

# Proračun osjetljivosti PP filtra 4. reda u CBQ strukturi

---

Škara, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:243687>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-01**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**PRORAČUN OSJETLJIVOSTI PP FILTRA 4. REDA U CBQ  
STRUKTURI**

Rijeka, srpanj 2022.

Marko Škara,  
0069079362

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**PRORAČUN OSJETLJIVOSTI PP FILTRA 4. REDA U CBQ  
STRUKTURI**

Mentor: Prof. dr. sc. Nino Stojković

Rijeka, srpanj 2022.

Marko Škara,  
0069079362

Rijeka, 15. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za automatiku i elektroniku**  
Predmet: **Analogna obrada signala**  
Grana: **2.03.03 elektronika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Marko Škara (0069079362)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**  
Modul: **Automatika**

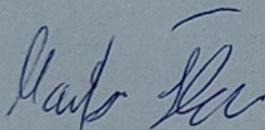
Zadatak: **Proračun osjetljivosti PP filtra 4. reda u CBQ strukturi / Sensitivity  
Calculation of 4-th order CBQ BP Filter**

### Opis zadatka:

Potrebno je realizirati Butterworthov PP filter 4. reda u kaskadnoj strukturi i bikvartnoj strukturi s 3 operacijska pojačala. Odrediti prijenosnu funkciju, raspored polova i nula, frekvencijske karakteristike, vremenske karakteristike te vrijednosti elemenata filtra za obje realizacije. Izvršiti proračun osjetljivosti za obje realizacije. Provesti provjeru dobivenih karakteristika pomoću programskog paketa SPICE. Izraditi nacrt tiskane pločice: raspored elemenata i vodova. Provesti mjerenje karakteristika filtra složenog na ispitnoj pločici pomoću mrežnog analizatora.

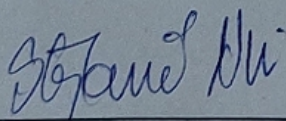
Za dodatne informacije javiti se mentoru.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Prof. dr. sc. Nino Stojković

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Viktor Sučić



## **Izjava o samostalnoj izradi završnog rada**

Temeljem članka 8. Stavaka 1. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta, Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam isključivi autor rada pod nazivom PRORAČUN OSJETLJIVOSTI PP FILTRA 4. REDA U CBQ STRUKTURI. U navedenom radu nisu korišteni dijelovi tuđih radova.

Rijeka, srpanj 2022.



---

Marko Škara,  
0069079362

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Nini Stojkoviću i asistentu Zoranu Šverku koji su mi pomogli znanstvenim i stručnim savjetima u izradi ovog rada.

Također zahvaljujem svojoj obitelji i svim prijateljima koji su bili uz mene i bili mi potpora tijekom studiranja.

## Sadržaj

<b>1. UVOD</b>	<b>3</b>
<b>2. PRORAČUN NORMIRANIH VRIJEDNOSTI</b>	<b>4</b>
2.1. Normirana prijenosna funkcija kaskadne strukture . . . . .	4
2.2. Normirana prijenosna funkcija bikvartne strukture . . . . .	6
2.3. Polovi i nule normirane prijenosne funkcije . . . . .	7
2.4. Normirana amplitudno frekvencijska karakteristika . . . . .	8
2.5. Normirana fazno frekvencijska karakteristika . . . . .	10
2.6. Normirano grupno vrijeme kašnjenja . . . . .	11
2.7. Normirani impulsni odziv . . . . .	12
2.8. Normirani skokovni odziv . . . . .	13
<b>3. PRORAČUN DENORMIRANIH VRIJEDNOSTI</b>	<b>14</b>
3.1. Denormirana prijenosna funkcija . . . . .	14
3.2. Polovi i nule denormirane prijenosne funkcije . . . . .	15
3.3. Denormirana amplitudno frekvencijska karakterisitka . . . . .	16
3.4. Denormirana fazno frekvencijska karakteristika . . . . .	18
3.5. Denormirano grupno vrijeme kašnjenja . . . . .	19
3.6. Denormirani impulsni odziv . . . . .	20
3.7. Denormirani skokovni odziv . . . . .	21
<b>4. REALIZACIJA PP FILTRA</b>	<b>22</b>
4.1. Realizacija kaskadne strukture . . . . .	22
4.2. Realizacija bikvartne strukture . . . . .	24
<b>5. OSJETLJIVOST FILTRA</b>	<b>26</b>
5.1. Osjetljivost kaskadne strukture . . . . .	27
5.2. Osjetljivost bikvartne strukture . . . . .	29
<b>6. SIMULACIJE FILTARSKIH STRUKTURA</b>	<b>32</b>
6.1. Amplitudno frekvencijska karakteristika . . . . .	32
6.2. Fazno frekvencijska karakteristika . . . . .	33
6.3. Grupno vrijeme kašnjenja . . . . .	34

---

6.4. Skokovni odziv . . . . .	35
6.5. Monte Carlo analiza . . . . .	36
<b>7. TISKANE PLOČICE</b>	<b>37</b>
7.1. Kaskadna struktura . . . . .	37
7.2. Bikvartna struktura . . . . .	40
<b>8. LABORATORIJSKA MJERENJA</b>	<b>43</b>
<b>9. ZAKLJUČAK</b>	<b>47</b>
<b>Literatura</b>	<b>48</b>
<b>Sažetak i ključne riječi</b>	<b>49</b>
<b>Summary and key words</b>	<b>50</b>
<b>Dodatak A</b>	<b>51</b>



## 1. UVOD

Električki filtri su sklopovi koji mjenjaju ulazni signal da bi se dobio odgovarajući izlazni signal. Cilj filtra u elektronici je ukloniti ili u najboljem slučaju umanjiti neželjena svojstva ulaznog signala da bi se dobio željen izlazni signal.

Električki filtri se dijele na analogne i digitalne. Digitalni filtri obrađuju vremenski diskretne signale te se realiziraju pomoću integriranih krugova, dok analogni filtri obrađuju vremenski kontinuirane signale. Obje vrste filtra se nadalje dijele na niskopropusne (NP), visokopropusne (VP), pojasno propusne (PP) te na pojasnu branu (BP). Niskopropusni filtri propuštaju signale frekvencija niže od zadane granične frekvencije, dok viskopropusni filtri propuštaju samo signale iznad granične frekvencije. Pojasno propusni filtri propuštaju signale frekvencija koji su pojasno određeni. Pojasna brana propušta sve signale frekvencija osim onih koje se žele prigušiti.

Za realizaciju filtra se koriste aproksimacije pomoću kojih se zadovoljavaju specifikacije i stabilnost filtra. Butterworthova, Besselova i Chebysheva aproksimacija su najkorištenije iako postoji i Caurova aproksimacija. Butterworthovu aproksimaciju karakterizira glatka aproksimacija. Aproksimacijom po Chebysheu se u području propuštanja javlja valovitost. Glavna karakteristika kod Besselove aproksimacije je linearnija fazna karakteristika.

U ovom radu je obrađena kaskadna i bikvartna struktura PP filtra četvrtog reda Butterworthovom aproksimacijom. Proračuni karakteristika, odziva i osjetljivosti su odrađeni u programskom paketu Matlab. U programskom paketu LTSpice su provjereni rezultati koji su dobiveni u Matlabu. U programu EasyEda su napravljeni izgledi tiskanih pločica za pojedine strukture. Naposljetku su napravljena laboratorijska mjerenja bikvartne strukture pomoću mrežnog analizatora.

## 2. PRORAČUN NORMIRANIH VRIJEDNOSTI

Ovo poglavlje se bazira na izračunu normiranih vrijednosti prijenosne funkcije pomoću Butterworthove aproksimacije za kaskadnu i bikvartnu strukturu PP filtra. Širina pojasa je  $B = 0.4$  dok je normirana granična frekvencija  $\omega_0 = 1$  rad/s.

### 2.1. Normirana prijenosna funkcija kaskadne strukture

Prijenosna funkcija PP filtra četvrtog reda se dobiva iz općeg oblika prijenosne funkcije NP filtra drugog reda (2.1), općom prijenosnom funkcijom PP filtra drugog reda (2.2) i frekvencijskom transformacijom NP u PP (2.3).

$$H_{NP} = k \frac{\omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2}, \quad (2.1)$$

$$H_{PP} = k \frac{\frac{\omega_p}{Q_p}}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2}, \quad (2.2)$$

$$s \rightarrow \frac{s^2 + \omega_p^2}{B s} \quad (2.3)$$

Kaskadna struktura se dobiva spajanjem filtarskih struktura drugog reda da se dobije filter višeg reda. Shematski prikaz kaskadne strukture je dan na Slici 2.1.



