

# Rezonatorska mreža M ekscentričnih prstenastih rezonatora

---

Štivičić, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:479440>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-25**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Stručni studij**

**REZONATORSKA MREŽA M EKSCENTRIČNIH  
PRSTENASTIH REZONATORA**

**Završni rad**

**Marko Štivičić**

**Osijek, 2023.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju**

Osijek, 20.09.2023.

**Odboru za završne i diplomske ispite****Imenovanje Povjerenstva za završni ispit  
na preddiplomskom stručnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Marko Štivičić
<b>Studij, smjer:</b>	Stručni prijediplomski studij Računarstvo
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	AR 4760, 19.07.2019.
<b>OIB Pristupnika:</b>	06077457335
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Slavko Rupčić
<b>Sumentor:</b>	,
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	izv. prof. dr. sc. Vanja Mandrić
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	prof. dr. sc. Slavko Rupčić
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	doc. dr. sc. Denis Vranješ
<b>Naslov završnog rada:</b>	Rezonatorska mreža M ekscentričnih prstenastih rezonatora
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Radiokomunikacije (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada</b>	Simulacijski izračun, analiza i oblikovanje mreže rezonatora izvedenog sa M ekcentričnih cilindara za frekvencije od 100 MHz do 5 GHz. Analiza treba obuhvatiti određivanje refleksije i transmisije (S parametara) EM vala pri prolasku kroz ovakav rezonator te određivanje utjecaja parametara strukture na S parametre ovih rezonatora. Za svaki od analiziranih parametara utvrditi njegov utjecaj na rezonantnu frekvenciju kao i nivo S parametra sprege na rezonantnoj frekvenciji (ili više njih).
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	20.09.2023.
<i>Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:</i>	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 09.10.2023.

**Ime i prezime studenta:**

Marko Štivičić

**Studij:**

Stručni prijediplomski studij Računarstvo

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

AR 4760, 19.07.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

1

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Rezonatorska mreža M ekscentričnih prstenastih rezonatora**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Slavko Rupčić

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. HFSS SIMULACIJA</b> .....	2
<b>3. MODELIRANJE MIKROVALNOG REZONATORA – MCRR</b> .....	4
<b>3.1. Mikrovalni rezonator</b> .....	4
<b>3.2. Komponente mikrovalnog rezonatora</b> .....	5
<b>4. SIMULACIJA I REZULTATI</b> .....	11
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	31
<b>LITERATURA</b> .....	33
<b>SAŽETAK</b> .....	34
<b>ABSTRACT</b> .....	35
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	36
<b>PRILOZI</b> .....	37
<b>Popis slika</b> .....	37

## 1. UVOD

Predmet ovog završnog rada obuhvaća simulacijski izračun, analizu i oblikovanje mikrovalnog rezonatora temeljenog na  $M$  ekscentričnih cilindara za frekvencijski raspon od 100 MHz do 5 GHz. Glavni cilj ovog istraživanja je temeljita analiza refleksije i transmisije (S parametri) EM vala pri prolazu kroz unaprijed definiranu mrežu sastavljenu od 36 ekscentričnih cilindara pri promjeni parametara strukture rezonatora unutar navedenog frekvencijskog opsega.

Mreža rezonatora se dakle sastoji od 36 ekscentričnih cilindara koji su pravilno raspoređeni unutar rezonatora. Ključni parametri za analizu jesu dimenzije cilindara.

$S_{11}$  je koeficijent refleksije koji predstavlja mjernu veličinu refleksije signala te je njegov nivo ključan za procjenu učinkovitosti rezonatora unutar odabranog frekvencijskog opsega.

Nadalje,  $S_{21}$  je koeficijent transmisije koji predstavlja mjernu veličinu transmisije signala te njegov nivo uz nivo prethodnog  $S_{11}$  parametra omogućuje cjelovito sagledavanje učinkovitosti rezonatora unutar odabranog frekvencijskog opsega.

Analizirajući različite dimenzije prstenova, cilj je identificirati njihov utjecaj na rezonantnu frekvenciju i nivo  $S_{11}$  i  $S_{21}$  parametra sprege. Kroz temeljitu analizu, nastojat će se utvrditi utjecaj strukture rezonatora na njegov rad unutar frekvencijskog raspona rada. Važno je napomenuti da budući da je simulacijski izračun prilično vremenski zahtjevan, a opseg ovo rada ograničen, u ovom radu će se fokus staviti na dva najvažnija parametra strukture: debljinu prstenova te radijus unutarnjeg prstena, dok će utjecaj ostalih parametara strukture ostati kao onaj dio koji će se odraditi u budućnosti kao nastavka ovog rada.

Ovaj završni rad ima za cilj stjecanje dubljeg razumijevanja dizajna mikrovalnih rezonatora i njihovu primjenu u kontekstu mikrovalne tehnologije. Rezultati i zaključci dobiveni ovim istraživanjem (kao i onim dijelom koji će se odraditi u budućnosti – ostali parametri strukture) omogućiti će i optimizaciju dizajna ovakvih mikrovalnih rezonatora i za druge frekvencijske opsege.

U nastavku ovog rada koristit će se prikladni softverski alat za simulaciju mikrovalnih rezonatora te detaljno analizirati rezultate simulacija.

Kroz sustavan i analitički pristup, ovaj rad će završni rad pružiti praktične smjernice za optimizaciju dizajna i primjenu mikrovalnih rezonatora ovog tipa.

## 2. HFSS SIMULACIJA

HFSS (engl. *High-Frequency Structure Simulator*) je računalni program koji se koristi za simulaciju elektromagnetskih polja u visokofrekventnim područjima. Ovaj program je vrlo omogućuje detaljnu analizu i projektiranje složenih struktura koje rade na visokim frekvencijama [1].

HFSS koristi metodu konačnih elemenata kako bi modelirao i analizirao probleme propagacije elektromagnetskih polja u 3D prostoru. To pruža informacije o tome kako se električna i magnetska polja raspoređuju u različitim komponentama i sustavima. Također mogu se dobiti podaci o impedancijama, parametrima sprege, gubicima, rezonantnim frekvencijama i drugim karakteristikama elektromagnetskog sustava [1].

HFSS može simulirati različite komponente kao što su antene, filtri, vodiči, rezonatori, linije prijenosa, mikrovalni krugovi, PCB-ovi i drugo. Kroz simulaciju mogu se istraživati različiti dizajni i analizirati performanse te optimizirati parametre prije nego što izrade fizičke prototipove. HFSS također nudi napredne vizualne alate koji omogućuju bolje razumijevanje elektromagnetskih interakcija. Također podržava parametarske analize, optimizacijske postupke i integraciju s drugim softverima, što olakšava rad i poboljšava produktivnost [1].

S obzirom na svoju svestranost i preciznost, HFSS je industrijski standard za simulaciju i projektiranje visokofrekventnih komponenti i sustava. Njegova primjena doprinosi napretku tehnologije i omogućuje razvoj sofisticiranih elektromagnetskih rješenja koja se koriste u različitim sektorima, uključujući telekomunikacije, bežične komunikacije, elektromagnetsku kompatibilnost i mnoge druge.

U nastavku je prikazano nekoliko ključnih značajki ANSYS Electronics Desktopa koje ga čine vrijednim alatom za istraživanja [2]:

1. Elektromagnetske simulacije - ANSYS omogućuje simulaciju elektromagnetskih polja, što je izuzetno važno u mnogim elektroničkim aplikacijama. To može uključivati analizu antena, mikrovalnih krugova, bežičnih komunikacija, ali i elektromagnetske kompatibilnosti (EMC) i elektromagnetske interakcije u složenim sustavima.
2. Termalne simulacije - za elektroničke komponente, upravljanje toplinom je ključno. ANSYS omogućuje simulaciju toplinskih učinaka u uređajima, što je od vitalnog značaja za održavanje ispravne radne temperature i sprečavanje pregrijavanja.



3. Analiza signala i sustava - softver omogućuje analizu električnih signala u vremenskom i frekvencijskom domenu. To je korisno za projektiranje i analizu elektroničkih sklopova, filtera, pojačala, oscilatora i drugih elektroničkih sustava.
4. Integracija s drugim alatima - ANSYS se lako integrira s drugim softverskim alatima, što olakšava izvođenje cjelovitih analiza elektroničkih sustava.
5. Optimizacija dizajna - korištenjem simulacija u ANSYS, istraživači, ali i studenti mogu optimizirati svoj dizajn, identificirati probleme unutar svojih sustava i testirati različite scenarije kako bi postigli najbolje rezultate.
6. Edukacijske resurse - ANSYS često nudi bogat izbor edukacijskih resursa, uključujući online tečajeve i priručnike, što olakšava učenje i upotrebu ovog alata.

Za izradu akademskih radova, ANSYS Electronics Desktop omogućuje studentima i istraživačima da provedu dubinsku analizu svojih projekata, što može rezultirati boljim razumijevanjem elektromagnetskih i elektroničkih sustava te donošenjem informiranih dizajnerskih odluka. Ovaj alat također pomaže u stvaranju uvjerljivih i detaljnih analiza koje mogu obogatiti kvalitetu završnih radova.

### 3. MODELIRANJE MIKROVALNOG REZONATORA – MCRR

#### 3.1. Mikrovalni rezonator

Mikrovalni rezonator je uređaj koji se koristi u mikrovalnom i radiofrekventnom (RF) inženjerstvu za selektivnu kontrolu i manipuliranje elektromagnetskim valovima određenih frekvencija. Dizajniran je za pojačavanje ili filtriranje određenih mikrovalnih frekvencija dok prigušuje druge. Mikrovalni rezonatori važne su komponente u raznim primjenama, uključujući bežične komunikacijske sustave, radarske sustave, mikrovalne pećnice i znanstvene instrumente. Glavna funkcija mikrovalnih rezonatora je proizvesti fenomen rezonancije na određenoj frekvenciji. Rezonancija se događa kada se prirodna frekvencija rezonatora podudara s frekvencijom dolaznog elektromagnetskog vala ili signala. Kada je ovaj uvjet rezonancije ispunjen, nekoliko važnih učinaka i funkcija stupa na snagu [3]:

- Frekvencijska selektivnost – mikrovalni rezonatori koriste se za odabir i pojačavanje specifičnih frekvencija unutar raspona mikrovalnog ili radiofrekventnog signala. Mogu se dizajnirati tako da rezoniraju na određenim frekvencijama dok prigušuju signale na drugim frekvencijama, učinkovito djelujući kao filtri.
- Pojačanje signala - u nekim slučajevima mikrovalni rezonatori mogu pojačati signale na njihovoj rezonantnoj frekvenciji. Ovo je osobito korisno u krugovima mikrovalnog pojačala i oscilatora.
- Mjerenje frekvencije - mikrovalni rezonatori mogu se koristiti za precizna mjerenja frekvencije. Ugađanjem rezonatora dok ne rezonira s ulaznim signalom, inženjeri mogu odrediti frekvenciju signala.
- Kondicioniranje signala - rezonatori se koriste za kondicioniranje signala na razne načine. Na primjer, mogu biti dio mreže za usklađivanje impedancije kako bi se osigurao učinkovit prijenos energije između komponenti.
- Stabilnost - u krugovima mikrovalnog oscilatora, rezonator pomaže stabilizirati izlaznu frekvenciju održavanjem fiksne referentne frekvencije.

- Smanjenje buke - rezonatori se mogu koristiti za smanjenje buke selektivnim filtriranjem neželjenih frekvencija.

