

**EZNEC**

**OSNOVE  
MODELIRANJA  
ANTENA**

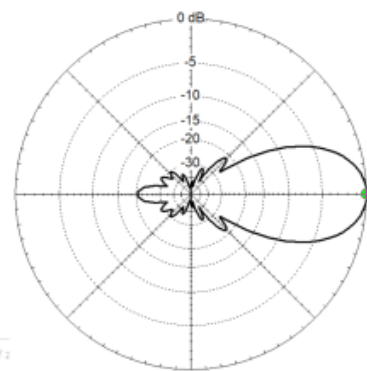
Martin Švaco 9A2JK

**Drugi dio - DODATAK**

**Five-element Yagi**

File	20m5elya.ez
Frequency	14.2 MHz
Wavelength	831,187 in
Wires	55 Wires, 95 segments
Sources	1 Source
Loads	0 Loads
Trans Lines	0 Transmission Lines
Transformers	0 Transformers
L Networks	0 L Networks
Y Param Networks	0 Y Param Networks
Ground Type	Free Space
Wire Loss	Zero
Units	Inches

No.	X (in)	Y (in)	Z (in)	W (in)	H (in)	Conn	Segs	Diel C	Thk (mil)	Loss Tan	R (ohms)	Perm	Type
1	0	0	0.05	0	0	3	1	0	0	0	1.74E-09	1	Copper
2	0	0	0.05	1	0	3	1	0	0	0	1.74E-09	1	Copper
3	0	0	0.05	2	0	3	1	0	0	0	1.74E-09	1	Copper
4	0	0	0.05	3	0	3	1	0	0	0	1.74E-09	1	Copper
5	0	0	0.05	4	0	3	1	0	0	0	1.74E-09	1	Copper
6	0	0	0.05	5	0	3	1	0	0	0	1.74E-09	1	Copper
7	0	0	0.05	6	0	3	1	0	0	0	1.74E-09	1	Copper
8	0	0	0.05	W1E1	0	-10.4	0.05	3	3	1	0	0	
9	0	0	0.05	W1O1E1	5.2	-9.00666	0.05	3	3	1	0	0	
10	0	0	0.05	W1I1E1	9.00667	-5.2	0.05	3	3	1	0	0	
11	0	0	0.05	W1S1E1	10.4	0	0.05	3	3	1	0	0	
12	0	0	0.05	W1R1E1	9.00666	5.2	0.05	3	3	1	0	0	
13	0	0	0.05	W1L1E1	5.2	9.00666	0.05	3	3	1	0	0	



**EZNEC Pro/2+**

to V:  
Options

Freq: 13.8 MHz  
 SWR: 3.63  
 Z: 76.61 at -65.94 deg.  
 = 42.91 - j 63.47 ohms  
 Refl Coeff: 0.5676 at -62.04 deg.  
 = 0.2662 - j 0.5013  
 Ref Loss: 4.9 dB

*Napisao: Martin Švaco, 9A2JK  
email: 9a2jk@hamradio.hr  
v0.8 25. kolovoza 2025.*

## Predgovor

Antene su predmet bezbrojnih radioamaterskih rasprava i uvjeravanja kako je neka antena bolja ili lošija od druge. Rasprave se vrlo rijetko temelje na izmjerenim svojstvima antene. Glavni razlog je, u radioamaterskim uvjetima, nemogućnost mjerenja. Bez mjerenja usporedba nema smisla. Ako ne možemo izmjeriti, možemo softverski simulirati. Dobro napravljen softverski model antene u EZNEC-u dobro, i u praksi iskoristivo, simulira sva svojstva nekog antenskog sustava.

Softverski model antene "otvara nam oči" kako neka antena radi bez da smo je u stvarnosti napravili. Ipak, za izradu dobrog modela treba nešto znati o antenama. Ovaj tekst o antenama nastao je od mojih bilješki pripremljenih za radioamaterski tečaj. To je samo uvod za koji se nadam da bi mogao pomoći pri lakšem savladavanju prvih koraka sa EZNEC-om.

U Đurđevcu, 25. kolovoza 2025.

Martin Švaco, 9A2JK

## Sadržaj:

Što je antena .....	1
Kako zrači dipol .....	4
Kako zrači vertikalna antena .....	4
Model dipol antene .....	5
Nadomjesna shema antene .....	5
Radni otpor, reaktancija, impedancija .....	6
Kapacitivna i induktivna reaktancija .....	6
Kapacitivna reaktancija .....	7
Induktivna reaktancija .....	8
Impedancija .....	9
Otpor zračenja antene .....	10
Impedancija antene u točki napajanja .....	11
Impedancija dipol antene i distribucija struje i napona .....	12
Impedancija vertikalne antene .....	13
Rezonancija .....	13
Rezonantna antena .....	14
Efikasnost zračenja antene .....	15
Usmjerenost zračenja antene .....	16
Izotropna antena .....	16
Decibel .....	18
Utjecaj tla na zračenje antene .....	20
Dijagram zračenja antene .....	21
Horizontalni dijagram zračenja .....	23
Vertikalni dijagram zračenja .....	26
Usmjerenost – beamwidth .....	29
SWR .....	30
Koaksijalni kabel i SWR .....	31
Polarizacija antene .....	32

# O ANTENAMA ZA POTPUNE POČETNIKE

(Napredni mogu preskočiti)

Za potpuno razumijevanje antenske teorije treba biti "matematički dobro potkovan", međutim EZNEC, preko svojeg grafičkog sučelja, "od nas skriva" svu tu kompliciranu matematiku. Ipak, korisnik treba programu zadati dobre podatke za izračun i razumjeti rezultate koje nam EZNEC prezentira u brojčanom i grafičkom formatu, a za što ne treba gotovo nikakvo matematičko znanje. Treba samo razumjeti neke osnovne pojmove o antenama.