Slika 2.1. Shematski prikaz kaskadne strukture. [1]

Kao što je navedeno prije, granična frekvencija je  $\omega_0 = 1$  rad/s te se iščitavanjem Tablice 9.1 dobiva prijenosna funkcija NP filtra (2.4).

$$H_{NP} = \frac{1}{s^2 + 1.4142s + 1}, \quad (2.4)$$

te se uspoređivanjem s općim oblikom funkcije drugog reda (2.1) dobiva:

$$\omega_{NP} = 1,$$

$$Q_{NP} = 0.7071,$$

$$k_{NP} = 1$$

Za dobivanje parametara kaskadne strukture pojasno propusnog filtra koriste se sljedeće relacije:

$$Q = \frac{Q_{NP}}{\sqrt{2}\omega_{NP}B} \sqrt{4 + B^2\omega_{NP}^2 + \sqrt{(4 + B^2\omega_{NP}^2)^2 - 4\frac{B^2\omega_{NP}^2}{Q_{NP}^2}}}, \quad (2.5)$$

$$\omega_1 = \frac{Q\omega_{NP}B + \sqrt{Q^2B^2\omega_{NP}^2 - 4Q_{NP}^2}}{2Q_{NP}}, \quad (2.6)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\omega_1}, \quad (2.7)$$

$$k_1 = \frac{\sqrt{k_{NP}\omega_{NP}QB}}{\omega_1}, \quad (2.8)$$

$$k_1 = \frac{\sqrt{k_{NP}\omega_{NP}QB}}{\omega_2} \quad (2.9)$$

Izračunavanjem se dobivaju parametri sekcija PP filtra drugog reda koji su prikazani u Tablici 2.1.

Tablica 2.1. Parametri PP filtra kaskadne strukture.

Parametar	Prva sekcija	Druga sekcija
$\omega$	1.1530	0.8673
$Q$	3.5719	3.5706
$k$	1.2390	1.6471

Uvrštavanjem pojasno propusnih parametara u funkciju 2.2 se dobivaju prijenosne funkcije prve i druge sekcije filtra:

$$H_1 = \frac{0.4s}{s^2 + 0.3228s + 1.329}, \quad (2.10)$$

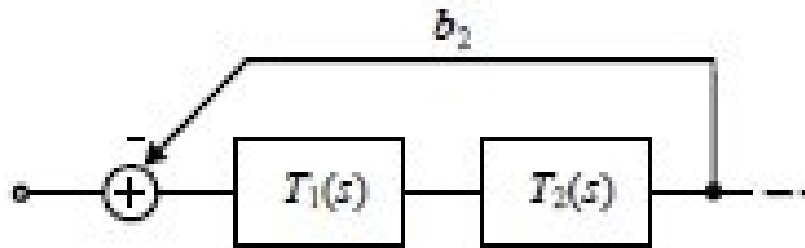
$$H_2 = \frac{0.4s}{s^2 + 0.2429s + 0.7522}, \quad (2.11)$$

te se njihovim množenjem dobiva ukupna prijenosna funkcija PP filtra:

$$H_{(s)} = \frac{0.4s}{s^2 + 0.3228s + 1.329} \cdot \frac{0.4s}{s^2 + 0.2429s + 0.7522} = \frac{0.16s^2}{s^4 + 0.5657s^3 + 2.16s^2 + 0.5657s + 1} \quad (2.12)$$

## 2.2. Normirana prijenosna funkcija bikvartne strukture

Bikvartna struktura se dobiva dodavanjem negativne povratne veze na kaskadnu strukturu dvaju aktivnih sekcija drugog reda. Ovom izvedbom se smanjuje osjetljivost filtra, povećava se složenost proračunavanja parametara te samim time i cijena filtra raste. Shematski prikaz je dan na Slici 2.2.



Slika 2.2. Shematski prikaz bikvartalne strukture. [1]

Prijenosna funkcija bikvartne strukture je:

$$H_{CBQ} = \frac{H_1 H_2}{1 + \beta H_1 H_2} \quad (2.13)$$

Uvrštavanjem jednadžbe 2.2 u jednadžbu 2.13 se dobiva:

$$H_{CBQ} = \frac{k_1 \frac{\omega_1}{s^2 + \frac{\omega_1}{Q_1} s + \omega_1^2} \cdot k_2 \frac{\omega_2}{s^2 + \frac{\omega_2}{Q_2} s + \omega_2^2}}{1 + \beta \cdot k_1 \frac{\omega_1}{s^2 + \frac{\omega_1}{Q_1} s + \omega_1^2} \cdot k_2 \frac{\omega_2}{s^2 + \frac{\omega_2}{Q_2} s + \omega_2^2}}, \quad (2.14)$$

te se sređivanjem dobiva:

$$H_{CBQ} = \frac{k_1 k_2 \frac{\omega_1 \omega_2}{Q_1 Q_2} s^2}{s^4 + \left(\frac{\omega_1}{Q_1} + \frac{\omega_2}{Q_2}\right) s^3 + \left(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \frac{\omega_1 \omega_2}{Q_1 Q_2} + \beta k_1 k_2 \frac{\omega_1 \omega_2}{Q_1 Q_2}\right) s^2 + \left(\frac{\omega_1 \omega_2^2}{Q_1} + \frac{\omega_1^2 \omega_2}{Q_2}\right) s + \omega_1^2 \omega_2^2} \quad (2.15)$$

Pretpostavkama  $Q_1 = Q_2 = Q$ ,  $\omega_1 = \omega_2 = 1$  i uvrštavanjem u jednadžbu 2.15 se dobiva:

$$H_{CBQ} = \frac{\frac{k_1 k_2}{Q^2} s^2}{s^4 + \left(\frac{2}{Q}\right) s^3 + \left(2 + \frac{1}{Q^2} + \frac{\beta k_1 k_2}{Q^2}\right) s^2 + \left(\frac{2}{Q}\right) s + 1}, \quad (2.16)$$

te uspređivanjem elemenata bikvartne strukture (2.16) s kaskadnom strukturom (2.12) se dobivaju parametri bikvartne strukture dane u Tablici 2.2.

Tablica 2.2. Parametri PP filtra bikvartne strukture.

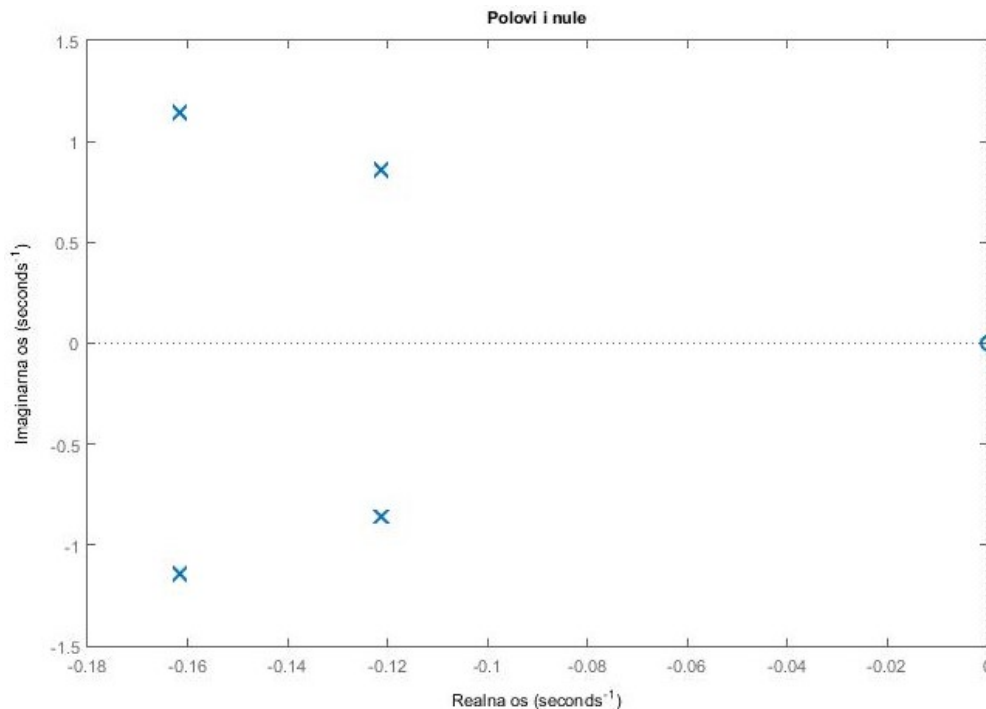
Parametar	Prva sekcija	Druga sekcija
$\omega$	1	1
$Q$	3.5354	3.5354
$k$	1.4142	1.4142
$\beta$	0.5	

### 2.3. Polovi i nule normirane prijenosne funkcije

Polovi i nule mogu biti realni ili konjugirano kompleksni parovi ovisno o redu filtra. Parni red filtra će imati konjugirano-kompleksne parove polova, dok će neparni filter imati realne vrijednosti. Polovi i nule se prikazuju u kompleksnoj  $s$ -ravnini. Osim u realnom i imaginarnom zapisu polovi se još mogu prikazati u polarnom zapisu. Ukupan broj polova mora odgovarati ukupnom broju nula u prijenosnoj funkciji filtra.

Stabilnost filtra je određena polovima koja se još naziva Hurwitzov kriterij stabilnosti sustava. Naime ako se polovi prijenosne funkcije nalaze u lijevoj poluravnini  $s$ -ravnine ne uključujući imaginarnu os onda je sustav stabilan.

Na Slici 2.3 su prikazani polovi i nule normirane prijenosne funkcije. Polovi su označeni s  $x$  dok su nule s  $o$ . Svi polovi se nalaze u lijevoj poluravnini  $s$ -ravnine te je tako dokazan Hurwitzov kriterij stabilnost. Prijenosne funkcije kaskadne i bikvartne strukture su jednake i samim time imaju jednake polove i nule.