Uobičajene vrste mikrovalnih rezonatora uključuju šupljinske rezonatore (npr. pravokutne ili cilindrične šupljine), valovodne rezonatore (temeljene na valovodnim strukturama) i dielektrične rezonatore (koji koriste dielektrične materijale za utjecaj na rezonanciju). Specifična vrsta odabranog rezonatora ovisi o zahtjevima primjene kao što su frekvencijski raspon, Q-faktor (mjera kvalitete ili selektivnosti rezonatora) i mogućnost kontrole snage. Mikrovalni rezonatori ključne su komponente u mikrovalnim i radiofrekventnim sustavima koji pomažu u manipuliranju i kontroli elektromagnetskih valova na određenim frekvencijama, pružajući funkcije kao što su filtriranje, pojačanje i mjerenje frekvencije. Omogućuje preciznu obradu i korištenje mikrovalnih signala u raznim tehničkim primjenama

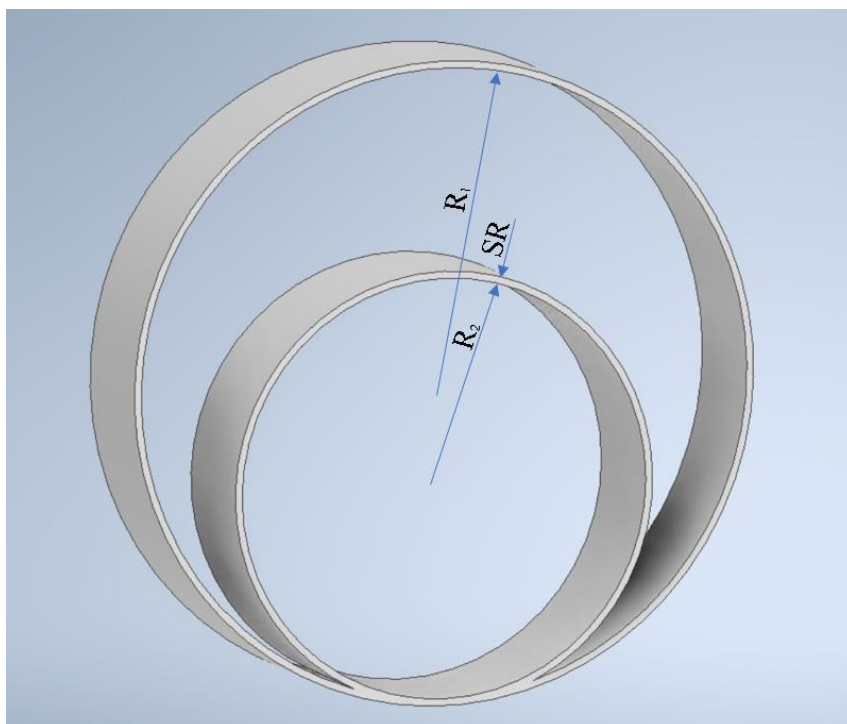
### **3.2. Komponente mikrovalnog rezonatora**

Mikrovalni rezonatori su uređaji koji se koriste u mikrovalnoj i RF (radio frekvencijskoj) tehnologiji za generiranje i kontrolu elektromagnetskih valova određenih frekvencija. Obično se koriste u aplikacijama kao što su filtri, oscilatori i obrada signala. Glavne komponente mikrovalnog rezonatora obično uključuju [3,4]:

- Šupljina ili valovod - rezonatori se obično sastoje od strukture šupljine ili valovoda koja ograničava i vodi elektromagnetske valove. Struktura može imati različite oblike, poput pravokutnog, cilindričnog ili koaksijalnog, ovisno o specifičnom dizajnu rezonatora i primjeni.
- Dielektrični materijali - u nekim dizajnim rezonatora koriste se dielektrični materijali za utjecaj na rezonantnu frekvenciju i karakteristike. Ovi materijali mogu promijeniti električna i magnetska svojstva unutar šupljine, čime utječu na rezonantnu frekvenciju i faktor kvalitete (Q faktor) rezonatora.

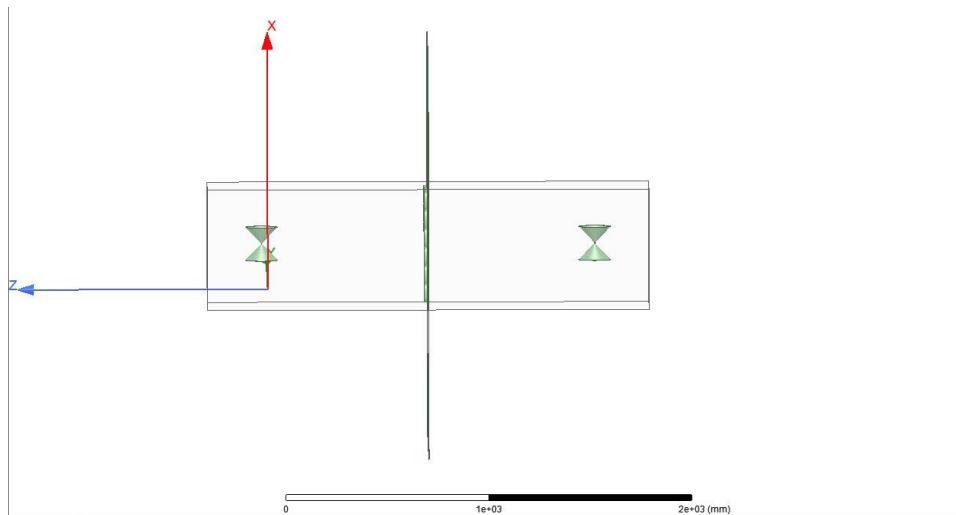
- Izvor - mikrovalna rezonantna šupljina zahtijeva izvor za uvođenje elektromagnetskih valova u šupljinu. Izvor može biti mikrovalni generator kao što je klistron ili magnetron, ili čak vanjski izvor signala ako se za mjerenja koristi rezonator.
- Mehanizam sprege - mehanizam sprege obično se koristi za izvlačenje mikrovalnih signala ili unošenje mikrovalnih signala u rezonator. To se može postići korištenjem različitih metoda, kao što su antene, sonde ili spojnice. Mehanizam sprege omogućuje izmjenu energije između vanjskog kruga i rezonatora.
- Elementi za ugađanje - ovisno o specifičnoj primjeni i zahtjevima dizajna, mikrovalni rezonatori mogu sadržavati elemente za ugađanje kao što su podešivi kondenzatori ili induktori. Ove se komponente mogu koristiti za fino podešavanje rezonantne frekvencije šupljine.
- Završetak - odgovarajući završetak rezonatora ključan je za sprječavanje neželjenih refleksija i gubitaka. Završeci mogu uključivati odgovarajuća opterećenja ili upijajuće materijale postavljene na krajeve šupljine kako bi se smanjila refleksija signala.
- Strukture koje poboljšavaju Q-faktor - u nekim slučajevima mogu se dodati dodatne strukture kao što su supravodljivi materijali ili specijalizirani premazi za povećanje Q-faktora rezonatora, čime se smanjuju gubici energije i poboljšava njegova izvedba.
- Instalacija i kućište - mikrovalni rezonatori obično se postavljaju u metalna ili dielektrična kućišta kako bi ih zaštitili od vanjskih smetnji i čimbenika okoline te osigurali njihov stabilan rad.

Specifične komponente i dizajn mikrovalnog rezonatora mogu značajno varirati ovisno o namjeravanoj primjeni, frekvencijskom rasponu i zahtjevima izvedbe. Inženjeri i istraživači odabiru ili dizajniraju rezonatore kako bi zadovoljili svoje specifične potrebe, uzimajući u obzir faktore kao što su rezonantna frekvencija, širina pojasa, Q faktor i mogućnosti upravljanja snagom. Na slici 3.2.1. u nastavku prikazan je primjer mikrovalnog rezonatora koji posjeduje dva prstena koji se dodiruju.



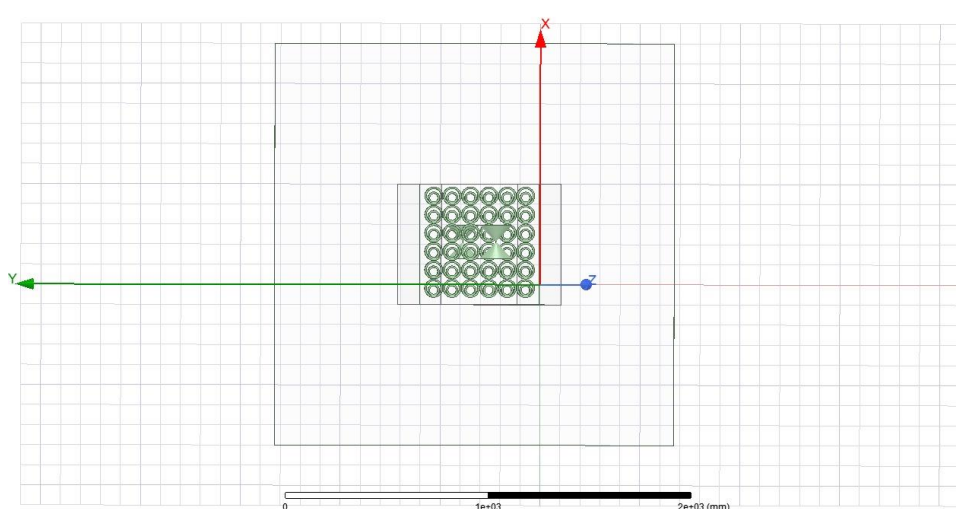
Slika 3.2.1. Mikrovalni rezonator s dva prstena radijus  $R_1$  i  $R_2$  te debljinom prstena  $SR$

Ovakva struktura elementarnog ekscentričnog rezonatora može se prikazati nadomjesnom električnom shemom LC paralelnog titrajnog kruga. Pri tome kondenzator je izveden kao pločasti kondenzator promjenjivog razmaka ploča ( udaljenost prstenova ) što utječe na širokopojasnost rada ovog rezonatora dok je induktivitet konstantan. Promjena dimenzija unutarnjeg prstena (kao i vanjskog) utjecala bi na vrijednost kondenzatora pa tako i cjelokupnog rezonatora čime bi se mijenjala rezonantna frekvencija (odnosno više njih).

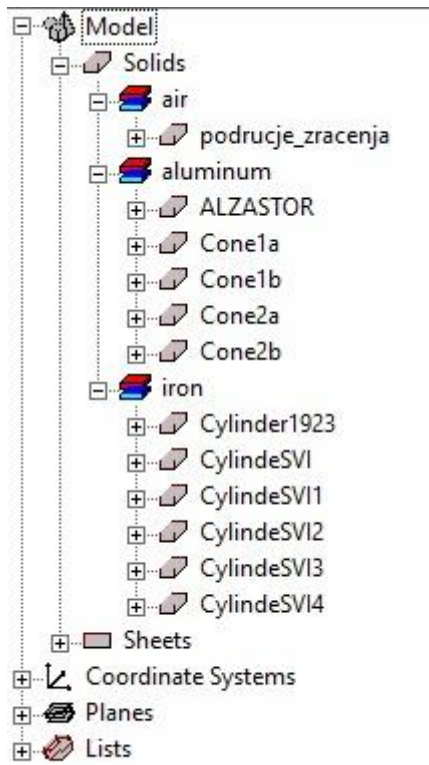


Slika 3.2.2. Simulacijski model sa dvije antene (konusni dipoli) i rezonatorske mreže od 36 ekscentričnih rezonatora (tlocrt).

Na prethodno prikazanoj slici 3.2.2. prikazan je model simulacije u HFSS-u. Dok se na slici 3.2.3. u nastavku prikazan isti model simulacije iz drugog kuta.