*Definicije pojmova u ovom kratkom tekstu maksimalno su pojednostavljene u cilju lakšeg početka rada s EZNEC-om.*

## ŠTO JE ANTENA

Antena je uređaj za odašiljanje i primanje radiovalova. Kod odašiljanja, privedenu električnu energiju iz odašiljača antena predaje u radioval. Na prijemu se događa obrnuto. Antena uzima energiju iz radiovala - radioval inducira električnu struju u anteni koju vodimo u prijemnik.

Svaki vodič kroz koji teče izmjenična struja zrači elektromagnetski val, ali nije antena. Komponente svih električnih uređaja međusobno su spojene žicama (vodičima) različitih duljina. Koliko god kratki, kada kroz njih teče izmjenična struja, ti vodiči zrače elektromagnetske valove. Takvo zračenje je neželjeno, stvara nam smetnje i nastojimo ga ograničiti. Zato takvi vodiči nisu antene.

Isto tako, svaki vodič koji se nalazi u elektromagnetskom polju, uzima energiju iz elektromagnetskog polja tako da se u njemu inducira električna struja. Vrlo često nam to stvara smetnje i zato takve vodiče ne smatramo prijemnim antenama.

Važna karakteristika antena koju treba zapamtiti je reciprocitet. Reciprocitet znači da ako antena dobro zrači onda će i dobro primati i obrnuto.

**Antena je vodič (ili struktura vodiča) dimenzija i geometrijskog oblika prilagođenog za učinkovitu predaju energije u elektromagnetski val.** Za prijem radiovalova vrijedi obrnuto – antena je vodič (ili struktura vodiča) dimenzija i geometrijskog oblika prilagođenog za efikasan prijem energije iz elektromagnetskog vala uz male gubitke.

Antene postoje u različitim oblicima: dipol, vertikalna antena, yagi itd... Bez obzira na oblik, za najbolju efikasnost, dimenzije antene treba biti primjerena valnoj duljini za koju je antena napravljena – što je veća valna duljina, veća je dimenzija antene. Npr. poluvalni dipol za 3,5 MHz dug je pola valne duljine tj. oko 40 m, dok je vertikalna antena (GP) za 7 MHz visoka četvrtinu valne duljine tj. oko 10 m.

Cilj nam je napraviti antenu koja će privedenu električnu energiju uz najmanje gubitke pretvoriti u radioval i zračiti u željenom smjeru. Na prijemu vrijedi obrnuto – želimo da antena najbolje prima iz željenog smjera. Te osobine antene ne zavise samo od strukture same

antene (struktura = geometrijski oblik i materijal od kojega je antena napravljena). Osim strukture, glavni čimbenici od kojih zavise osobine antene su:

- okolina u kojoj se antena nalazi (građevine i druge antene u blizini),
- visina antene od tla,
- vrsta tla iznad kojeg je antena postavljena,
- kvaliteta koaksijalnog kabla.

Zbog svega toga na antenu treba gledati kao na **antenski sustav**. Antenski sustav čini: konektor na kabelu u sobi gdje je radiostanica, koaksijalni kabel, antena, okolne građevine, zemlja (vrsta tla), druge antene i sve ostalo što se u tom trenutku nalazi u blizini naše antene (npr. parkirani auto).

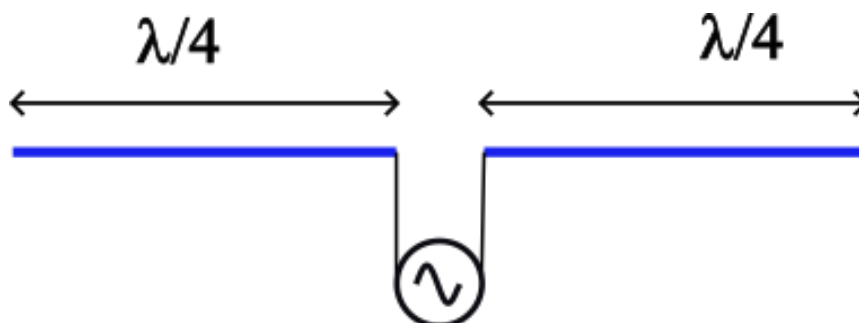
Antenu kupujemo u trgovini, a antenski sustav čini kupljena (ili u vlastitom aranžmanu napravljena) antena i okolina u kojoj se ta antena nalazi.

Ako imamo više od jedne antene (npr. yagi za gornje opsege, dipol za 40 m, dipol za 80 m i yagi za 2 m), **nemamo četiri antene**. Imamo **jedan antenski sustav** koji napajamo na četiri mjesta sa četiri kabla!

Glavna električna svojstva svake antene su:

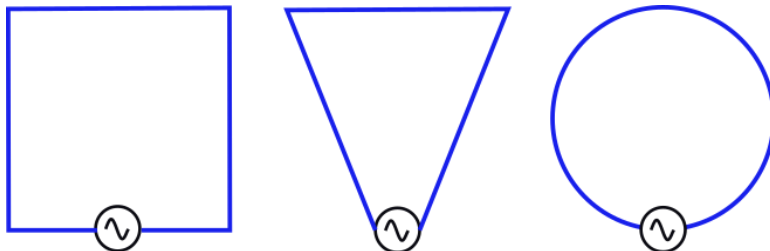
- dijagram zračenja,
- dobitak,
- usmjerenost i širina snopa zračenja,
- efikasnost antene,
- otpor zračenja,
- vertikalni kut zračenja,
- impedancija u mjestu napajanja,
- polarizacija,
- omjer naprijed-nazad,
- SWR u točki napajanja.