Slika 2.3. Prikaz polova i nula normirane funkcije.

$$s_{p1,2} = -0.1614 \pm j1.1416,$$

$$s_{p3,4} = -0.1214 \pm j0.8588,$$

$$s_{o1,2} = 0,$$

$$s_{o3,4} = \infty$$

## 2.4. Normirana amplitudno frekvencijska karakteristika

Za dobivanje amplitudno frekvencijske karakteristike prvotno je potrebno napraviti zamjenu  $s \rightarrow j\omega$  u jednadžbu 2.12 iz čega se dobiva:

$$H(j\omega) = \frac{-0.16\omega^2}{(\omega^4 - 2.16\omega^2 + 1) + j(0.5657\omega - 0.5657\omega^3)} \quad (2.17)$$

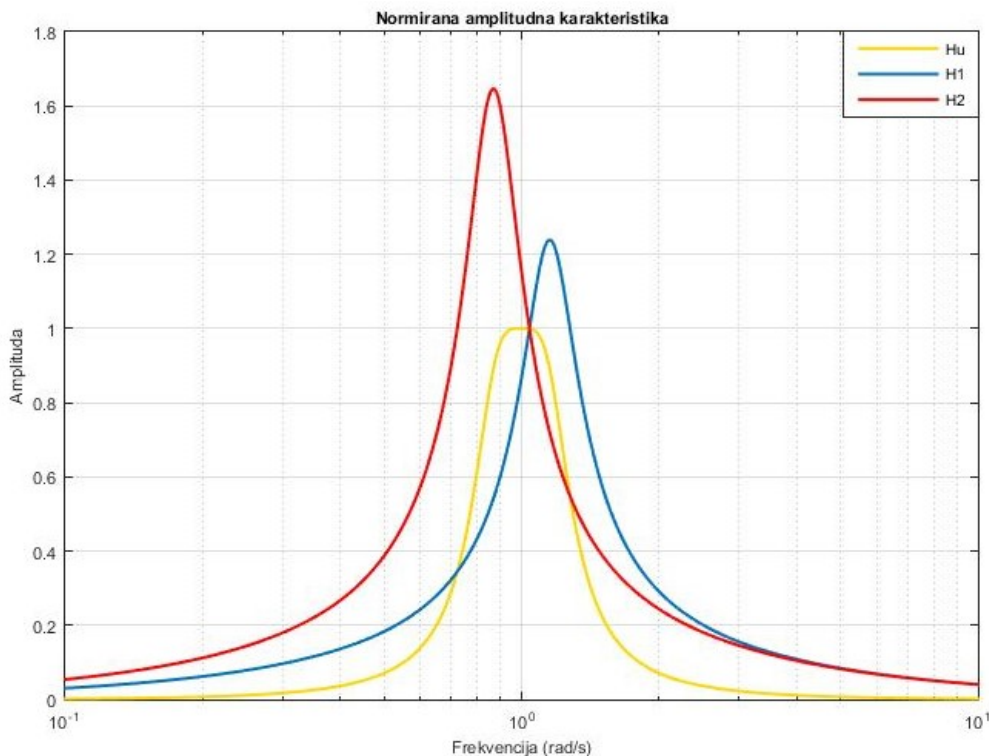
Amplitudno frekvencijska karakteristika se računa kao:

$$|H(j\omega)| = \sqrt{(Re[H(j\omega)])^2 + (Im[H(j\omega)])^2}, \quad (2.18)$$

te se sređivanjem funkcije 2.17 dobiva:

$$|H(j\omega)| = \frac{0.16\omega^2}{\sqrt{(\omega^4 - 2.16\omega^2 + 1)^2 + (0.5657\omega - 0.5657\omega^3)^2}} \quad (2.19)$$

Na Slici 2.4 su prikazane amplitudno frekvencijske karakteristike pojedinih sekcija i ukupne prijenosne funkcije dekadu prije i poslije granične. Plava boja predstavlja prvu sekciju, crvena predstavlja drugu sekciju, te žuta prikazuje ukupnu karakteristiku filtra.

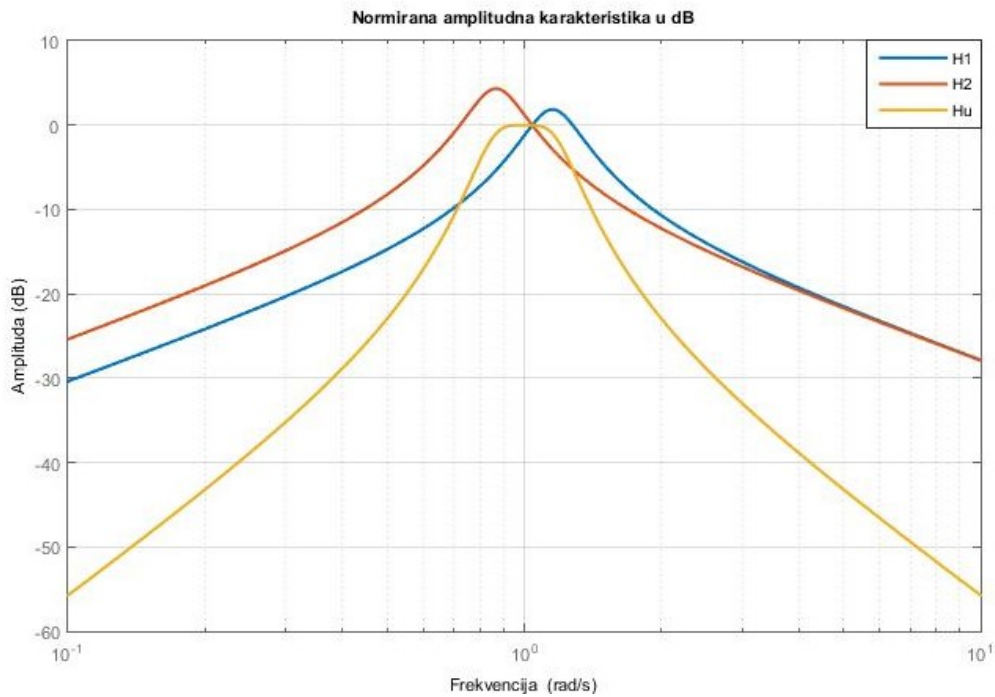


Slika 2.4. Prikaz normirano amplitudno frekvencijske karakteristike.

Za izračun frekvencijske karakteristike u decibelima se koristi logaritamska mjera te se dobiva:

$$|A(\omega)| = 20 \log \frac{0.16\omega^2}{\sqrt{(\omega^4 - 2.16\omega^2 + 1)^2 + (0.5657\omega - 0.5657\omega^3)^2}}, \quad (2.20)$$

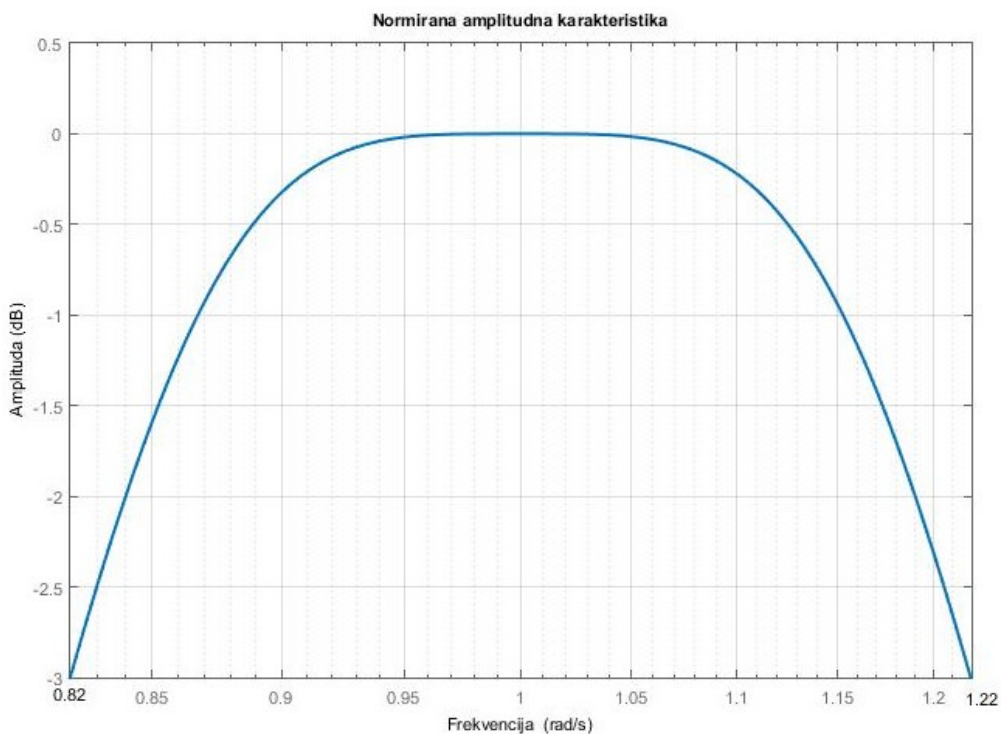
te je grafički prikaz dan na Slici 2.5.



Slika 2.5. Prikaz normirano amplitudno frekvencijske karakteristike u dB.

Kao što se može vidjeti na Slici 2.5 niske i visoke frekvencije se prigušuju, dok se frekvencije oko granične propuštaju. Na Slici 2.6 je prikazana amplitudno frekvencijska karakterisitka na -3 dB iz koje se može iščitati da je širina pojasa jednaka zadanoj.

$$B = \omega_g - \omega_d = 1.2 - 0.82 = 0.4 \quad (2.21)$$



Slika 2.6. Prikaz normirano amplitudno frekvencijske karakteristike na -3 dB.