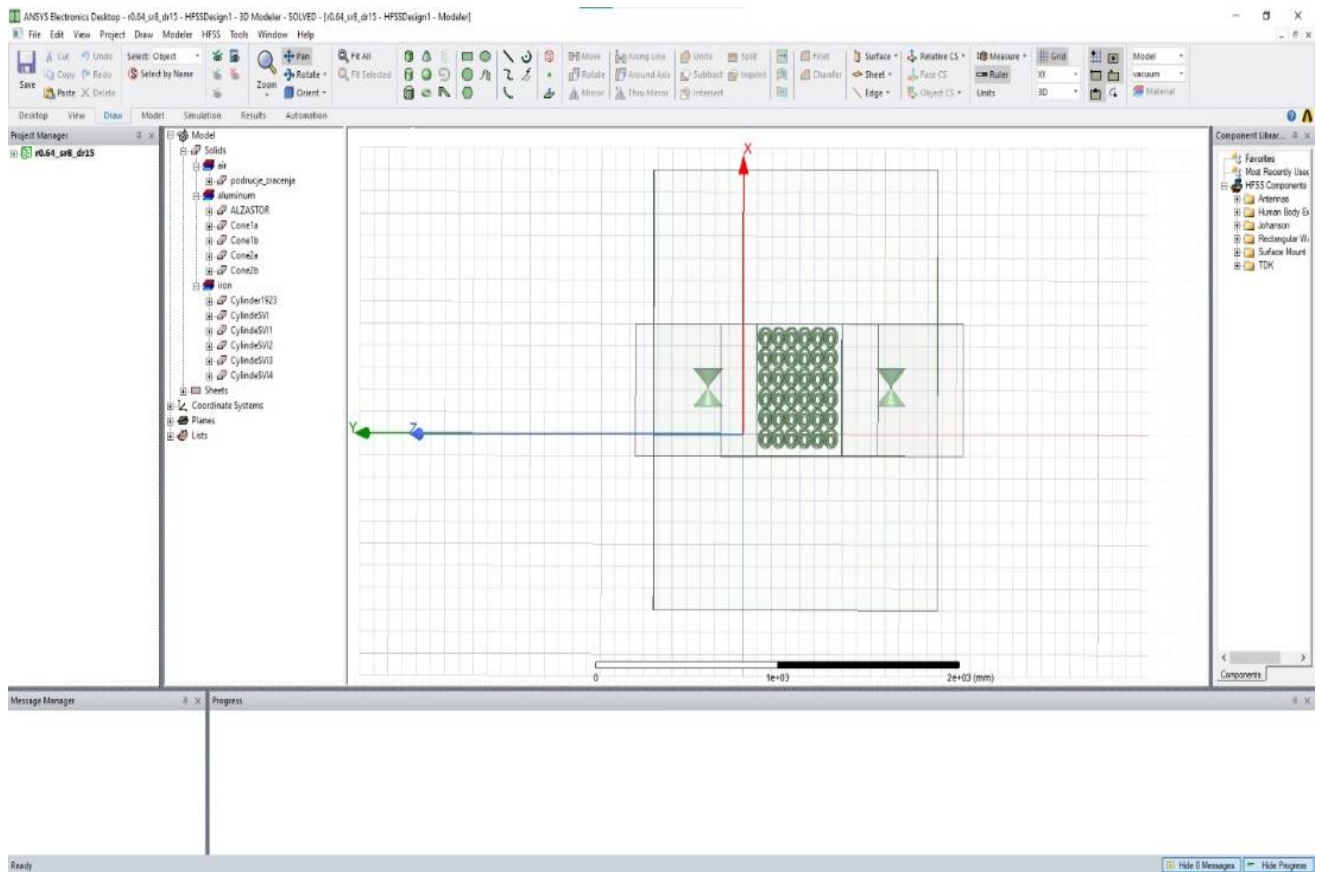


Slika 3.2.3. Na slici 3.2.1. u nastavku prikazan je primjer mikrovalnog rezonatora koji posjeduje dva prstena koji se dodiruju (bokocrt).



Slika 3.2.4. Prikaz svih materijala koje sadrži model.

Na slici 3.2.4. prikazani su svi materijali koji su sadržani u modelu, dok slika 3.2.5. prikazuje model u ANSYS-u.

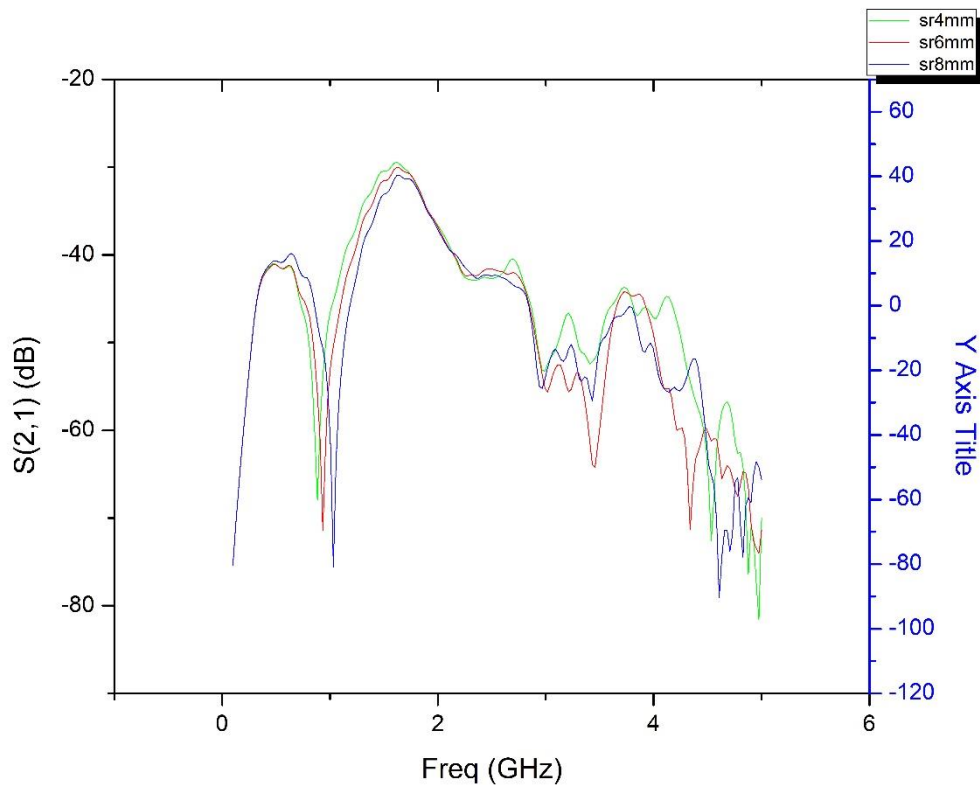


Slika 3.2.5. Model prikazan u HFSS-u.



## 4. SIMULACIJA I REZULTATI

U nastavku su prikazani rezultati simulacije mikrovalnih rezonatora te detaljna analiza dobivenih rezultata simulacije.



Slika 4.1. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije  $S_{21}$  za slučaj rezonatora za koji vrijedi:  $R_2 = 0.33R_1$  ( $R_1$  – radijus vanjskog prstena);  $R_2$  – radijus unutarnjeg prstena;  $sr$  – debljina prstena).

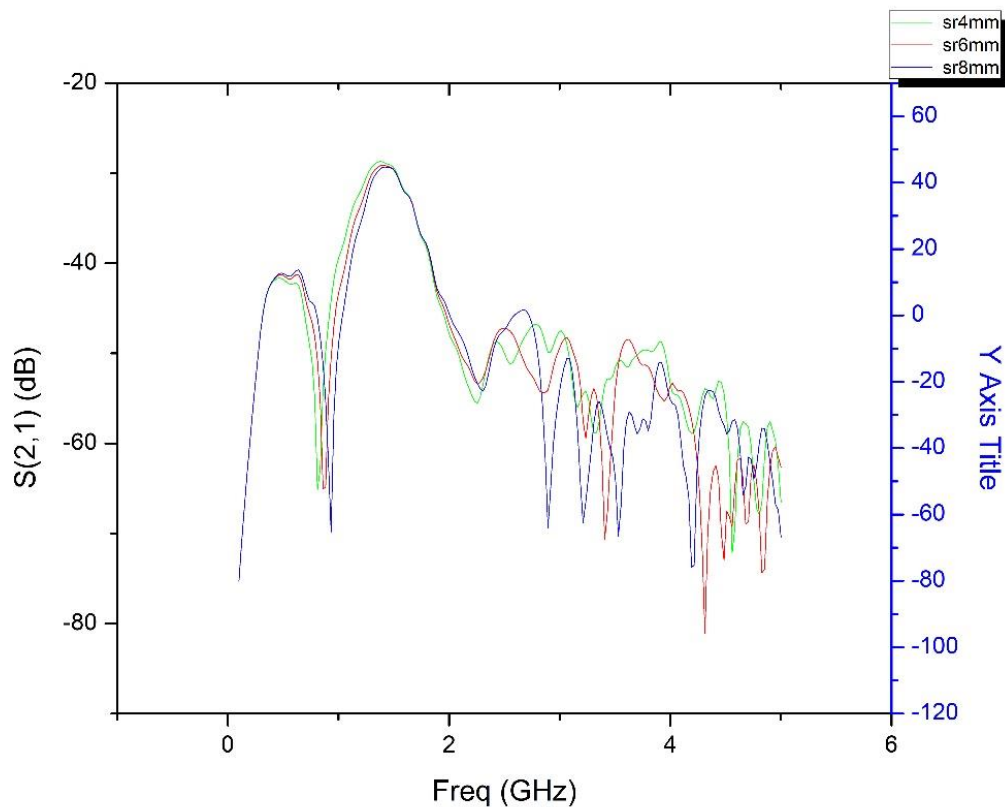
Slika 4.1. prikazuje analizu transmisije ( $S_{21}$ ) signala kroz različite širine rezonatora, označene kao SR4mm, SR6mm i SR8mm, na različitim frekvencijama. Analiza je provedena u definiranom frekvencijskom opsegu od 100MHz do 5 GHz, a vrijednosti parametra transmisije iskazane su u decibelima (dB). Širine rezonatora su međusobno povezane, pri čemu je veličina unutarnjeg prstena jednaka 33% veličine vanjskog prstena.

Na slici 4.1. mogu se primijetiti sljedeće značajne razlike:

- Frekvencija: 0.1 GHz

- SR4mm: -75.43287 dB
- SR6mm: -75.40822 dB
- SR8mm: -75.35062 dB
  
- Frekvencija: 0.5 GHz
- SR4mm: -41.52402 dB
- SR6mm: -41.40956 dB
- SR8mm: -40.52204 dB
  
- Frekvencija: 1.0 GHz
- SR4mm: -46.31219 dB
- SR6mm: -52.48706 dB
- SR8mm: -75.5862 dB
  
- Frekvencija: 2.0 GHz
- SR4mm: -38.51494 dB
- SR6mm: -41.36955 dB
- SR8mm: -46.11639 dB
  
- Frekvencija: 3.0 GHz
- SR4mm: -59.78629 dB
- SR6mm: -61.42969 dB
- SR8mm: -62.63623 dB

Ovi rezultati jasno pokazuju kako se transmisija signala mijenja s različitim širinama rezonatora i frekvencijama. Također je vidljivo kako je veličina manjeg prstena proporcionalna veličini većeg prstena, što dodatno utječe na transmisiju. Na primjer, na frekvenciji od 1.0 GHz, vidimo značajnu razliku između rezonatora SR4mm i SR8mm, gdje SR4mm pruža bolju transmisiju od SR8mm. Ova analiza pomaže u razumijevanju kako se veličina rezonatora i njihov omjer odražavaju na performanse sustava pri različitim radnim frekvencijama.



Slika 4.2. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije  $S_{21}$  za slučaj rezonatora za koji vrijedi:  $R_2 = 0.50R_1$  ( $R_1$  – radijus vanjskog prstena);  $R_2$  – radijus unutarnjeg prstena;  $sr$  – debljina prstena).

Na slici 4.2. analizira se transmisija signala (označeno kao  $S_{21}$ ) kroz različite rezonatore na različitim frekvencijama. Prstenovi imaju različite širine: SR4mm, SR6mm i SR8mm, pri čemu je veličina manjeg prstena 50% veličine većeg prstena. Transmisija je izražena u decibelima (dB), a frekvencije su navedene u GHz.

