnog otpora  $X_C$*

*Slika 3.14 Serijski spoj RLC strujnog kruga*

*Slika 3.15 Paralelni spoj RLC strujnog kruga*

*Slika 4.1 Blok dijagram induktivnog bežičnog prijenosa energije*

*Slika 4.2 Blok dijagram primarnog kruga induktivnog bežičnog prijenosa energije*

*Slika 4.3 Simbol i izgled diode*

*Slika 4.4 Shema spoja poluvalnog ispravljača i izgled poluvalnog ispravljenog napona*

*Slika 4.5 Shema spoja punovalnog ispravljača pomoću Greatzovog spoja i izgled ispravljenog napona*

*Slika 4.6 Shema spoja Greatzovog spoja s kondenzatorom za filtriranje napona i izgled filtriranog napona*

*Slika 4.7 Simboli elemenata: MOSFET, bipolarni tranzistor, IGBT*

*Slika 4.8 Mosni sklop četiri sklopke ili H-most*

*Slika 4.9 Izgled poluvodičkih sklopki: a) bipolarni tranzistor, b) MOSFET, c) IGBT*

*Slika 4.10 Princip rada PWM*

*Slika 4.11 Tipovi zavojnica za induktivni bežični prijenos energije*

*Slika 4.12 Prikaz učinka blizine u ovisnosti o smjeru struje*

*Slika 4.13 Blok dijagram sekundarnog kruga induktivnog bežičnog prijenosa energije*

*Slika 4.14 Izgled i raspored pinova kod regulatora napona lm317 i lm7805*

*Slika 5.1 Funkcijski generator SIGLENT SDG 125*

*Slika 5.2 Osciloskop Tektronix TDS 2014*

*Slika 5.3 Shema spoja primarnog kruga*

*Slika 5.4 Shema spoja sekundarnog kruga*

*Slika 5.5 Primarna i sekundarna zavojnice*

*Slika 5.6 Podešene vrijednosti funkcijskog generatora*

*Slika 5.7 Sinusni signal na primarnoj strani*

*Slika 5.8 Sinusni signal na sekundarnoj strani*

*Slika 5.9 Izgled izlaznog signala a) na udaljenosti 0mm b) na udaljenosti 50mm*

*Slika 5.10 Ispeglani istosmjerni napon na sekundarnoj strani*



## **Popis tablica**

Tablica 1. Načini bežičnog prijenosa energije

Tablica 2. Usporedba tehnologija bežičnog prijenosa energije

Tablica 3. Usporedba bežičnog prijenosa energije pomoću mikrovalova i lasera

Tablica 4. Usporedba električnog kruga s magnetskim krugom

Tablica 5. Wheelerove formule za proračun induktiviteta zavojnica

Tablica 6. Korišteni elementi

Tablica 7. Specifikacija zavojnica

Tablica 8. Rezultati mjerenja



IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Ivan Jorić (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Bežični prijenos energije (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Ivan J.  
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Ivan Jorić (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Bežični prijenos energije (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Ivan J.  
(vlastoručni potpis)