## 2.5. Normirana fazno frekvencijska karakteristika

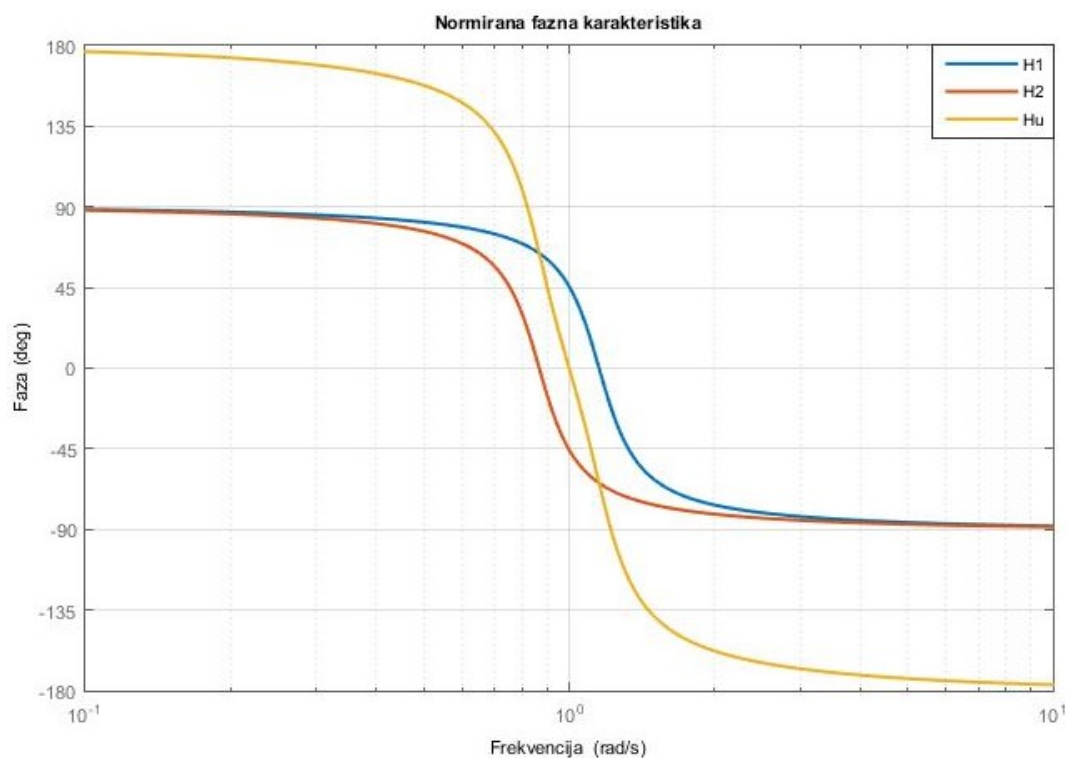
Fazno frekvencijska funkcija prikazuje pomak izlaznog signala u odnosu na ulazni. Računa se kao:

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\text{Im}[H(j\omega)]}{\text{Re}[H(j\omega)]} \quad (2.22)$$

Uvrštavanjem (2.17) u (2.22) se dobiva:

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{0.5657\omega - 0.5657\omega^3}{\omega^4 - 2.16\omega^2 + 1} \quad (2.23)$$

Na Slici 2.7 je prikazana fazno frekvencijska karakteristika dekadu prije i poslije granične za kaskadnu i bikvartnu strukturu. Sa slike je vidljivo da postoji nelinearnost faze oko granične frekvencije. Plava boja označava prvu, crvena drugu sekciju, dok žuta prikazuje ukupnu karakteristiku filtra.



Slika 2.7. Prikaz normirano fazno frekvencijske karakteristike.

## 2.6. Normirano grupno vrijeme kašnjenja

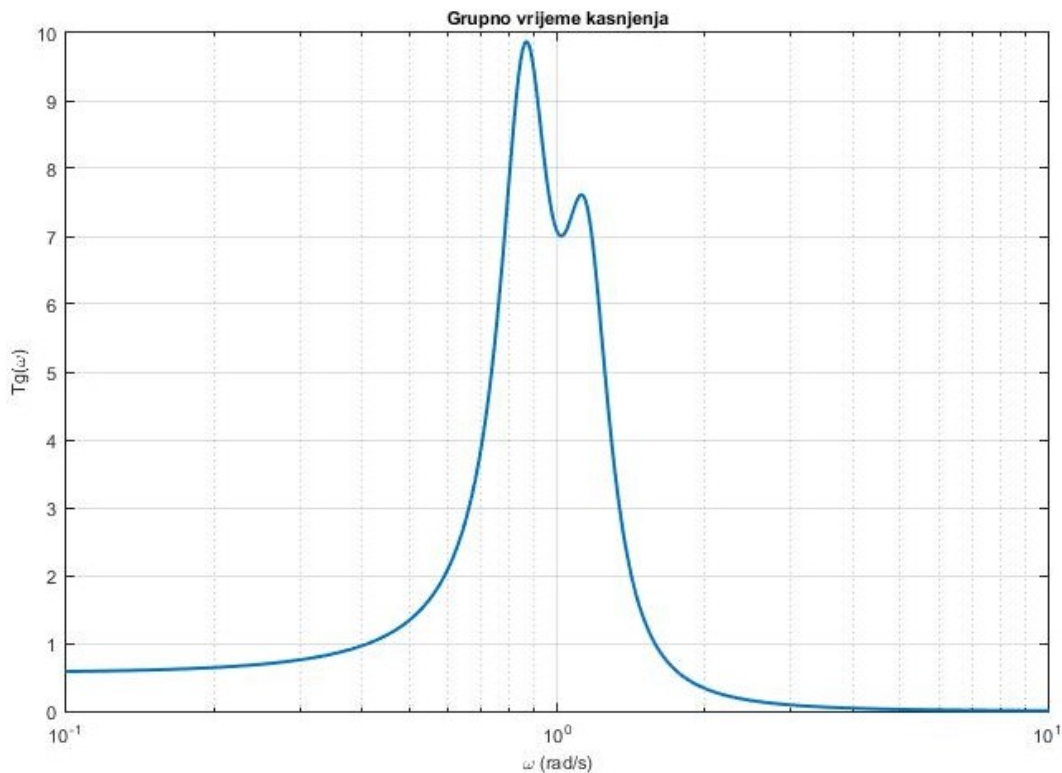
Osim amplitudne i fazno frekvencijske karakteristike potrebno je odrediti i grupno vrijeme kašnjenja koje predstavlja koliko izlazni signal kasni za ulaznim ovisno o frekvenciji signala i računa se kao negativna derivacija fazno frekvencijske karakteristike:

$$T_g(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \quad (2.24)$$

Negativnim deriviranjem fazno frekvencijske karakteristike (2.23) po frekvenciji se dobiva:

$$T_g(\omega) = \frac{0.56567\omega^6 - 0.47516\omega^4 - 0.47516\omega^2 + 0.56567}{\omega^8 - 4.00002\omega^6 + 6.02563\omega^4 - 4.00002\omega^2 + 1} \quad (2.25)$$

Grupno vrijeme kašnjenja za kaskadnu i bikvartnu strukturu je prikazano na Slici 2.8 te je vidljivo da najveću vrijednost poprima netom prije granične frekvencije.



Slika 2.8. Prikaz normiranog grupnog vremena kašnjenja.

## 2.7. Normirani impulsni odziv

Impulsni odziv se dobiva dovođenjem impulsnog jediničnog skoka na ulaz filtra. Koristi se za ispitivanje stabilnosti sustava. Sustav je stabilan ukoliko izlazni signal nema trajnih oscilacija. Da bi se prikazano u vremenskoj domeni potrebno je koristiti inverznu Laplaceovu transformaciju (2.27).

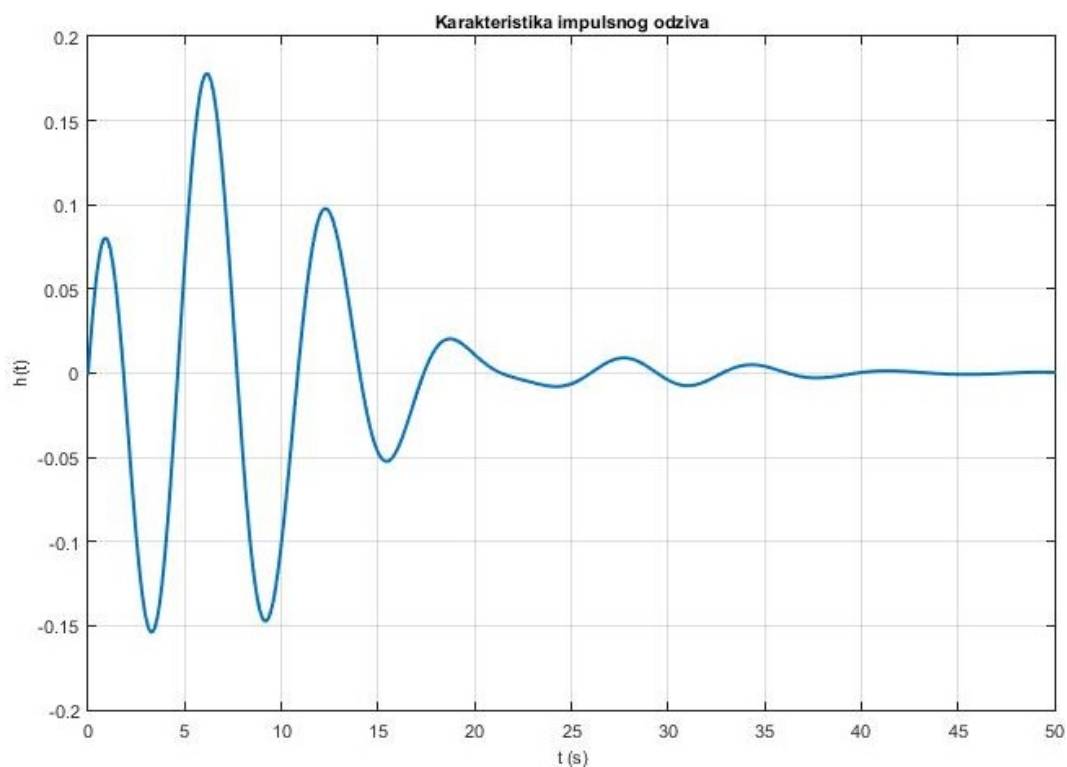
$$H(s) = \frac{0.16s^2}{s^4 + 0.5657s^3 + 2.16s^2 + 0.5657s + 1} \cdot 1 \quad (2.26)$$