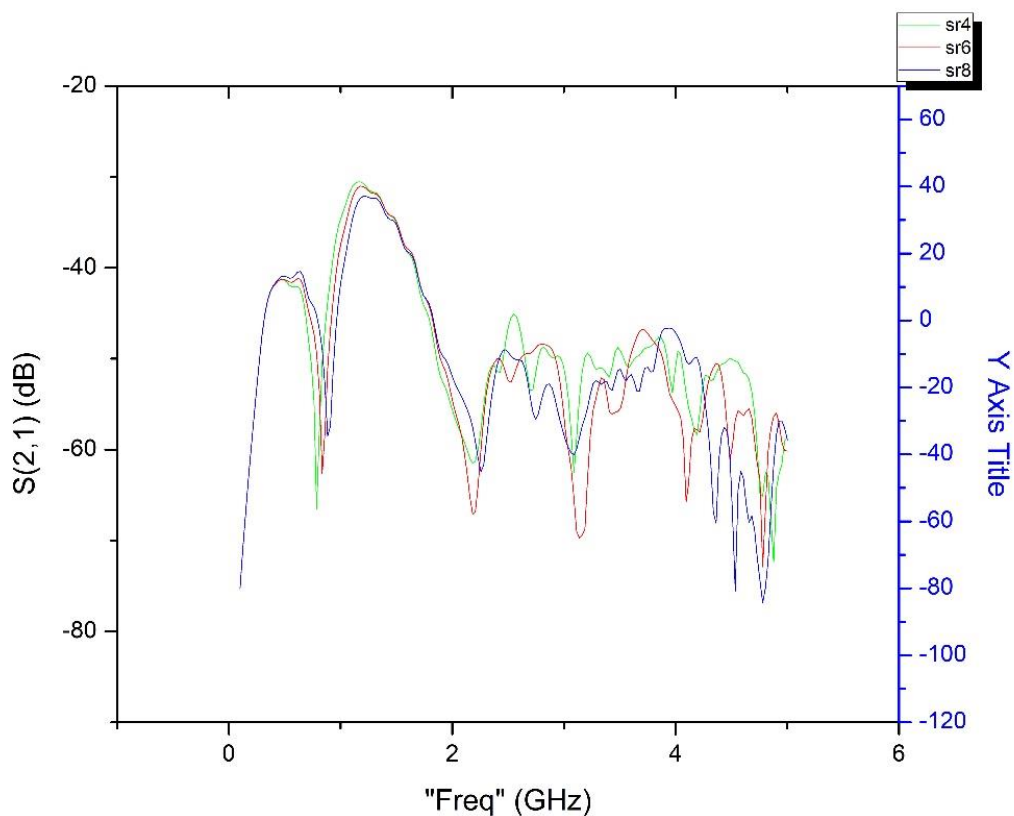
Analiza transmisije kroz različite širine i veličine prstena - grafički prikaz transmisije signala kroz različite rezonatore jasno pokazuje značajne varijacije u ovom sustavu, ovisno o frekvenciji i širini prstena.

Razlike u transmisiji na različitim frekvencijama:

- Frekvencija: 0.1 GHz
  - SR4mm: -75.3091 dB
  - SR6mm: -75.32418 dB
  - SR8mm: -75.27333 dB
  
- Frekvencija: 0.5 GHz
  - SR4mm: -47.63169 dB
  - SR6mm: -47.64721 dB
  - SR8mm: -47.59875 dB
  
- Frekvencija: 1.0 GHz
  - SR4mm: -38.38738 dB
  - SR6mm: -41.82634 dB
  - SR8mm: -46.21092 dB
  
- Frekvencija: 2.0 GHz
  - SR4mm: -30.43989 dB
  - SR6mm: -31.68155 dB
  - SR8mm: -33.14356 dB

- Frekvencija: 3.0 GHz
- SR4mm: -47.04212 dB
- SR6mm: -52.02495 dB
- SR8mm: -46.57445 dB

Moguće je primijetiti da se transmisija značajno mijenja s frekvencijom, a također i ovisno o širini prstena. Na primjer, na frekvenciji od 1.0 GHz, vidi se značajna razlika između rezonatora SR4mm i SR8mm, gdje SR4mm pruža bolju transmisiju od SR8mm. Ovi rezultati ukazuju na kompleksne interakcije između širine i veličine prstena te frekvencije signala, što je ključno za razumijevanje performansi ovog sustava.

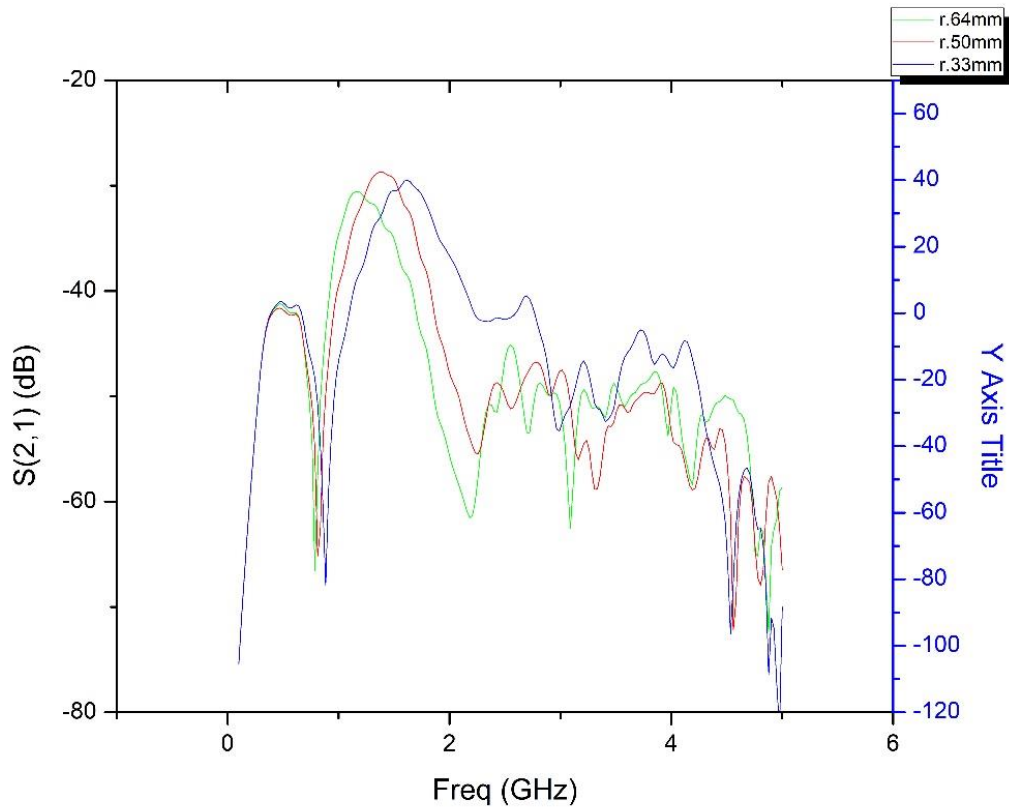


Slika 4.3. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije  $S_{21}$  za slučaj rezonatora za koji vrijedi:  $R_2 = 0.64R_1$  ( $R_1$  – radijus vanjskog prstena);  $R_2$  – radijus unutarnjeg prstena;  $sr$  – debljina prstena).

Analiza transmisije kroz različite širine i veličine prstena – na slici 4.3. prikazane su analize transmisije signala, širina manjeg prstena (označena kao "sr") iznosi 64% širine većeg prstena (označena kao "r"). Navedeni su rezultati transmisije signala (označeni kao S(2,1)) kroz različite rezonatore (sr4mm, sr6mm i sr8mm) na različitim frekvencijama izraženim u GHz, pri čemu su transmisije izražene u dB. U nastavku su objašnjena ključna zapažanja:

- Razlike u transmisiji na različitim frekvencijama - na različitim frekvencijama, transmisija se mijenja značajno. Pri frekvenciji od 0.1 GHz, transmisija za sr4mm iznosi -75.31003 dB, za sr6mm -75.30519 dB, a za sr8mm -75.26793 dB.
- Utjecaj promjene širine prstena - promjena širine prstena (sr) u odnosu na veći prsten (r) također utječe na transmisiju. Razlike između sr4mm, sr6mm i sr8mm su vidljive, a kako se mijenja frekvencija, mijenjaju se i razlike u transmisiji između ovih širina prstena.

Ovi podaci naglašavaju kompleksnost utjecaja širine prstena i njihovog omjera na performanse sustava pri različitim radnim frekvencijama.



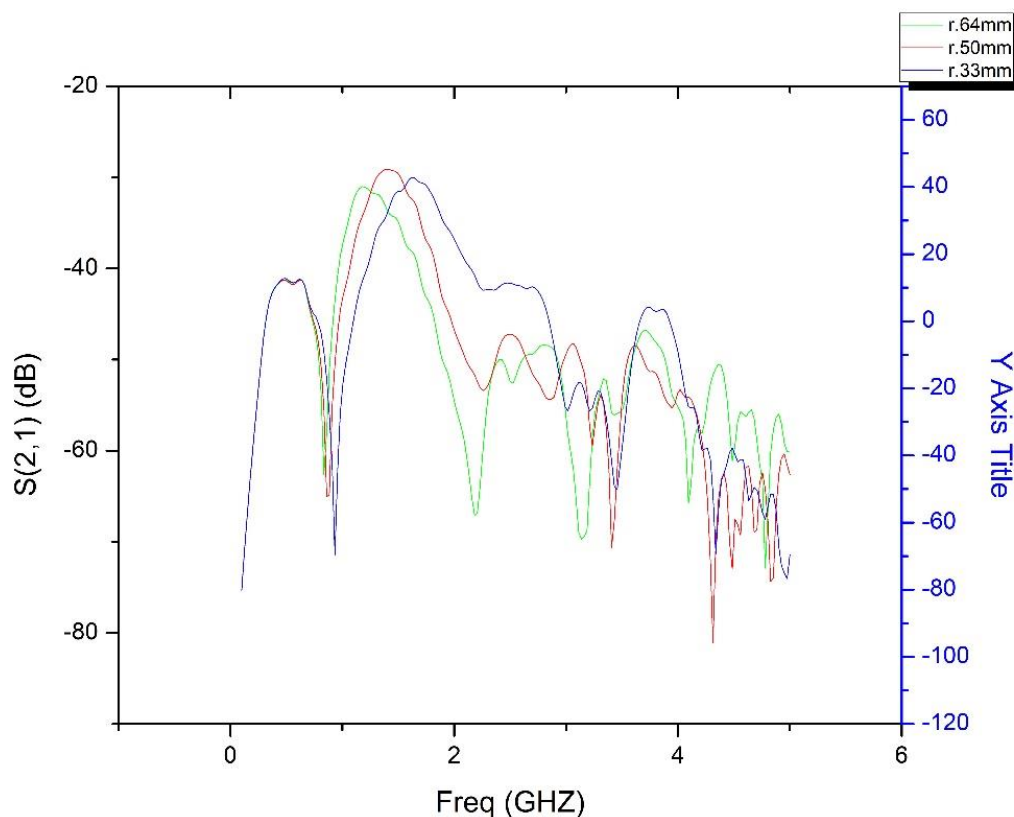
Slika 4.4. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije  $S_{21}$  za slučaj rezonatora za koji da je širina prstena 4mm.

Prema slici 4.4. povećanjem radijusa unutarnjeg prstena R2 u mreži od 36 ekscentričnih kružnih rezonatora i širinom 4mm mogu se primijetiti sljedeće promjene u frekvenciji prve rezonancije (prvog minimuma  $S_{21}$  parametra) i nivoima  $S_{21}$ :

- Frekvencija prve rezonancije:
  - Za R2 od 33 mm: 1 GHz
  - Za R2 od 50 mm: 0.98 GHz
  - Za R2 od 64 mm: 0.93 GHz
  
- Nivo  $S_{21}$  u točki prvog minimuma:
  - Za R2 od 33 mm: -70 dB

- Za R2 od 50 mm: -70 dB (sličan nivou)
- Za R2 od 64 mm: -60 dB (veći nivo)

Osim toga, može se primijetiti pojava dodatna dva minimuma parametra transmisije  $S_{21}$  za R2 od 64 mm na frekvencijama od 2.2 GHz i 3.2 GHz s vrlo niskim nivoima od -65 dB i -70 dB. Zaključno, povećanjem radijusa unutarnjeg prstena R2 u ekscentričnim kružnim rezonatorima mreže od 36 rezonatora dolazi do smanjenja frekvencije prve rezonancije i povećanja nivoa  $S_{21}$  u toj točki. Osim toga, pojavljuju se dodatna dva minimuma parametra transmisije  $S_{21}$  na nižim frekvencijama. Za frekvencije ispod 3.5 GHz, povećanjem radijusa R2 dolazi do smanjenja transmisije EM vala kroz mrežu ekscentričnih kružnih rezonatora.