Osnovne vrste antena su **dipol** i **petlja** (*eng. loop*) iz kojih nastaju sve druge vrste antena.



Sl. 1. Dipol

Dipol antena se sastoji od dva vodiča (dva pola, dva kraka). Dipol je najčešće dug pola valne duljine za frekvenciju od interesa (svaki pol/krak dipola dug je 1/4 valne duljine), sl.1. Valnu duljinu označavamo s grčkim slovom lambda,  $\lambda$ . Koaksijalni kabel spajamo na svaki od polova (kao na slici gore), uglavnom na sredinu dipola, ali ne uvijek (npr. Windom je dipol koji se napaja na oko 1/3 duljine žice).



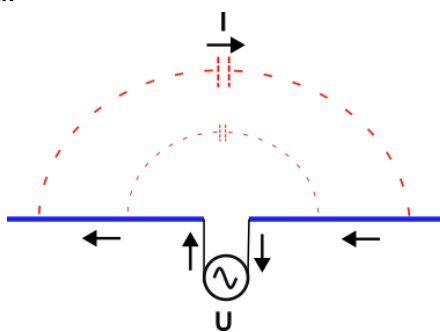
Sl. 2. - Petlja (eng. loop)

Petlja (eng. loop) antena je napravljena od vodiča koji čini zatvorenu petlju kao na slici 2.

Na prvi pogled čini se kao da je dipol otvoreni strujni krug (u prekidu), a petlja kao kratki spoj. To vrijedi za istosmjernu struju, ali ne i za izmjeničnu! Kada su dipol ili petlja spojeni na izvor izmjeničnog napona visoke frekvencije (odašiljač) dipol i petlja učinkovito zrače radiovalove.

Petlja djeluje poput zavojnice (induktor) s velikom zračnom jezgrom, koja pruža dovoljno mogućnosti polju da se rasprši od antene umjesto da bude koncentrirano i zadržano kao u običnoj zavojnici.

Strujni krug dipol antene je zatvoren preko parazitskog kapaciteta između dva pola (kraka) antene, kao što je prikazano na slici 3. (crvene iscrtkane linije). Pri visokoj frekvenciji, ovaj kapacitet predstavlja nisku impedanciju (*niska impedancija = mali otpor izmjeničnoj struji*). Struja kroz ovaj parazitski kapacitet predstavlja zračenje, a jakost zračenja proporcionalna je jakosti struje dipola.



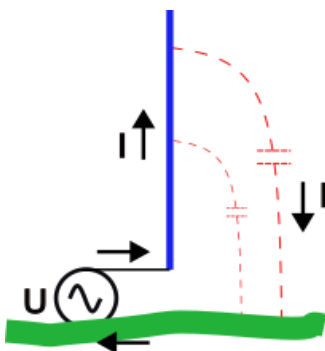
Sl. 3. Strujni krug poluvalnog dipola je zatvoren preko parazitskog kapaciteta

Kondenzatori prikazani na sl. 3. nisu stvarni kondenzatori kao u elektroničkim sklopovima, nego su prikaz distribuiranog kapaciteta koji postoji između dva međusobno izolirana vodiča bez obzira na njihovu međusobnu udaljenost. Taj kapacitet nazivamo parazitski kapacitet.

## KAKO ZRAČI DIPOL

*Dobra analogija za zračenje dipola je ako razmotrimo što se događa kada pljesnemo rukama. Pljesak pokreće akustični val, dok dipol pokreće elektromagnetski val. Potrebne su dvije ruke za pljesak, baš kao što su potrebna dva kraka za zračenje dipola.*

Dipol ima dva pola, dok vertikalna antena (nazivamo je još i monopol) ima samo jedan pol. Kako je zatvoren strujni krug kod monopola? Za zračenje dipola trebamo dva dijela, dva pola. Je li je vertikalnoj anteni dovoljan jedan pol za zračenje? Ne! Monopol (vertikalna antena) također treba dva dijela za zračenje. Monopol je pola dipola! Drugu polovicu čini referentna ravnina ispod monopola, kao na slici 4. Referentna ravnina je zemlja i svi drugi vodljivi objekti u blizini. Za male ručne radijske postaje (tzv. vokci) referentnu ravninu čine i naša ruka i tijelo. Dakle, i mi smo dio antenskog sustava vokca.



Sl. 4. Referentna ravnina – tlo i drugi vodljivi objekti

Isto kao i kod dipola, kod vertikalne antene strujni krug je zatvoren preko parazitskih kapaciteta između antene i referentne ravnine.

Ako sami ne napravimo referentnu ravninu (koja je drugi dio antene), monopol će pronaći nešto što će predstavljati referentnu ravninu. Obično će to biti najveći metalni predmet u blizini.