$$h(t) = \mathcal{L}^{-1}H(s) \quad (2.27)$$

Sređivanjem se dobiva:

$$h(t) = 0.03923e^{-0.1614t}[\cos(1.1415t) + 8.2527\sin(1.1415t)] - 0.03923e^{-0.12145t}[\cos(0.85875t) + 6.1737\sin(0.85875t)] \quad (2.28)$$

Na Slici 2.9 je prikazan impulsni odziv za obje strukture. Kao što je vidljivo nakon što impuls dođe na ulaz, izlazni signal oscilira te se na posljetku vraća u nulu. Time se potvrđuje stabilnost filtra.



Slika 2.9. Prikaz normiranog impulsnog odziva.

## 2.8. Normirani skokovni odziv

Skokovni odziv se dobiva dovođenjem jedinične stepence na ulaz. Isto kao i za impulsni odziv se provjerava stabilnost filtra. Za prikaz u vremenu se također koristi Laplaceova transformacija (2.30).

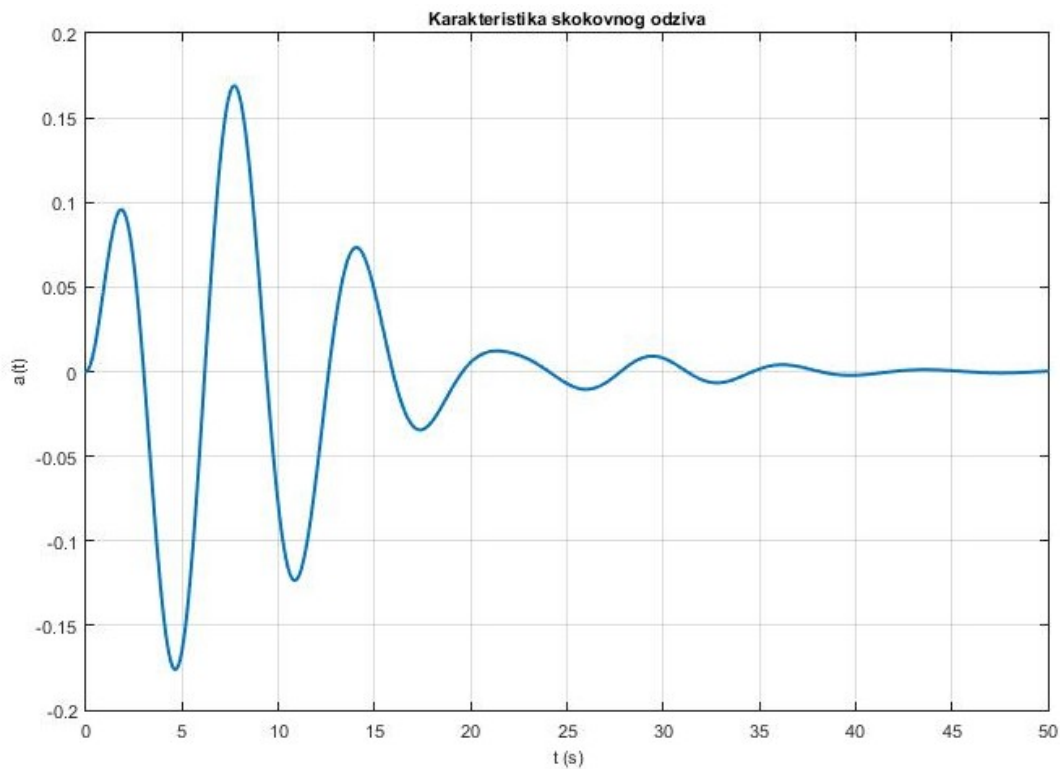
$$H(s) = \frac{0.16s^2}{s^4 + 0.5657s^3 + 2.16s^2 + 0.5657s + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (2.29)$$

$$a(t) = \mathcal{L}^{-1}H(s) \quad (2.30)$$

Sređivanjem se dobiva:

$$a(t) = 0.28283e^{-0.12145t}[\cos(0.85875t) + 0.02009\sin(0.85875t)] - 0.28283e^{-0.1614t}[\cos(0.1.1415t) + 0.01988\sin(1.1415t)] \quad (2.31)$$

Na Slici 2.10 je prikazan skokovni odziv za obje strukture i vidljivo je da postoje oscilacije. Nakon određenog vremena oscilacije nestaju te je još jednom potvrđuje da je sustav stabilan. Signal ne počinje od nule zbog grupnog vremena kašnjenja.



Slika 2.10. Prikaz normiranog skokovnog odziva.

### 3. PRORAČUN DENORMIRANIH VRIJEDNOSTI

Nakon proračunavanja normiranih vrijednosti prijenosne funkcije, potrebno ju je denormirati za analizu realnog sklopa. Time se izračunavaju realne vrijednosti elemenata filtra.

#### 3.1. Denormirana prijenosna funkcija

Nova granična frekvencija iznosi 4000 Hz, te se dobiva:

$$\omega_g = 2\pi f_g = 8000\pi \quad (3.1)$$

Uvrštavanjem nove granične frekvencije u transformaciju 2.3 se dobiva:

$$s \rightarrow \frac{s^2 + (8000\pi)^2}{3200\pi}, \quad (3.2)$$

te uvrštavanjem u jednadžbu 2.4 se dobiva denormirana prijenosna funkcija PP filtra četvrtog reda koja glasi:

$$H_{(s)} = \frac{1.01068 \cdot 10^8 s^2}{s^4 + 1.4217 \cdot 10^4 s^3 + 1.36438 \cdot 10^9 s^2 + 8.98036 \cdot 10^{12} s + 3.98988 \cdot 10^{17}} \quad (3.3)$$

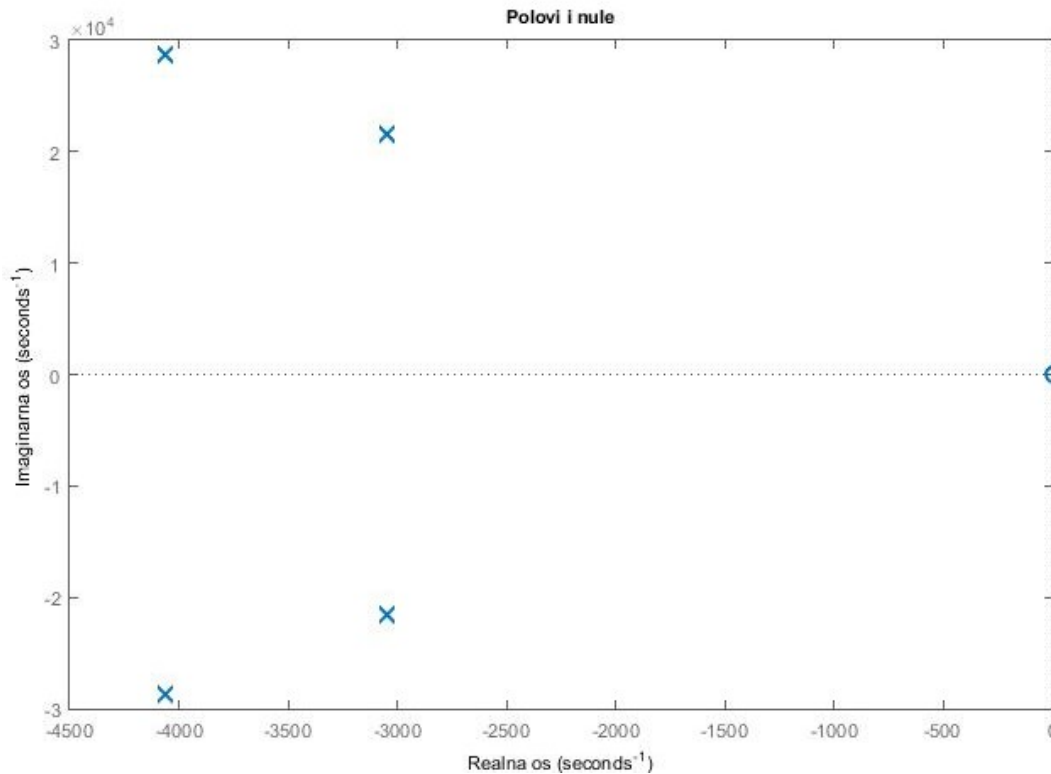
Parametri denormirane prijenosne funkcije su danu u Tablici 3.1.