Slika 4.5. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije  $S_{21}$  za slučaj rezonatora za koji da je širina prstena 6mm.



Na slici 4.5. prikazana je analiza promjena u frekvenciji i nivoima S21 parametra za različite vrijednosti radijusa unutarnjeg prstena (R2) u mreži od 36 ekscentričnih kružnih rezonatora, te su dobiveni sljedeći zaključci:

Frekvencija prve rezonancije:

- Za R2 od 33 mm: 1 GHz
- Za R2 od 50 mm: 0.98 GHz
- Za R2 od 64 mm: 0.93 GHz

Ovi rezultati pokazuju da povećanje radijusa unutarnjeg prstena R2 dovodi do smanjenja frekvencije prve rezonancije. To znači da se rezonantna frekvencija pomaknula prema nižim vrijednostima kako je R2 postajao veći.

Nivo S21 u točki prvog minimuma:

- Za R2 od 33 mm: -70 dB
- Za R2 od 50 mm: -70 dB (sličan nivou)
- Za R2 od 64 mm: -60 dB (veći nivo)

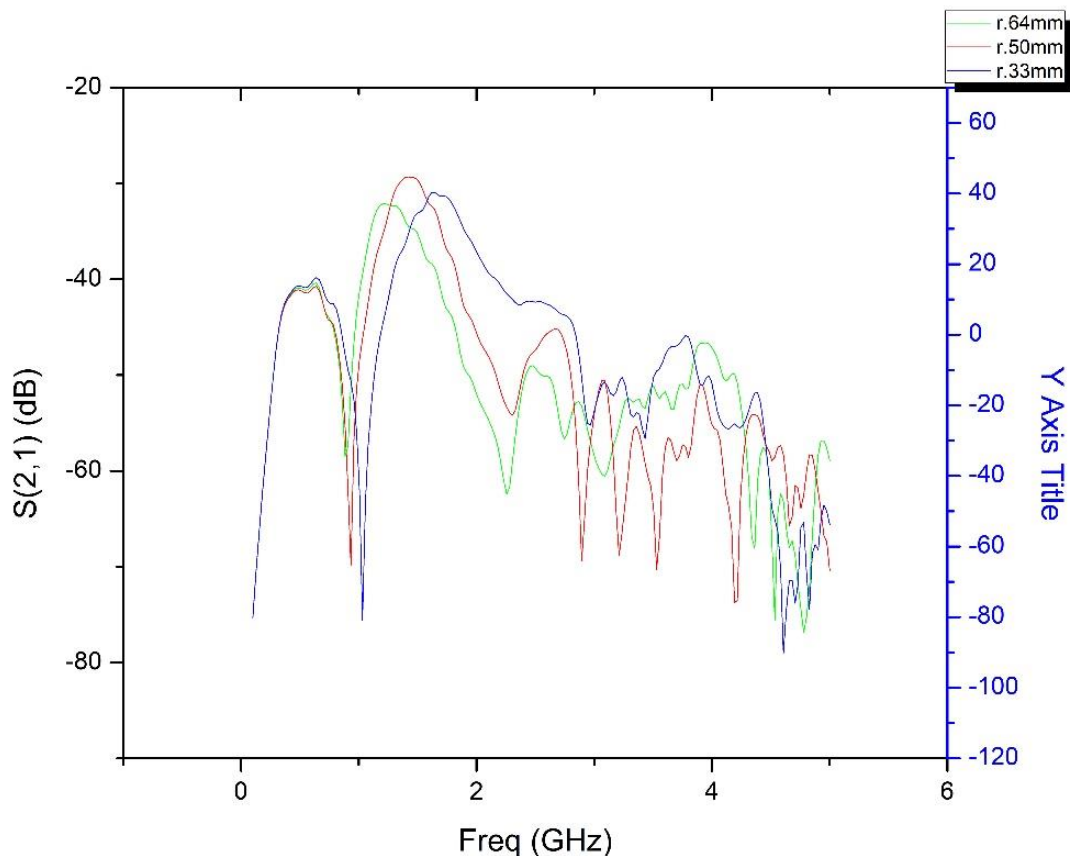
Uočava se da nivo S21 u točki prvog minimuma ostaje relativno stabilan za R2 vrijednosti od 33 mm i 50 mm, dok za R2 od 64 mm dolazi do povećanja nivoa S21. To sugerira da se povećanjem radijusa R2 povećava transmisija EM valova kroz mrežu ekscentričnih kružnih rezonatora u točki prvog minimuma.

Dodatni minimumi parametra transmisije S21 za R2 od 64 mm:

- Na frekvenciji od 2.2 GHz: -65 dB
- Na frekvenciji od 3.2 GHz: -70 dB

Također se primjećuju dva dodatna minimuma parametra transmisije S21 za R2 od 64 mm na nižim frekvencijama. Ovi minimumi ukazuju na dodatne rezonance u sustavu koje se pojavljuju s povećanjem radijusa R2. Povećanjem radijusa unutarnjeg prstena R2 u ekscentričnim kružnim

rezonatorima mreže od 36 rezonatora dolazi do smanjenja frekvencije prve rezonancije i povećanja nivoa  $S_{21}$  u toj točki. Osim toga, pojavljuju se dodatna dva minimuma parametra transmisije  $S_{21}$  na nižim frekvencijama. Za frekvencije ispod 3.5 GHz, povećanjem radijusa  $R_2$  dolazi do smanjenja transmisije EM vala kroz mrežu ekscentričnih kružnih rezonatora. Ovo može imati značajne posljedice na dizajn i funkcionalnost sustava.



Slika 4.6. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije  $S_{21}$  za slučaj rezonatora za koji da je širina prstena 8mm.

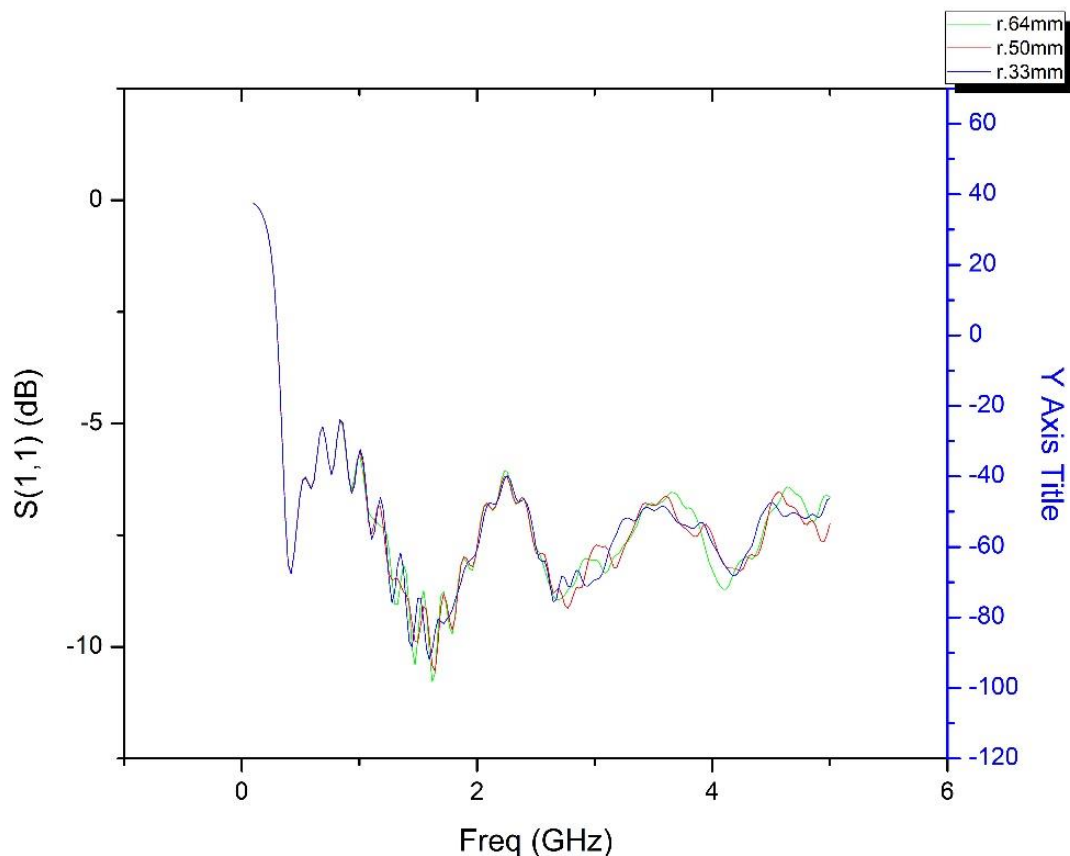
Povećanjem radijusa unutarnjeg prstena  $R_2$  u mreži od 36 ekscentričnih kružnih rezonatora, primijećene su značajne promjene u svojstvima mreže, što je prikazano na slici 4.6. Analizirajući dobivene podatke, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Frekvencija prve rezonancije (prvog minimuma  $S_{21}$  parametra) - s povećanjem radijusa  $R_2$ , frekvencija prve rezonancije značajno se smanjuje. Konkretno, za  $R_2$  vrijednost od 33 mm, frekvencija prve rezonancije iznosi 1 GHz, dok se za  $R_2$  vrijednost od 64 mm

smanjuje na 0,93 GHz. Ovo ukazuje na to da povećanje radijusa R2 dovodi do spuštanja rezonantne frekvencije.

- Nivo S21 u točki prvog minimuma - promatrajući nivo S21 u točki prvog minimuma, primjećujemo da se s povećanjem radijusa R2 taj nivo povećava. Za R2 vrijednost od 33 mm, nivo S21 iznosi -70 dB, dok za R2 vrijednost od 64 mm raste na -60 dB. Ovo ukazuje na bolje svojstvo mreže pri većim vrijednostima radijusa R2, gdje je manji gubitak transmisije.
- Dodatni minimumi parametra transmisije S21 - za R2 vrijednost od 64 mm primjećuju se dodatna dva minimuma parametra transmisije S21 na frekvencijama od 2,2 i 3,2 GHz. Ovi minimumi imaju vrlo niske razine, -65 dB i -70 dB, što sugerira da dolazi do značajnih oscilacija u transmisiji EM vala kroz mrežu ekscentričnih kružnih rezonatora pri ovim frekvencijama.

Može se zaključiti da povećanjem radijusa R2 dolazi do značajnih promjena u svojstvima mreže ekscentričnih kružnih rezonatora. Frekvencija prve rezonancije se smanjuje, nivo S21 u točki prvog minimuma se povećava, a pojavljuju se dodatna dva minimuma parametra transmisije S21 na nižim frekvencijama. Ovi rezultati sugeriraju da za frekvencije ispod 3,5 GHz povećanje radijusa R2 dovodi do smanjenja transmisije EM vala kroz mrežu ekscentričnih kružnih rezonatora, što može biti od interesa za različite primjene u elektromagnetskoj tehnici i komunikacijskim sustavima.