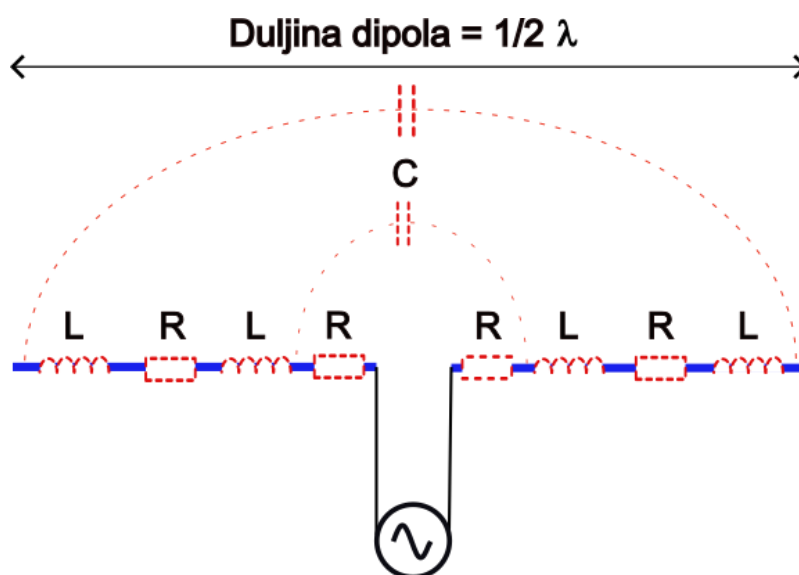
## KAKO ZRAČI VERTIKALNA ANTENA

*Ponovno se pozovimo na našu analogiju pljeskanja rukama i razmotrimo slučaj pljeskanja jednom rukom. Pljesnite jednom ruku po stolu, zidu ili koljenu. I pljesak jednom rukom pokreće akustični val. Slično funkcionira i monopol.*

## MODEL DIPOL ANTENE

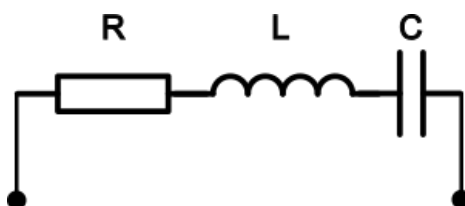
Do sada smo vidjeli da je jedan od elemenata antene kondenzator (*parazitski - preko kojega je zatvoren strujni krug dipola*). Svaki vodič ima nekakav induktivitet, pa tako i vodiči od kojih je napravljena antena (*žice, cijevi*) imaju induktivitet. Taj induktivitet je distribuiran uzduž duljine elemenata antene. Na slici 5. distribuirani induktivitet elemenata dipola prikazan je simbolom zavojnice.

Sa gledišta odašiljača, zračenje antene je trošenje energije. Jedina komponenta koja troši energiju je radni otpor, (induktivitet i kapacitet tj. zavojnica i kondenzator ne troše energiju!). Dakle, našem modelu antene treba dodati i otpornik. U konačnici model dipol antene je serijski spoj radnog otpora, R, induktiviteta, L, i kapaciteta, C.



Sl. 5. Distribucija radnog otpora, R, induktiviteta, L i kapaciteta, C, na dipol anteni

## NADOMJESNA SHEMA (MODEL) ANTENE



Sl. 6. Pojednostavljena nadomjesna shema (model) poluvalnog dipola

## RADNI OTPOR, REAKTANCIJA, IMPEDANCIJA

Pojmovi važni za razumijevanje rada, analizu i izradu modela antene su:

- radni otpor, **R**
- reaktancija, **X**
- impedancija, **Z**

**RADNI OTPOR**, **R**, je opiranje toku struje kod kojega se električna energija pretvara u toplinu i zračenje radiovala.

**REAKTANCIJA**, **X** – kapaciteti i induktiviteti opiru se promjenama izmjenične struje koja teče kroz njih. To opiranje nazivamo reaktancija.

**IMPEDANCIJA**, **Z**, je kombinirano opiranje toku struje koje zajednički pružaju radni otpor, **R** i reaktancija, **X**.

## KAPACITIVNA I INDUKTIVNA REAKTANCIJA

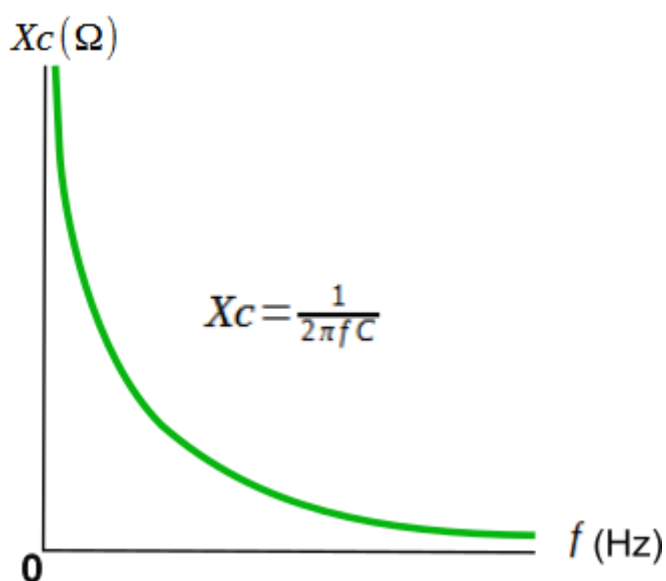
Vodič svojim induktivitetom, **L** i kondenzator svojim kapacitetom, **C**, pružaju otpor izmjeničnoj struji, koji nazivamo reaktancija i označavamo slovom **X**. Otpor koji pruža kapacitet nazivamo kapacitivna reaktancija, a otpor koji pruža induktivitet nazivamo induktivna reaktancija.

Iz toga slijedi da kapacitivna i induktivna reaktancija zavise o fizičkim dimenzijama antene kao npr. duljina i debljina žice/elementa antene.

Razmotrimo posebno kapacitivnu reaktanciju, posebno induktivnu i slučaj kada su ove dvije reaktancije spojene u seriju kao kod dipola.