*Tablica 3.1. Denormirani parametri PP filtra kaskadne strukture.*

<i>Parametar</i>	<i>Prva sekcija</i>	<i>Druga sekcija</i>
$\omega_g$	28974	21797
$Q$	3.5713	3.5706
$k$	1.2392	1.6468

### 3.2. Polovi i nule denormirane prijenosne funkcije

Na Slici 3.1 su prikazani polovi i nule denormirane prijenosne funkcije. Polovi su označeni s x dok su nule s o. Svi polovi se nalaze u lijevoj poluravnini  $s$ -ravnine.



Slika 3.1. Prikaz polova i nula denormirane prijenosne funkcije.

$$s_{p1,2} = -4.059 \cdot 10^3 \pm j2.8676 \cdot 10^4,$$

$$s_{p3,4} = -3.051 \cdot 10^3 \pm j2.1596 \cdot 10^3,$$

$$s_{o1,2} = 0,$$

$$s_{o3,4} = \infty$$

### 3.3. Denormirana amplitudno frekvencijska karakteristika

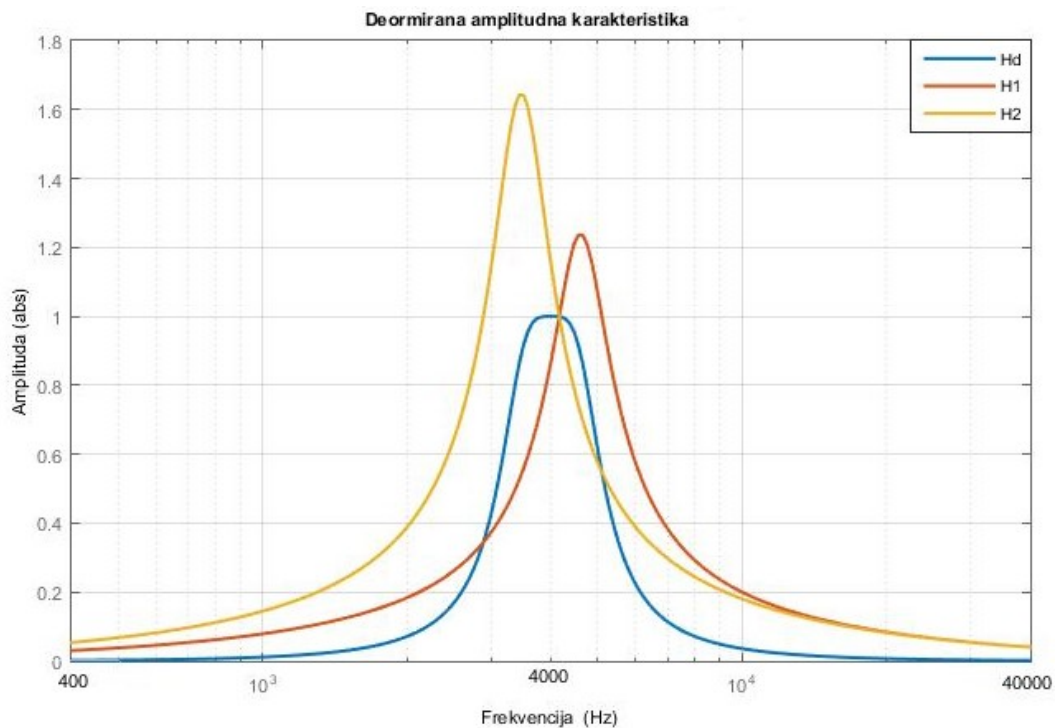
Zamjenom  $s \rightarrow j\omega$  u jednadžbu 3.3 se dobiva:

$$H(j\omega) = \frac{-1.01068 \cdot 10^8 \omega^2}{(\omega^4 - 1.36438 \cdot 10^9 \omega^2 + 3.98988 \cdot 10^{17}) + j(8.98036 \cdot 10^{12} \omega - 1.4217 \cdot 10^4 \omega^3)}, \quad (3.4)$$

te se sređivanjem dobiva:

$$|H(j\omega)| = \frac{-1.01068 \cdot 10^8 \omega^2}{\sqrt{(\omega^4 - 1.36438 \cdot 10^9 \omega^2 + 3.98988 \cdot 10^{17})^2 + (8.98036 \cdot 10^{12} \omega - 1.4217 \cdot 10^4 \omega^3)^2}}, \quad (3.5)$$

Na Slici 3.2 je prikazana amplitudno frekvencijska karakteristika dekadu prije i poslije granične. Ako se usporedi sa Slikom 2.4 vidljivo je kako se karakteristike poklapaju. Crvena boja predstavlja prvu sekciju, žuta predstavlja drugu sekciju, te plava prikazuje ukupnu karakteristiku filtra.



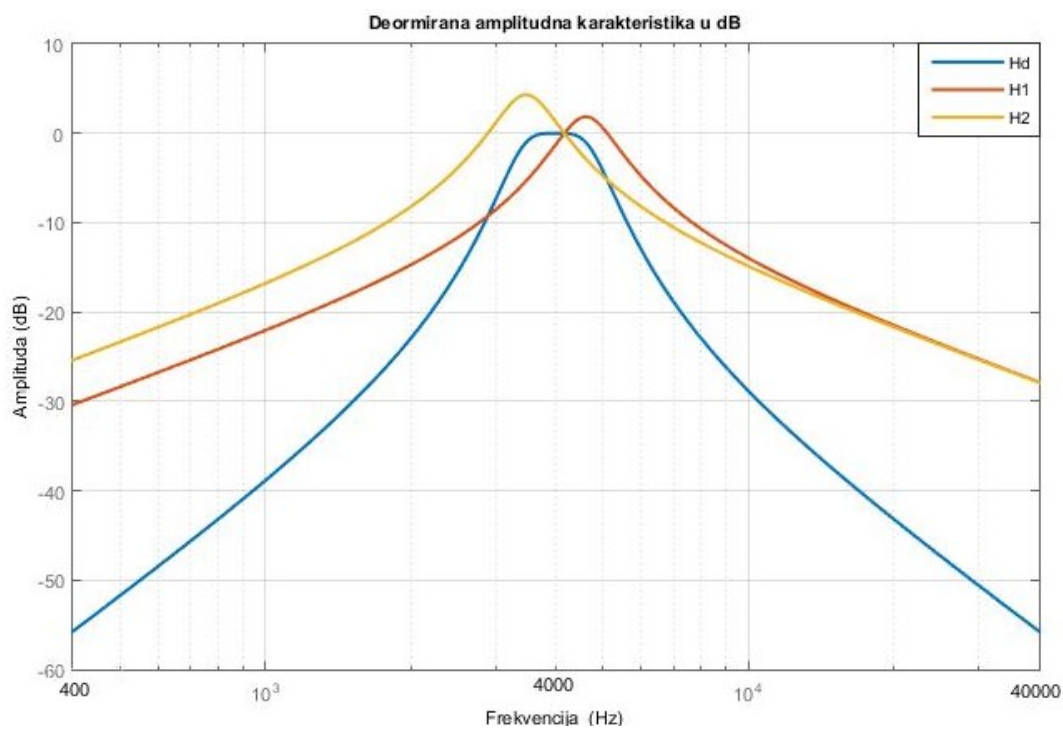
Slika 3.2. Prikaz denormirane amplitudno frekvencijske karakteristike.

Za izračun u decibelima se koristi logaritamska mjera te se dobiva:

$$|A(\omega)| = \frac{-1.01068 \cdot 10^8 \omega^2}{\sqrt{(\omega^4 - 1.36438 \cdot 10^9 \omega^2 + 3.98988 \cdot 10^{17})^2 + (8.98036 \cdot 10^{12} \omega - 1.4217 \cdot 10^4 \omega^3)^2}}, \quad (3.6)$$