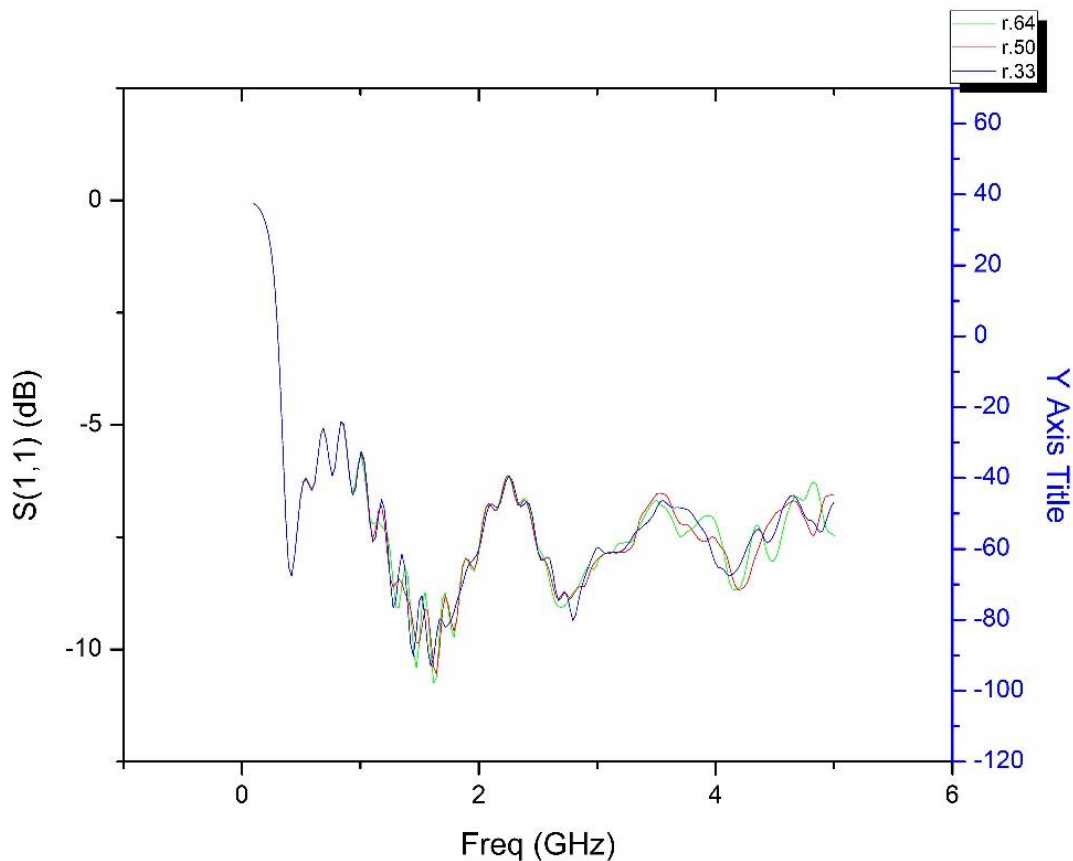
Slika 4.7. Simulacijski rezultati koeficijenta refleksije  $S_{11}$  za slučaj rezonatora za koji da je širina prstena 4mm.

Iz analize podataka koji su prikazani na slici 4.7. može se primijetiti da se veće razlike u rezultatima javljaju na višim frekvencijama, posebno iznad 2 GHz. Razlike među referencama "r.64," "r.50," i "r.33" postaju značajnije kako frekvencija raste. To sugerira da se svojstva sustava ili materijala koje analiziramo znatno mijenjaju na višim frekvencijama.

Ove razlike na višim frekvencijama mogu ukazivati na rezonantne učinke ili druge složene fenomene koji se događaju u tom rasponu frekvencija. Ovo bi moglo biti od interesa za daljnje istraživanje i analizu kako bi se bolje razumjeli ti specifični učinci i kako bi se optimizirala upotreba materijala ili uređaja u tom frekvencijskom rasponu.

Također, identificirani su minimumi u grafu, pri čemu se prvi minimum nalazi na otprilike 0.198 GHz, a drugi minimum na otprilike 1.13 GHz. Ovi minimumi ukazuju na određene frekvencije na kojima se javljaju određeni efekti ili svojstva materijala. Minimumi u podacima često signaliziraju točke gdje se događaju posebni fenomeni ili gdje se svojstva materijala mijenjaju.

Uz to, vrijednosti minimuma između različitih referenci također variraju. Prvi minimum za "r.64" je otprilike -0.49252 dB, dok je za "r.50" otprilike -0.49332 dB, i za "r.33" otprilike -0.48501 dB. Ove razlike, iako male, također sugeriraju da različite reference daju različite rezultate, što može biti važno za preciznu karakterizaciju svojstava materijala ili sustava.



Slika 4.8. Simulacijski rezultati koeficijenta refleksije  $S_{11}$  za slučaj rezonatora za koji je širina prstena 6mm.

Analiza podataka prikazanih na slici 4.8. daje uvid u svojstva materijala ili sustava koji su ispitivani pri različitim frekvencijama u rasponu od 0.1 GHz do 5 GHz, koristeći tri različite reference označene kao "r.64," "r.50," i "r.33". Debljina vanjskog i unutarnjeg prstena iznosi 6 mm.

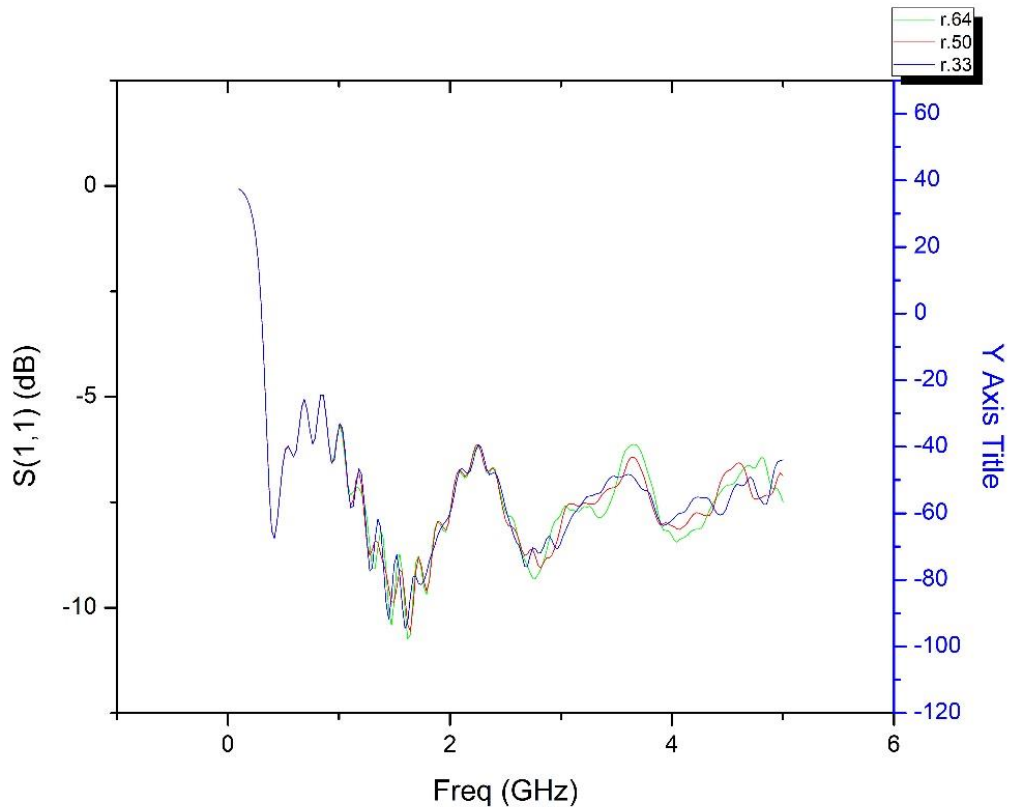
Na slici 4.8. primjećuje se da s porastom frekvencije dolazi do smanjenja vrijednosti parametra  $S(1,1)$  izraženog u dB jedinicama za sve tri reference. Ovaj trend ukazuje na to da postoji gubitak signala ili smanjenje refleksije pri višim frekvencijama. To može biti posljedica različitih električnih svojstava materijala ili reflektivnih svojstava sustava pri različitim frekvencijama.

Također se primjećuju razlike između rezultata dobivenih s različitim referencama. Referenca "r.64" daje nešto više vrijednosti parametra  $S(1,1)$  u usporedbi s referencama "r.50" i "r.33" na većem dijelu frekvencijskog spektra. Ovo sugerira da izbor reference može značajno utjecati na rezultate mjerenja i da je važno odabrati odgovarajuću referencu ovisno o konkretnim zahtjevima mjerenja.

Nadalje, na slici 4.8. se mogu identificirati minimumi, tj. frekvencije na kojima dolazi do lokalnih maksimuma u vrijednostima parametra  $S(1,1)$ . Prvi minimum nalazi se na otprilike 0.198 GHz, dok drugi minimum dolazi na otprilike 1.13 GHz. Ovi minimumi ukazuju na specifične frekvencije na kojima se događaju posebni fenomeni ili gdje se svojstva materijala mijenjaju. Ove frekvencije mogu biti od interesa za daljnje istraživanje i karakterizaciju materijala.

Važno je napomenuti da se veće razlike između rezultata s različitim referencama počinju pojavljivati na frekvencijama iznad 2 GHz, što sugerira da se svojstva materijala ili sustava značajno mijenjaju u tom visokofrekventnom rasponu.

Ova analiza pruža uvid u frekvencijske karakteristike materijala ili sustava te ističe važnost odabira odgovarajuće reference pri mjerenju i karakterizaciji elektromagnetskih svojstava.



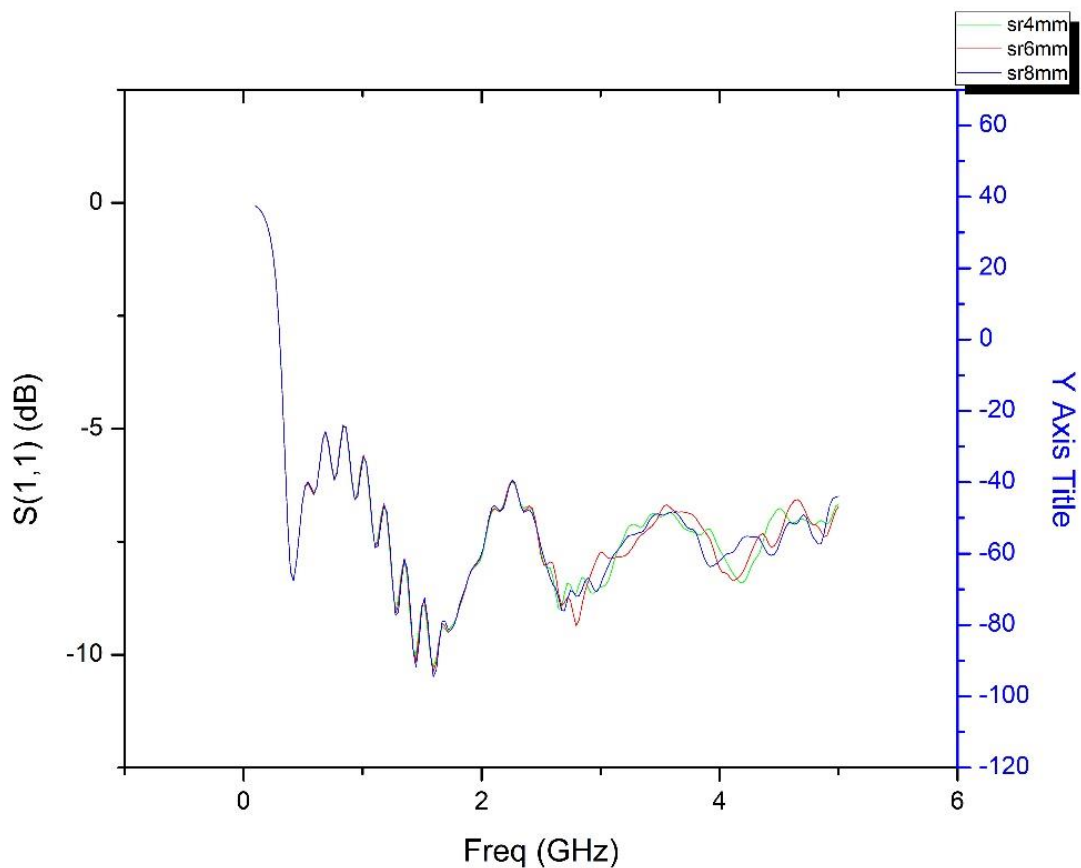
Slika 4.9. Simulacijski rezultati koeficijenta refleksije  $S_{11}$  za slučaj rezonatora za koji da je širina prstena 8mm.