## KAPACITIVNA REAKTANCIJA

Vidimo da je strujni krug dipol antene zatvoren preko parazitskog kapaciteta između dva kraka antene. S praktične točke gledanja, parazitski kapacitet je isto kao da je između te dvije točke spojen stvarni, fizički, kondenzator. U krugu istosmjerne struje, kondenzator je prekid – struja ne teče, ali u krugu izmjenične struje kondenzator nije prekid. Kondenzator pruža opiranje izmjeničnoj struji koje nazivamo kapacitivni otpor ili kapacitivna reaktancija, označavamo sa  $X_C$ , a jedinica mjere je om,  $\Omega$ .  $X_C$  zavisi o frekvenciji – viša frekvencija, manja kapacitivna reaktancija. Ovisnost kapacitivne reaktancije o frekvenciji najbolje možemo prikazati grafom, sl. 7.

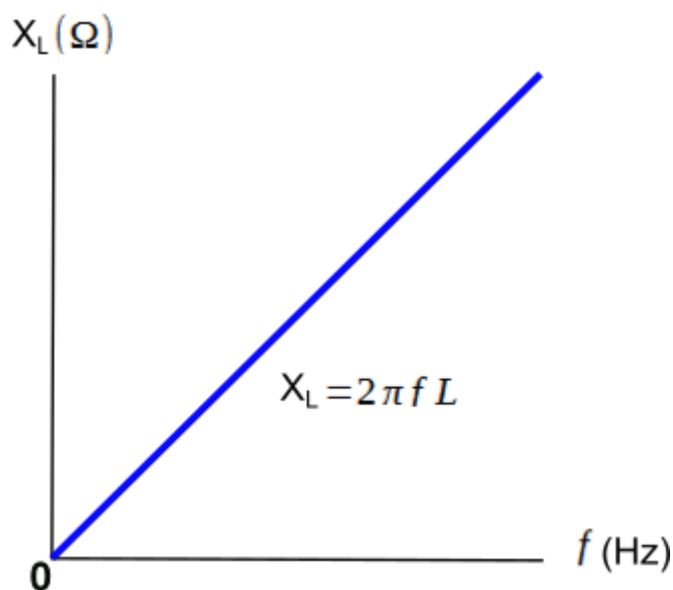


Sl. 7. Graf ovisnosti kapacitivne reaktancije o frekvenciji – s povećanjem frekvencije  $X_C$  pada

**Zapamtimo:** kapacitivna reaktancija ima negativni predznak (smatramo je negativnom reaktancijom).

## INDUKTIVNA REAKTANCIJA

Svaki vodič, bez obzira na veličinu ili geometrijski oblik (ne treba biti namotan u zavojnicu), ima nekakav induktivitet. Zavojnica u krugu istosmjerne struje je kratki spoj, ali u krugu izmjenične struje zavojnica nije kratki spoj. Zavojnica svojim induktivitetom pruža opiranje izmjeničnoj struji koje nazivamo induktivni otpor ili induktivna reaktancija i označavamo sa  $X_L$ , a jedinica mjere je om,  $\Omega$ .  $X_L$  zavisi o frekvenciji – viša frekvencija, viša induktivna reaktancija. Graf ovisnosti induktivne reaktancije o frekvenciji izgleda kao na slici 8.



Sl. 8. Graf ovisnosti induktivne reaktancije o frekvenciji – s povećanjem frekvencije  $X_L$  raste

**Zapamtimo:** induktivna reaktancija ima pozitivni predznak (smatramo je pozitivnom reaktancijom).

## IMPEDANCIJA

Uvijek i svugdje imamo nekakav induktivitet i kapacitet koji se svojim reaktancijama opiru toku izmjenične struje. U anteni istovremeno imamo obje reaktancije,  $X_L$  i  $X_C$ . Ove dvije reaktancije djeluju nasuprot jedna drugoj i jedna poništava drugu, ali uvijek prevladava veća, ili  $X_L$  ili  $X_C$ . To znači da je ukupna reaktancija,  $X$ , jednaka razlici  $X_L - X_C$ .

$$X = X_L - X_C \quad [\Omega]$$

$X$  može imati pozitivnu ili negativnu vrijednost, a može biti i nula.

Važno je razumjeti da reaktancije ne troše snagu iz odašiljača! Snagu iz odašiljača preuzima/troši radni otpor antene (najviše otpor zračenja antene – vidi poglavlje OTPOR ZRAČENJA ANTENE).

**Radni otpor** je otpor koji troši snagu na zagrijavanje ili zračenje elektromagnetskog vala.

Sveukupno, kombinirano, opiranje toku izmjenične struje koje pružaju radni otpor,  $R$  i reaktancija,  $X$ , nazivamo impedancija. Impedanciju označavamo sa slovom  $Z$ , a mjerimo u omima,  $\Omega$ .

**Impedancija = Radni otpor + Reaktancija**

$$Z = R + jX \quad [\Omega]$$

gdje je:

- $Z$  - impedancija
- $R$  - radni otpor
- $X$  - ukupna reaktancija
- $j$  - imaginarna jedinica (definirana kao drugi korijen iz -1)

Iz grafova induktivne i kapacitivne reaktancije vidimo da se reaktancija mijenja sa promjenom frekvencije (**induktivitet i kapacitet antene su nepromjenjivi**). Osim toga za istu promjenu frekvencije jedna reaktancija raste, a druga pada. Drugim riječima, stvar postaje "kompleksna" pa zato impedanciju opisujemo s kompleksnim brojem (matematički  $a + jb$ ). Zato EZNEC, program za modeliranje antena, impedanciju antene u točki napajanja prikazuje kao kompleksni broj, npr.  $77,14 - j 4,613$  oma.