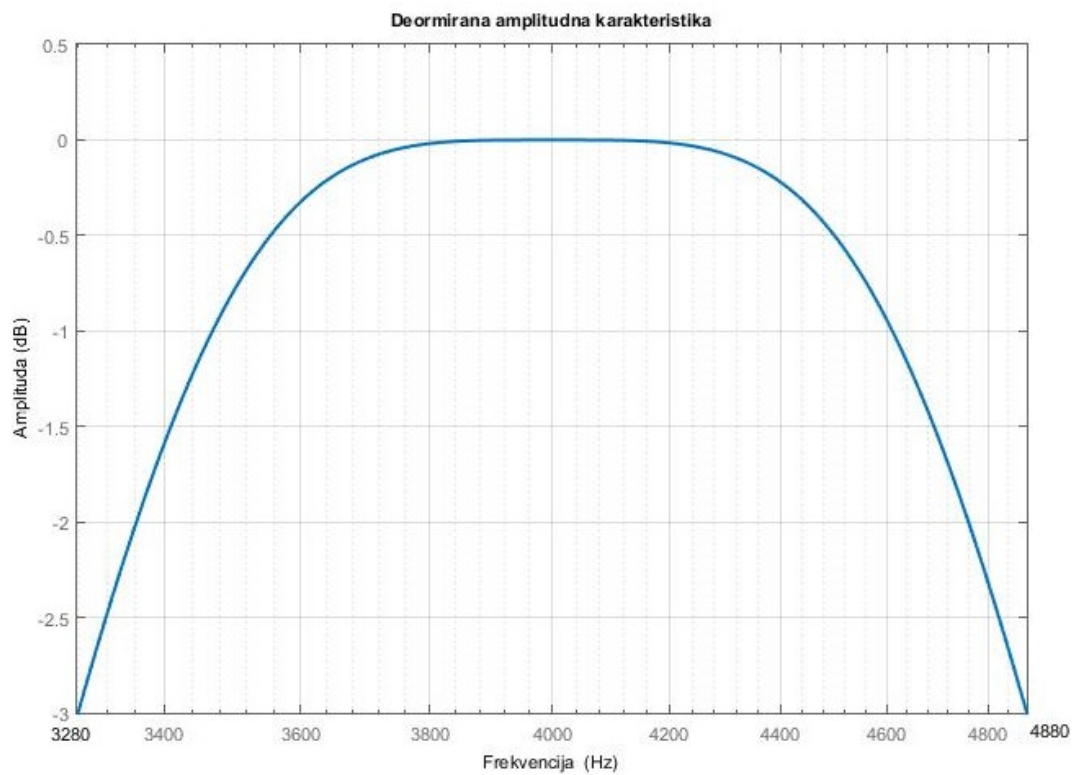
te je grafički prikaz dan na Slici 3.3.





Slika 3.3. Prikaz denormirano amplitudno frekvencijske karakteristike u dB.

Na Slici 3.4 je prikazana amplitudno frekvencijska karakterisitka na -3 dB.



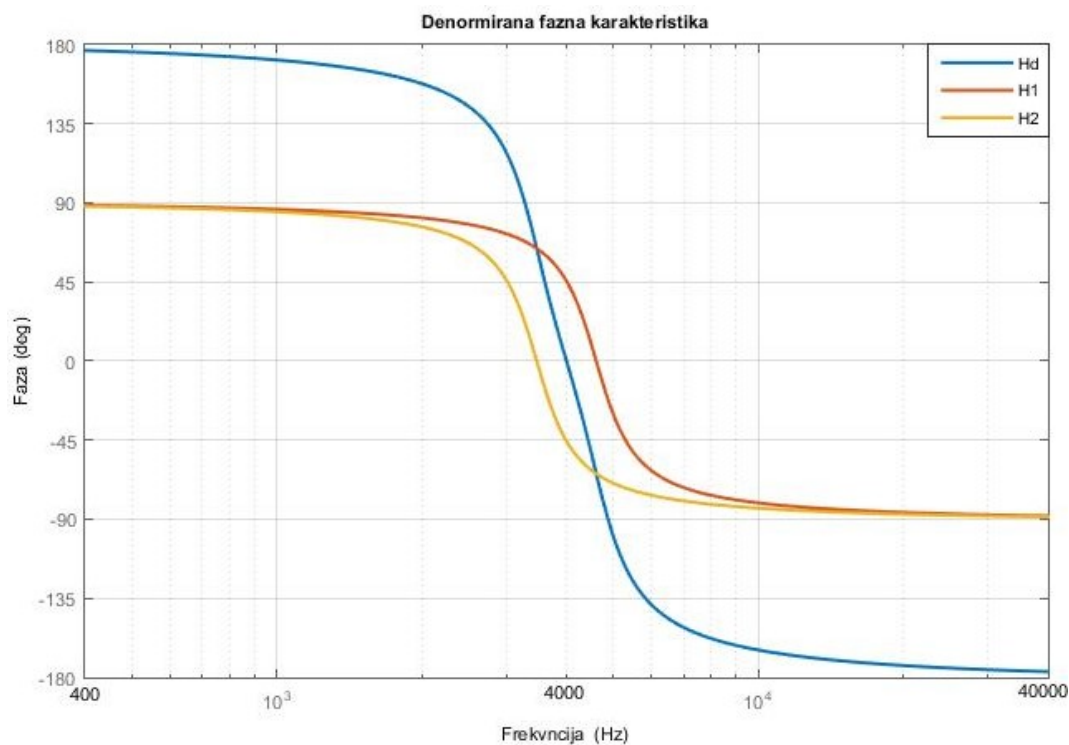
Slika 3.4. Prikaz denormirano amplitudno frekvencijske karakteristike na -3 dB.

### 3.4. Denormirana fazno frekvencijska karakteristika

Uvrštavanjem denormiranih vrijednosti u jednadžbu 2.22 se dobije:

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{8.98036 \cdot 10^{12} \omega - 1.4217 \cdot 10^4 \omega^3}{\omega^4 - 1.36438 \cdot 10^9 \omega^2 + 3.98988 \cdot 10^{17}} \quad (3.7)$$

Grafički prikaz fazno frekvencijske karakteristike je dan na Slici 3.5. Crvena boja predstavlja prvu sekciju, žuta predstavlja drugu sekciju, te plava prikazuje ukupnu karakteristiku filtra.



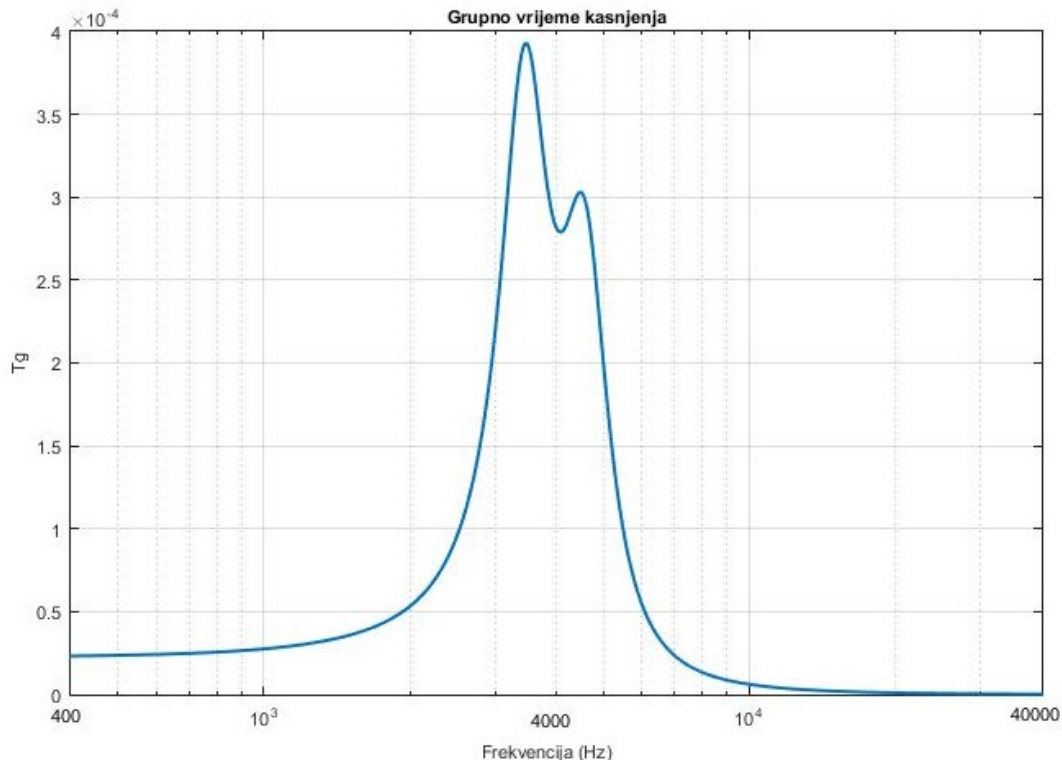
Slika 3.5. Prikaz denormirano fazno frekvencijske karakteristike.

### 3.5. Denormirano grupno vrijeme kašnjenja

Negativnim deriviranjem fazno frekvencijske karakteristike se dobiva grupno vrijeme kašnjenja:

$$T_g = \frac{1.4217 \cdot 10^4 \omega^6 - 7.54369 \cdot 10^{12} \omega^4 - 4.76461 \cdot 10^{21} \omega^2 + 3.58306 \cdot 10^{30}}{\omega^8 - 2.52664 \cdot 10^9 \omega^6 + 2.40416 \cdot 10^{18} \omega^4 - 1.0081 \cdot 10^{27} \omega^2 + 1.59191 \cdot 10^{35}}, \quad (3.8)$$

te je grafički prikazano na Slici 3.6.