Analiza podataka prikazanih na slici 4.9. pruža uvid u svojstva materijala ili sustava koji su ispitivani na različitim frekvencijama u rasponu od 0.1 GHz do 5 GHz. Debljina vanjskog i unutarnjeg prstena iznosi 8 mm. Ova analiza se fokusira na parametar  $S(1,1)$ , izražen u dB jedinicama.

- Utvrđivanje trendova s porastom frekvencije - na slici 4.9. se jasno vidi da vrijednosti parametra  $S(1,1)$  opadaju s porastom frekvencije za sve tri reference ("r.64," "r.50," i "r.33"). Ovaj trend ukazuje na to da postoji gubitak signala ili smanjenje refleksije pri višim frekvencijama. To može biti rezultat apsorpcije ili disperzije elektromagnetskog zračenja unutar materijala ili sustava.
- Usporedba rezultata između različitih referenci - primjećuje se da različite reference ("r.64," "r.50," i "r.33") daju različite vrijednosti parametra  $S(1,1)$  pri istim frekvencijama. Na primjer, referenca "r.64" često daje više vrijednosti od drugih referenci. Ovo ukazuje na to da izbor reference može značajno utjecati na rezultate

mjerenja. Stoga je važno pažljivo odabrati referencu ovisno o konkretnim zahtjevima eksperimenta.

- Identifikacija minimuma i promjena u svojstvima materijala ili sustava - na slici 4.9. se pojavljuju minimumi u vrijednostima parametra  $S(1,1)$  na određenim frekvencijama. Prvi minimum nalazi se na otprilike 0.198 GHz, dok drugi minimum dolazi na otprilike 1.13 GHz. Ovi minimumi ukazuju na specifične frekvencije na kojima se događaju posebni fenomeni ili gdje se svojstva materijala ili sustava mijenjaju. To može biti posljedica rezonanci ili drugih elektromagnetskih interakcija unutar materijala.
- Promjene na visokim frekvencijama - veće razlike između rezultata s različitim referencama počinju se pojavljivati na frekvencijama iznad 2 GHz, što sugerira da se svojstva materijala ili sustava značajno mijenjaju u visokofrekventnom rasponu.

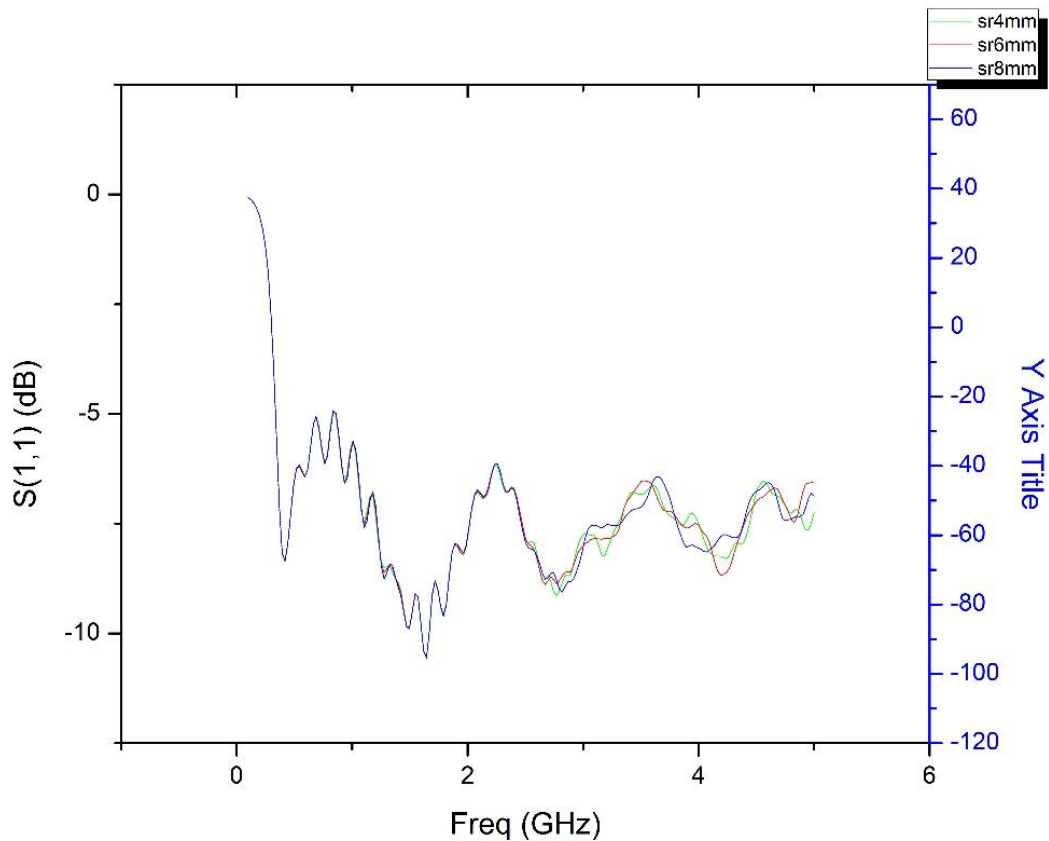


Slika 4.10. Simulacijski rezultati koeficijenta refleksije  $S_{11}$  za slučaj rezonatora za koji vrijedi:  $R_2 = 0.33R_1$  ( $R_1$  – radijus vanjskog prstena);  $R_2$  – radijus unutarnjeg prstena; sr – debljina prstena).



Analiza podataka prikazanih na slici 4.10. daje uvid u promjene u parametru  $S(1,1)$  pri različitim frekvencijama, koristeći tri različite širine prstenova ("sr4mm," "sr6mm," i "sr8mm"). Radijus malog prstena 33% radijusa velikog prstena. U nastavku je prikazana analiza rezultata:

- Utvrđivanje trendova s porastom frekvencije - na slici 4.10. može se primijetiti da, unutar svake širine prstena, vrijednosti parametra  $S(1,1)$  opadaju s povećanjem frekvencije. Ovaj trend ukazuje na to da dolazi do gubitka signala ili smanjenja refleksije pri višim frekvencijama za sve tri širine prstena. Ova pojava može biti posljedica različitih elektromagnetskih interakcija unutar prstena.
- Usporedba različitih širina prstena - može se primijetiti da se vrijednosti parametra  $S(1,1)$  razlikuju ovisno o širini prstena. Na primjer, za frekvenciju od 0.1 GHz, "sr4mm" ima najmanju vrijednost, dok "sr8mm" ima najveću. Ovo ukazuje na to da širina prstena također ima utjecaj na elektromagnetska svojstva.
- Utjecaj promjene radijusa malog prstena - naglašeno je da je radijus malog prstena 33% radijusa velikog prstena. Ovaj odnos radijusa može utjecati na rezultate. Može se primijetiti da parametar  $S(1,1)$  nije jednak za različite širine prstena, što ukazuje na kompleksne elektromagnetske interakcije unutar prstena, koje se mijenjaju ovisno o promjeni radijusa.
- Minimumi i promjene u svojstvima materijala ili sustava - slici 4.10 također pokazuje prisutnost minimuma u vrijednostima parametra  $S(1,1)$  na određenim frekvencijama. Ovi minimumi ukazuju na specifične frekvencije na kojima se događaju posebni fenomeni ili gdje se svojstva materijala mijenjaju.



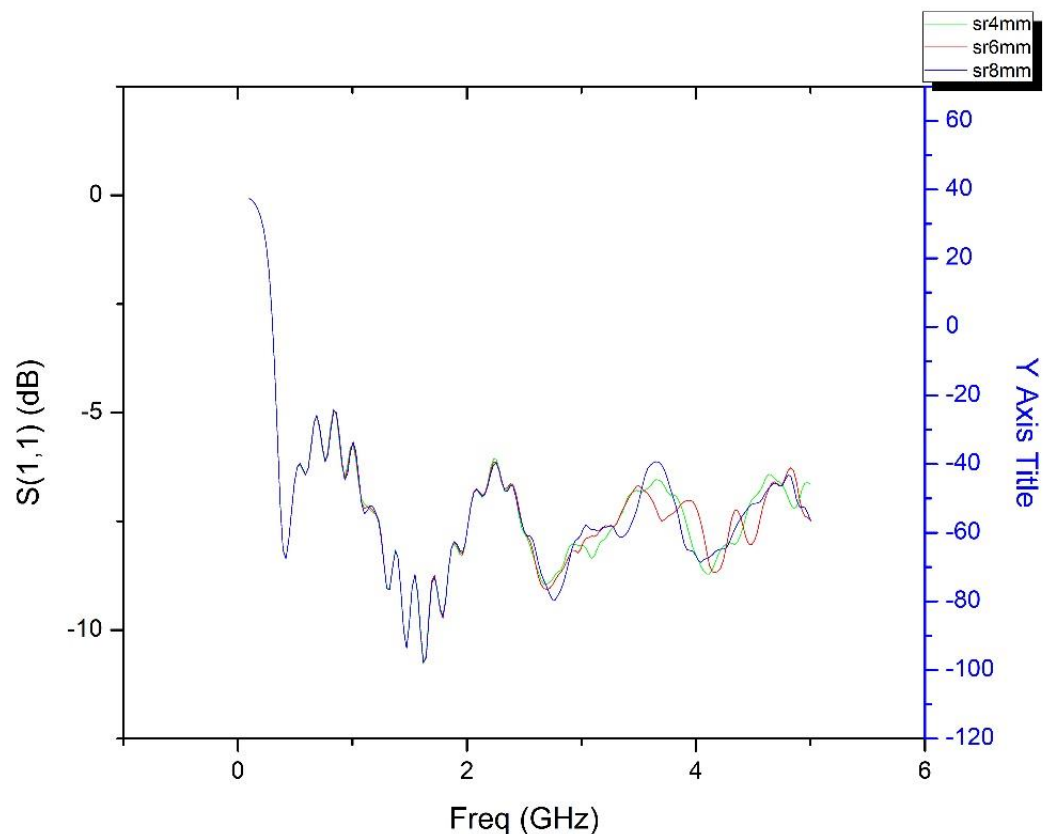
Slika 4.11. Simulacijski rezultati koeficijenta refleksije  $S_{11}$  za slučaj rezonatora za koji vrijedi:  $R_2 = 0.50R_1$  ( $R_1$  – radijus vanjskog prstena);  $R_2$  – radijus unutarnjeg prstena;  $sr$  – debljina prstena).

Analiza podataka prikazanih na slici 4.11. pruža uvid u promjene u parametru  $S(1,1)$  pri različitim frekvencijama i za tri različite širine prstenova ( $sr4mm$ ,  $sr6mm$  i  $sr8mm$ ), uz napomenu da je radijus malog prstena 50% radijusa velikog prstena. U nastavku se analiziraju rezultati:

- Utvrđivanje trendova s porastom frekvencije – na slici 4.11. se jasno vidi da, unutar svake širine prstena, vrijednosti parametra  $S(1,1)$  opadaju s povećanjem frekvencije. Ovaj trend ukazuje na to da dolazi do gubitka signala ili smanjenja refleksije pri višim frekvencijama za sve tri širine prstena. Ova pojava može biti posljedica različitih elektromagnetskih interakcija unutar prstena.
- Usporedba različitih širina prstena - vidljivo je da se vrijednosti parametra  $S(1,1)$  razlikuju ovisno o širini prstena. Na primjer, za frekvenciju od 0.1 GHz, "sr4mm" ima

najmanju vrijednost, dok "sr8mm" ima najveću. Ovo ukazuje na to da širina prstena također ima utjecaj na elektromagnetska svojstva.

- Utjecaj promjene radijusa malog prstena - naglašeno je da je radijus malog prstena 50% radijusa velikog prstena. Ovaj odnos radijusa također utječe na rezultate. Vidljivo je da parametar  $S(1,1)$  nije jednak za različite širine prstena, što ukazuje na kompleksne elektromagnetske interakcije unutar prstena, koje se mijenjaju ovisno o promjeni radijusa.
- Minimumi i promjene u svojstvima materijala ili sustava – slika 4.11. također pokazuje prisutnost minimuma u vrijednostima parametra  $S(1,1)$  na određenim frekvencijama. Ovi minimumi ukazuju na specifične frekvencije na kojima se događaju posebni fenomeni ili gdje se svojstva materijala mijenjaju.