## OTPOR ZRAČENJA ANTENE – RADIATION RESISTANCE

Znamo da svaka antena ima kapacitet i induktivitet. Induktivitet i kapacitet svojim se reaktancijama opiru toku struje kroz njih. Bez ulaženja u dublje objašnjenje (za one koje zanima postoji doslovno tone literature), dovoljno je zapamtiti: **induktivitet i kapacitet ne troše snagu odašiljača.**

Snaga koju odašiljač šalje u antenu troši se kao gubitak na zagrijavanje materijala od kojeg je napravljena antena, kao gubitak u prijenosnom vodu (koaksijalnom kabeu) i **kao snaga predana u radioval.**

Po definiciji, električna snaga je umnožak otpora i kvadrata jakosti struje koja teče kroz taj otpor:

$$P = I^2 \cdot R$$

Znači, mora postojati nekakav otpor koji na sebe preuzima snagu iz odašiljača koji radioval prenosi kroz prostor. Taj otpor nazivamo **otpor zračenja antene** (*eng. radiation resistance*).

**Otpor zračenja** je konceptualni otpor koji predstavlja otpor koji antena pokazuje zbog zračenja elektromagnetskih valova. On je pokazatelj efikasnosti antene u pretvorbi snage iz odašiljača u snagu koju zrači radioval.

Otpor zračenja, zavisi od visine antene od tla, vrsti tla, blizine drugih vodljivih i nevodljivih objekata u okolini antene i ne ovisi od materijala od kojega je antena napravljena. Otpor zračenja se povećava s visinom antene iznad tla: što je antena na višoj visini, veći je otpor zračenja pa antena efikasnije zrači!

## IMPEDANCIJA ANTENE U TOČKI NAPAJANJA

Impedancija antene, u omima, je vrijednost impedancije na antenskom priključku (mjesto na kojem je koaksijalni kabel spojen na antenu):

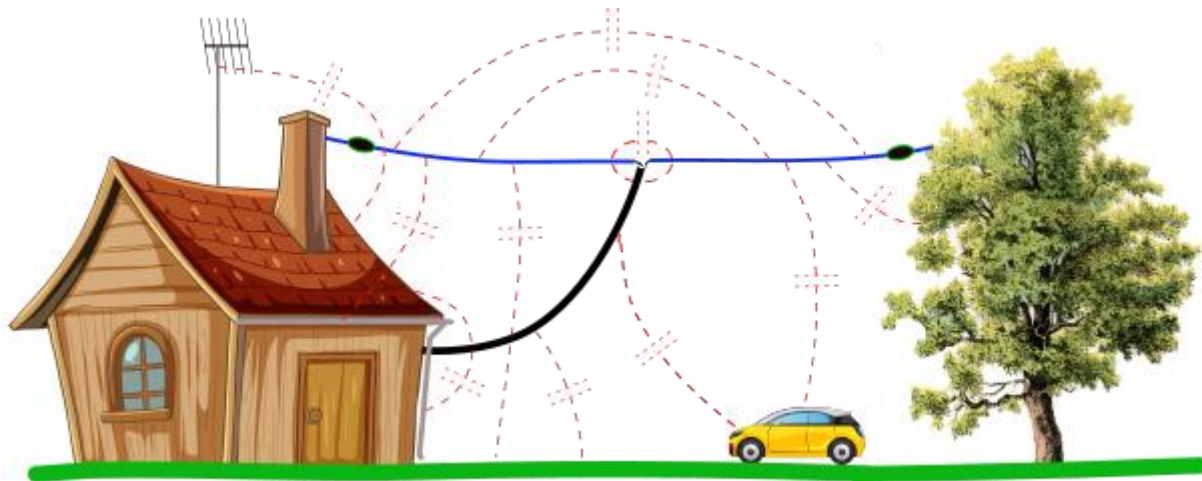
$$Z_{\text{ant}} = R + jX \quad [\Omega]$$

gdje je

- $Z_{\text{ant}}$  - impedancija antene na mjestu napajanja
- $R$  - ukupni otpor na kojem se troši snaga iz odašiljača
- $X$  - ukupna reaktancija na mjestu napajanja
- $j$  - imaginarna jedinica (definirana kao drugi korjen iz -1)

Cilj nam je napraviti antenu gdje je  $R$  što bliže  $50 \Omega$ , a  $X$  što bliže nuli. U stvarnosti nije moguće postići  $R=50 \Omega$  i  $X=0 \Omega$ . Što smo bliže tim vrijednostima, antena je bolje prilagođena na odašiljač (imamo manji SWR). Ipak moramo znati da dobro prilagođenje (**mali SWR**) **ne znači da antena efikasno zrači**. Možemo imati idealni SWR, npr. 1, a da efikasnost zračenja bude vrlo mala.

Ukupna reaktancija antene,  $X$ , sastoji se od distribuiranog induktiviteta i kapaciteta antene. Kapacitet antene ne čini samo kapacitet između elemenata antene (kao npr. između dva dijela dipola) nego i kapacitet između elemenata antene i svih vodljivih dijelova okoline (npr. žlijeb na kući, sidrene sajle antenskog stupa itd..) sl. 9.



Sl. 9. Ilustracija kapaciteta između antene i okoline

Na sl. 9. crvenom iscrtkanom linijom ilustrirani su kapaciteti između antenskog sustava (dipol + koaks) i kuće, TV antene, stabla, automobila i zemlje. I ti kapaciteti su dio reaktancije i ukupne impedancije koju vidi odašiljač.

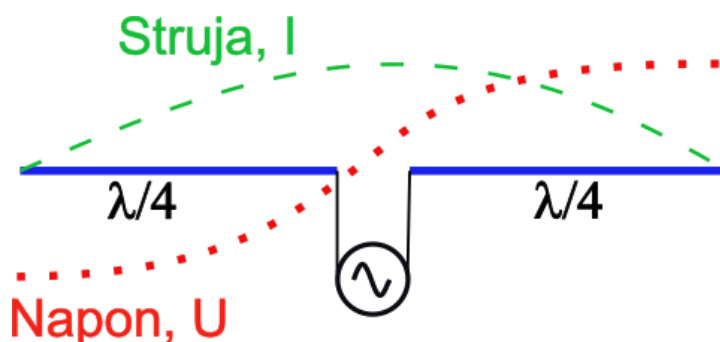
Sa slike 9. je vidljivo kako se promjenom okoline antene (npr. promjenom visine antene ili visine samo jednog kraka) mijenja kapacitet. Promjenom kapaciteta mijenja se kapacitivna reaktancija i u konačnici impedancija antene.

## IMPEDANCIJA DIPOL ANTENE I DISTRIBUCIJA STRUJE I NAPONA

Drugi način gledanja na impedanciju je kroz napon i jakost struje na mjestu napajanja antene. Po definiciji, impedancija je omjer napona i jakosti struje.

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

Pogledajmo kako to izgleda na dipol anteni, sl. 10. Napon i jakost struje na svakom mjestu dipola nisu isti. Struja je najslabija na krajevima, a najjača na sredini, dok je napon najviši na krajevima, a najmanji na sredini. Raspodjela napona i struje **ne zavise** od mjesta na kojem napajamo antenu. Na mjestu najjače struje i najmanjeg napona imamo najmanju impedanciju. Dakle, ako dipol napajamo na sredini imamo najmanju impedanciju. Dipol možemo napajati i na drugim mjestima, više ili manje prema krajevima. Na tim drugim mjestima impedancija dipola će biti viša. Tako npr. Windom antenu napajamo na oko 1/3 udaljenosti od kraja i na tom mjestu impedancija je oko 200  $\Omega$  pa za prilagođenje na koaksijalni kabel RG213 koristimo transformator impedancije 4 : 1 koji impedanciju od 200  $\Omega$  transformira na impedanciju kabela od 50  $\Omega$ .



Sl. 10. Raspodjela jakosti struje (zeleno) i visine napona (crveno) na poluvalnom dipolu

Impedancija idealnog poluvalnog dipola u slobodnom prostoru (bez utjecaja okoline), napajanog točno u sredini, iznosi oko 73  $\Omega$ . U stvarnosti, radi utjecaja okoline i visine antene od zemlje, impedancija poluvalnog dipola u točki napajanja pada i približava se vrijednosti od 50  $\Omega$ . Zato koaksijalni kabel od 50  $\Omega$  možemo direktno spajati na dipol bez transformatora impedancije.

Impedancija antene je važna i radi optimalnog prilagođenja odašiljača na antenu, jer samo kod optimalnog prilagođenja odašiljač šalje najviše snage u antenu. **Optimalno prilagođenje je kada su sve impedancije jednake** tj. kada je:

$$\underline{\text{impedancija odašiljača}} = \underline{\text{impedancija kabela}} = \underline{\text{impedancija antene}}$$

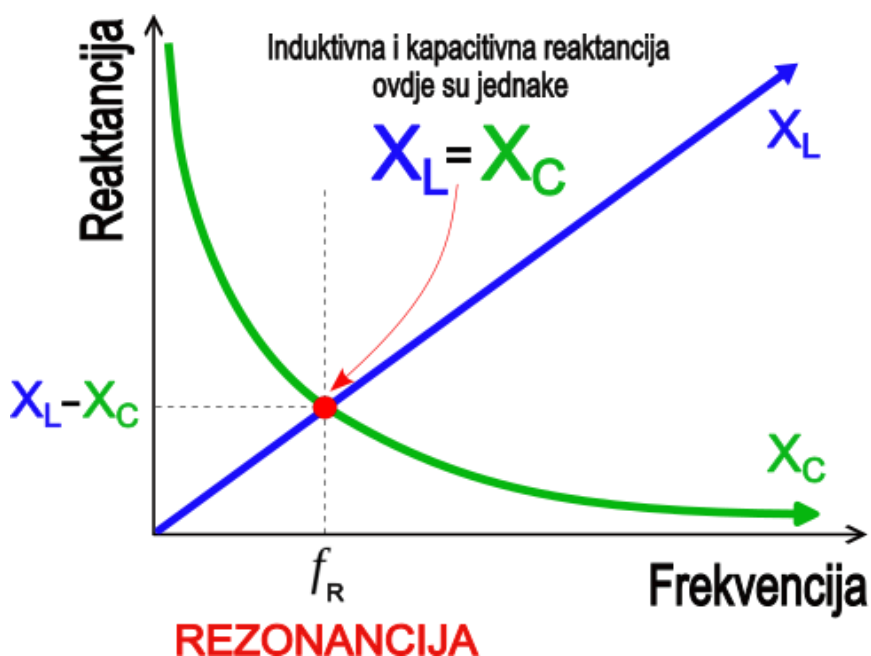
Naši odašiljači imaju impedanciju od 50 +j0  $\Omega$ , koaksijalni kabel je također 50 +j0  $\Omega$ . Jedina varijabla je impedancija antene koja može imati 50 +j0  $\Omega$  samo na jednoj jedinoj frekvenciji. Što se više udaljavamo od te jedne frekvencije, impedancija antene više nije 50 +j0  $\Omega$ .