Slika 4.12. Simulacijski rezultati koeficijenta refleksije  $S_{11}$  za slučaj rezonatora za koji vrijedi:  $R_2 = 0.64R_1$  ( $R_1$  – radijus vanjskog prstena);  $R_2$  – radijus unutarnjeg prstena; sr – debljina prstena).

Analiza podataka prikazanih u na slici 4.12. pruža uvid u promjene parametra  $S(1,1)$  pri različitim frekvencijama i za tri različite širine prstenova (sr4mm, sr6mm i sr8mm), pri čemu je radijus malog prstena 64% radijusa velikog prstena. U nastavku su analizirani rezultati:

- Utvrđivanje trendova s porastom frekvencije – na slici 4.12. se jasno vidi da unutar svake širine prstena, vrijednosti parametra  $S(1,1)$  opadaju s povećanjem frekvencije. Ovaj trend ukazuje na to da dolazi do gubitka signala ili smanjenja refleksije pri višim frekvencijama za sve tri širine prstena. Ova pojava može biti posljedica različitih elektromagnetskih interakcija unutar prstena.
- Usporedba različitih širina prstena - vidljivo je da se vrijednosti parametra  $S(1,1)$  razlikuju ovisno o širini prstena. Na primjer, za frekvenciju od 0.1 GHz, "sr4mm" ima najmanju vrijednost, dok "sr8mm" ima najveću. Ovo ukazuje na to da širina prstena također ima utjecaj na elektromagnetska svojstva.
- Utjecaj promjene radijusa malog prstena - naglašeno je da je radijus malog prstena 64% radijusa velikog prstena. Ovaj odnos radijusa također utječe na rezultate. Vidljivo je da parametar  $S(1,1)$  nije jednak za različite širine prstena, što ukazuje na kompleksne elektromagnetske interakcije unutar prstena, koje se mijenjaju ovisno o promjeni radijusa.
- Minimumi i promjene u svojstvima materijala ili sustava – slika 4.12. također pokazuje prisutnost minimuma u vrijednostima parametra  $S(1,1)$  na određenim frekvencijama. Ovi minimumi ukazuju na specifične frekvencije na kojima se događaju posebni fenomeni ili gdje se svojstva materijala mijenjaju.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu proveden je simulacijski izračun i analiza utjecaja dva ključna parametra strukture: radijusa unutarnjeg prstena te debljina prstena, ekscentričnog prstenastog mikrovalnog rezonatora sa 36 ekcentričnih cilindara (rezonatorska mreža) na parametre refleksije ( $S_{11}$ ) i transmisije ( $S_{21}$ ) u frekvencijskom rasponu od 100 MHz do 5 GHz. Simulacijski model izveden je sa dvije konusne dipol antene i rezonatorske mreže od 36 ekcentričnih prstenastih cilindara koja je smještena između antena i udaljena od svake 0.7 m.

Za simulaciju elektromagnetskih polja u visokofrekventnim područjima koristi se softverski program HFSS koji koristi metodu konačnih elementa kako bi se modelirala i analizirala željena struktura.

Za potrebe ovog završnog rada odrađene su simulacije te je prikazana detaljna analiza rezultata.

Analiza rezultata simulacije mikrovalnih rezonatora pružila je dubok uvid u promjene u elektromagnetskim svojstvima sustava pri različitim frekvencijama, širinama prstena i odnosima radijusa unutarnjeg i vanjskog prstena. U nastavku su ključne spoznaje stečene analizom:

1. Utjecaj širine prstena - širina prstena ima značajan utjecaj na transmisiju signala kroz rezonatore. Povećanje širine prstena često rezultira poboljšanjem transmisije, ali taj efekt varira s frekvencijom.
2. Utjecaj odnosa radijusa unutarnjeg i vanjskog prstena - odnos radijusa R2 (unutarnjeg prstena) i R1 (vanjskog prstena) također igra ključnu ulogu u svojstvima rezonatora. Povećanje R2 često dovodi do smanjenja rezonantne frekvencije i povećanja transmisije u određenim točkama.
3. Utjecaj frekvencije - transmisija signala značajno se mijenja s frekvencijom. Različite frekvencije rezultiraju različitim rezonancama i promjenama u elektromagnetskim svojstvima materijala ili sustava.
4. Izbor referentnih parametara - izbor referentnih parametara (npr., radijusa prstena ili odnosa radijusa) može znatno utjecati na rezultate mjerenja i karakterizacije materijala. Važno je pažljivo odabrati odgovarajuće reference ovisno o ciljevima eksperimenta.

5. Promjene na visokim frekvencijama - veće promjene u svojstvima materijala ili sustava često se javljaju na visokim frekvencijama iznad 2 GHz. Ovo ukazuje na potrebu za preciznijim pristupom karakterizaciji materijala ili dizajnu sustava u visokofrekventnom rasponu.

U konačnici, ova analiza naglašava kompleksnost elektromagnetskih interakcija unutar mikrovalnih rezonatora te njihovu osjetljivost na promjene u parametrima. Razumijevanje ovih interakcija ključno je za optimizaciju performansi sustava u različitim aplikacijama, uključujući elektromagnetsku tehniku i komunikacijske sustave.

Dodatno istraživanje na ovom području obuhvatiti će istraživanje utjecaja ostalih parametara ove rezonantne strukture ( radijus vanjskog prstena, udaljenost prstena, duljina prstena, broj unutarnjih prstenova i drugo) što će pomoći boljem razumijevanju utjecaja ovih parametara strukture rezonatora na propagaciju EM valova pri prolasku kroz njih.

## LITERATURA

- [1] Ansoft Corporation, HFSS: user's guide – High Frequency Structure Simulator. ANSOFT CORPORATION, Pittsburgh, PA, 2005. Dostupno na: <http://anlage.umd.edu/HFSSv10UserGuide.pdf>
- [2] ANSYS Inc., ANSYS Electronics Desktop: Scripting Guide. ANSYS, Inc. Canonsburg, 2015. Dostupno na: <http://www.ece.uprm.edu/~rafaelr/inel6068/HFSS/scripting.pdf>
- [3] R.E., Collin, Foundations for Microwave Engineering. Wiley-IEEE Press, 2001.
- [4] M., Steer, Microwave and RF design. NC State University, 2019.

## SAŽETAK

Zadatak ovog završnog rada jest provođenje simulacije te obrada rezultate odnosno analiza simulacije mikrovalnih rezonatora. Svrha rada jest prikazati promjene u elektromagnetskim svojstvima sustava pri raznim odnosima radijusa unutarnjeg i vanjskog prstena, zatim širine prstena te različitim frekvencijama. U teorijskom dijelu rada dana je teorijska podloga o sustavima poput HFSS te ANSYS-a. Također, objašnjen je sam pojam mikrovalnog rezonatora te njegovo modeliranje. Simulacijama je utvrđeno kako postoji utjecaj širine prstena, odnosno da postoji utjecaj na transmisiju signala kroz rezonatore. Također, utvrđen je utjecaj odnosa radijusa vanjskog i unutarnjeg prstena, utjecaj frekvencije te promjene na visokim frekvencijama. Analizom je utvrđena osjetljivost mikrovalnih rezonatora na promjene u parametrima. Analizirane interakcije od presudne su važnosti za optimizaciju performansi sustava.

**Ključne riječi:** frekvencija, HFSS, mikrovalni rezonator, radijus



## RESONATOR NETWORK OF M ECCENTRIC RING RESONATORS

### ABSTRACT

The task of this final thesis is to conduct a simulation and process the results, that is, analyze the simulation of microwave resonators. The purpose of the work is to show changes in the electromagnetic properties of the system at various ratios of the radius of the inner and outer ring, then the width of the ring and different frequencies. In the theoretical part of the paper, the theoretical basis of systems such as HFSS and ANSYS is given. Also, the very concept of a microwave resonator and its modeling is explained. Through simulations, it was determined that there is an influence of the width of the ring, that is, that there is an influence on the signal transmission through the resonators. Also, the influence of the ratio of the radius of the outer and inner ring, the influence of frequency and changes at high frequencies were determined. The analysis determined the sensitivity of microwave resonators to changes in parameters. Analyzed interactions are of crucial importance for system performance optimization.

**Key words:** frequency, HFSS, microwave resonator, radius

## **ŽIVOTOPIS**

Marko Štivičić je rođen 10. 09. 1998. godine u mjestu Požega, Hrvatska. Imena njegovih roditelja su Ivan i Antonelija. Pohađao je Osnovnu školu Dobriša Cesarić u Požegi. Već u osnovnoj školi dobiva interes za matematikom i informatikom stoga upisuje Matematičku gimnaziju u Požegi. Nakon srednje škole upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, smjer računarstvo. Posjeduje osnovno znanje programskih jezika C, C++, C#, osnovno znanje opisnog jezika HTML te razvoj android aplikacija u programskom jeziku Java.

# PRILOZI

## Popis slika

Slika 3.2.1. Mikrovalni rezonator s dva prstena radijus $R_1$ i $R_2$ te debljinom prstena $SR$ .....	7
Slika 3.2.2. Simulacijski model sa dvije antene (konusni dipoli) i rezonatorske mreže od 36 ekscentričnih rezonatora (tlocrt).....	8
Slika 3.2.3. Na slici 3.2.1. u nastavku prikazan je primjer mikrovalnog rezonatora koji posjeduje dva prstena koji se dodiruju (bokocrt).....	8
Slika 3.2.4. Prikaz svih materijala koje sadrži model. ....	9
Slika 3.2.5. Model prikazan u HFSS-u.....	10
Slika 4.1. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije $S_{21}$ za slučaj rezonatora za koji vrijedi: $R_2 = 0.33R_1$ ( $R_1$ – radijus vanjskog prstena); $R_2$ – radijus unutarnjeg prstena; $sr$ – debljina prstena). ....	11
Slika 4.2. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije $S_{21}$ za slučaj rezonatora za koji vrijedi: $R_2 = 0.50R_1$ ( $R_1$ – radijus vanjskog prstena); $R_2$ – radijus unutarnjeg prstena; $sr$ – debljina prstena). ....	13
Slika 4.3. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije $S_{21}$ za slučaj rezonatora za koji vrijedi: $R_2 = 0.64R_1$ ( $R_1$ – radijus vanjskog prstena); $R_2$ – radijus unutarnjeg prstena; $sr$ – debljina prstena). ....	15
Slika 4.4. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije $S_{21}$ za slučaj rezonatora za koji da je širina prstena 4mm. ....	17
Slika 4.5. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije $S_{21}$ za slučaj rezonatora za koji da je širina prstena 6mm. ....	18
Slika 4.6. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije $S_{21}$ za slučaj rezonatora za koji da je širina prstena 8mm. ....	20
Slika 4.7. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije $S_{11}$ za slučaj rezonatora za koji da je širina prstena 4mm. ....	22
Slika 4.8. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije $S_{11}$ za slučaj rezonatora za koji da je širina prstena 6mm. ....	23
Slika 4.9. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije $S_{21}$ za slučaj rezonatora za koji da je širina prstena 8mm. ....	25

Slika 4.10. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije  $S_{11}$  za slučaj rezonatora za koji vrijedi:  $R_2 = 0.33R_1$  ( $R_1$  – radijus vanjskog prstena);  $R_2$  – radijus unutarnjeg prstena;  $sr$  – debljina prstena). ..... 26

Slika 4.11. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije  $S_{11}$  za slučaj rezonatora za koji vrijedi:  $R_2 = 0.50R_1$  ( $R_1$  – radijus vanjskog prstena);  $R_2$  – radijus unutarnjeg prstena;  $sr$  – debljina prstena). ..... 28

Slika 4.12. Simulacijski rezultati koeficijenta transmisije  $S_{21}$  za slučaj rezonatora za koji vrijedi:  $R_2 = 0.64R_1$  ( $R_1$  – radijus vanjskog prstena);  $R_2$  – radijus unutarnjeg prstena;  $sr$  – debljina prstena). ..... 29