## IMPEDANCIJA VERTIKALNE ANTENE

Vertikalna antena (monopol) je pola dipola, pa je zato i impedancija vertikalne antene pola impedancije dipola tj. oko  $36 \Omega$ .

### REZONANCIJA

U spoju induktiviteta i kapaciteta (*uvijek i svugdje imamo nekakav induktivitet i kapacitet!*), na nekoj frekvenciji dolazimo u stanje kada su  $X_L = X_C$ , što znači da reaktancije poništavaju jedna drugu, ukupna reaktancija  $X$  je nula oma, sl. 11. Tu frekvenciju nazivamo rezonantna frekvencija. Na rezonantnoj frekvenciji jakost struje kroz antenu ograničena je samo otporom zračenja i radnim otporom materijala antene.



Sl. 11. Rezonancija nastupa kada je  $X_L - X_C = 0$

Na gornjem grafu, na vertikalnoj osi je reaktancija u omima, a na horizontalnoj osi je frekvencija u hercima. Sa povećavanjem frekvencije od niže prema višoj frekvenciji vidimo kako  $X_C$  pada, a istovremeno  $X_L$  raste. U jednom momentu, na nekoj frekvenciji,  $X_C$  i  $X_L$  postaju jednake i poništavaju jedna drugu. Tu frekvenciju, na kojoj su  $X_C$  i  $X_L$  jednake, nazivamo rezonantna frekvencija.

## REZONANTNA ANTENAMA

Rezonantna antena je antena kod koje je reaktancija u točki napajanja jednaka nuli tj.  $X_L - X_C = 0$ .

Na rezonantnoj frekvenciji jakost struje kroz antenu je najveća i antena najbolje zrači – efikasnost zračenja antene je najveća.

Rezonantna frekvencija dipola povezana je s duljinom antene. Do rezonancije poluvalnog dipola napajanog na sredini dolazi kada je svaki krak dipola dugačak točno  $1/4 \lambda$  tj. kada je ukupna duljina poluvanog dipola točno  $1/2 \lambda$ .

Što radimo kada produljujemo ili skraćujemo duljinu dipola? Mijenjamo induktivnu i kapacitivnu reaktanciju antene, a time i impedanciju antene u točki napajanja! Kada, (promjenom duljine žice), postignemo da je  $X_L = X_C$ , ukupna reaktancija  $X$  je nula, pa je impedancija antene koju vidi odašiljač ograničena samo otporom zračenja i otporom gubitaka:

$$\mathbf{Z \text{ rezonantne antene} = R_{zr} + R_{gub} \quad [ \Omega ]}$$

Vertikalna antena je rezonantna kada je duga točno  $1/4 \lambda$ . Sve ostalo vrijedi kao i za dipol.

Rezonantna antena ne mora imati impedanciju 50 oma, tj. SWR u rezonanciji ne mora biti 1.

## EFIKASNOST ZRAČENJA ANTENE

Efikasnost zračenja antene definirana je kao omjer otpora zračenja i zbroja otpora zračenja i otpora gubitaka u točki napajanja.

$$\text{Efikasnost} = \frac{R_{\text{zračenja}}}{(R_{\text{zračenja}} + R_{\text{gubitaka}})}$$

**Primijetite da u formuli za efikasnost nema SWR-a !!!**

Cilj nam je napraviti antenu koja efikasno zrači. Naravno da uz veliku efikasnost zračenja želimo i dobar SWR tj. da bi htjeli impedanciju u točki napajanja 50 oma (ili jako blizu).

Uzmimo za primjer vertikalnu antenu za 40 m postavljenu iznad zemlje sa radijalima na površini zemlje ili plitko ukopanim. Sa svega nekoliko radijala postizemo odličan SWR, skoro idealan 1. Neki će uzviknuti: "To te to". Ne, to je prvi znak da takva antena ne valja, da slabo zrači!

Antenska teorija kaže da je otpor zračenja rezonantne vertikalne antene pola otpora zračenja polovalnog dipola, tj. oko 36 oma. Ako imamo SWR = 1, znači da zbroj otpora zračenja i otpora gubitaka iznosi 50 oma. Iz toga izračunamo da je otpor gubitaka 14 oma ( $50 - 36 = 14$ ). Sad imamo sve podatke za izračun efikasnosti antene. Uvrstimo u gornju formulu  $36 / (36 + 14) = 0,7$ . Izraženo u postocima to je oko 70 % ili za privedenih 100 W antena će zračiti samo 70 W snage. 1/3 snage gubi se na toplinu.

Bolju efikasnost zračenja antene postizemo povećanjem otpora zračenja, smanjenjem reaktivne komponente impedancije na najmanju moguću vrijednost i smanjenjem gubitaka. Kod vertikalne antene gubitke smanjujemo povećanjem broja radijala.

Kod dipola i drugih antena koje postavljamo iznad zemlje, efikasnost povećavamo podizanjem antena na veću visinu iznad zemlje. Što je antena na većoj visini, manji je utjecaj zemlje i okoline i veći je otpor zračenja.

Napomena: SWR je važan **radi maksimalnog prijenosa snage od odašiljača do antene** i radi zaštite odašiljača. SWR ne pokazuje koji dio snage iz odašiljača je antena izračila, niti izgubljenu snagu.