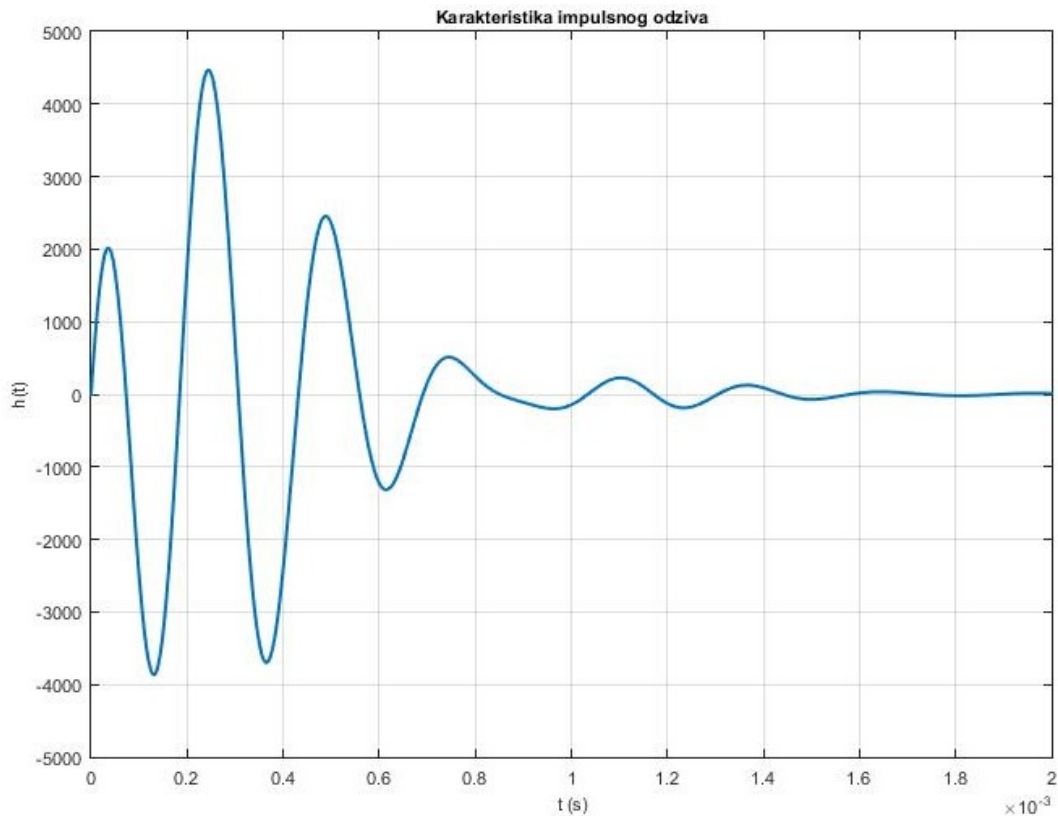
Slika 3.6. Prikaz denormiranog grupnog vremena kašnjenja.

### 3.6. Denormirani impulsni odziv

Dovođenjem impulsnog odziva na denormiranu prijenosnu funkciju dobiva se impulsni odziv. Da bi se impulsni odziv prikazao u vremenskoj domeni koristi se formula 2.27, te se dobiva:

$$h(t) = 985.44e^{-4056.5t}[\cos(28689t) + 8.2505\sin(28689t)] - 985.44e^{-3052.5t}[\cos(21582t) + 6.1717\sin(21582t)], \quad (3.9)$$

te je graf dan na Slici 3.7



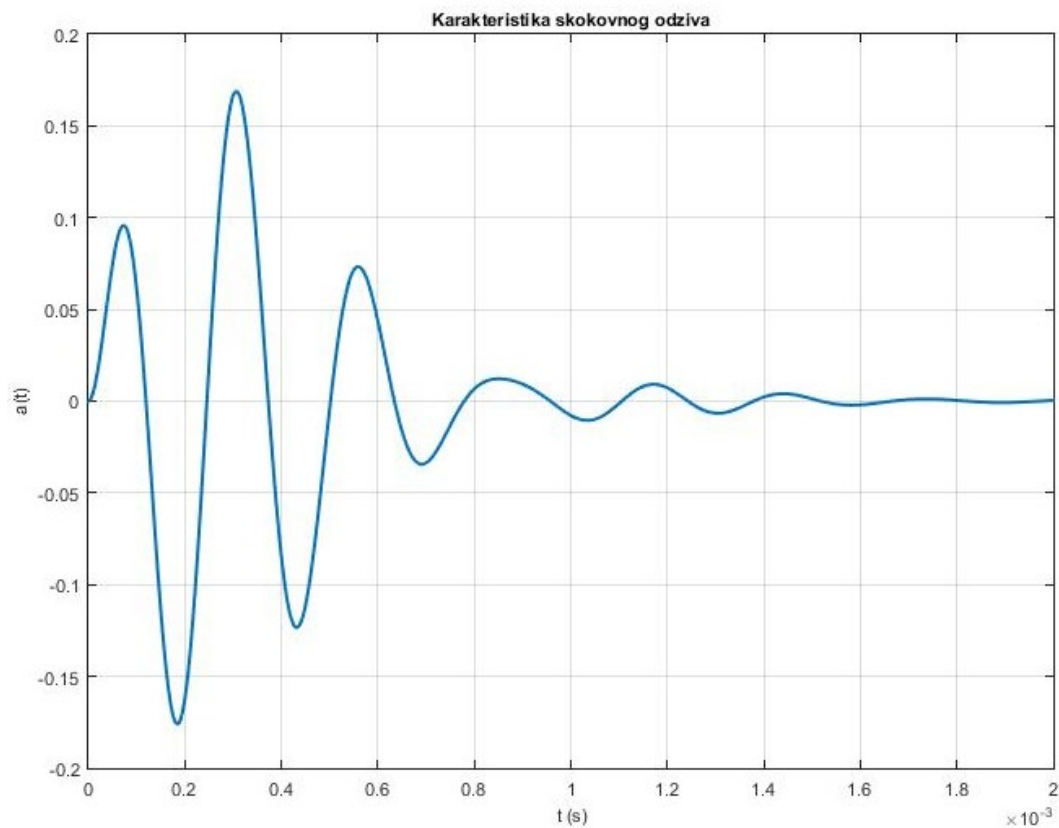
Slika 3.7. Prikaz denormiranog impulsnog odziva.

### 3.7. Denormirani skokovni odziv

Dovođenjem jedinične stepenice na denormiranu prijenosnu funkciju dobiva se skokovni odziv. Da bi se skokovni odziv prikazao u vremenskoj domeni koristi se formula 2.30, te se dobiva:

$$h(t) = 0.28261e^{-3052.5t}[\cos(21582t) + 0.020132\sin(21582t)] - 0.28261e^{-4056.5t}[\cos(28689t) + 0.019851\sin(28689t)], \quad (3.10)$$

te je graf dan na Slici 3.8



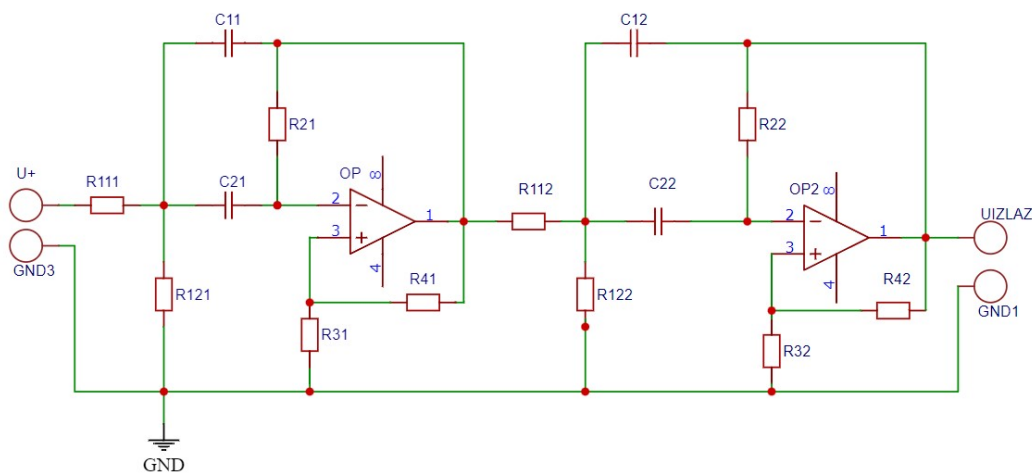
Slika 3.8. Prikaz denormiranog skokovnog odziva.

## 4. REALIZACIJA PP FILTRA

U ovom poglavlju su prikazane sheme i vrijednosti elemenata pojedine strukture za normirane i denormirane vrijednosti PP filtra.

### 4.1. Realizacija kaskadne strukture

Na Slici 4.1 je prikazana električna shema kaskadne strukture PP filtra.



Slika 4.1. Prikaz sheme kaskadne strukture.

Za izračun normiranih vrijednosti elemenata kaskadne strukture se koristi veći broj jednažbi. Potrebno je proizvoljno odabrati neke vrijednosti elemenata pošto je broj nepoznanica veći od broja jednažbi. Odabrane vrijednosti su:

$$R_1 = R_2 = R_{ni},$$

$$C_{1n} = C_{2n} = 1,$$

$$R_{4ni} = 1.$$

Jednažbe za izračunavanje vrijednosti elemenata su [1]:

$$R_{ni} = \frac{1}{\omega_i}, \quad (4.1)$$

$$R_{3ni} = 2 - \frac{1}{Q_i}, \quad (4.2)$$

$$R_{11ni} = \frac{(1 + R_{3ni})R_{1ni}}{k_i(2 - R_{3ni})}, \quad (4.3)$$

$$R_{12ni} = \frac{R_{11ni}R_{1ni}}{R_{11ni} - R_{1ni}} \quad (4.4)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz Tablice 2.1 se dobiju normirane vrijednosti elemenata kaskadne strukture koje su prikazane u Tablici 4.1.

Tablica 4.1. Normirane vrijednosti elemenata kaskadne strukture.

<i>Element</i>	<i>Prva sekcija</i>	<i>Druga sekcija</i>
$R_{11ni}$	6.801	6.7985
$R_{12ni}$	0.9941	1.3885
$R_{2ni}$	0.8673	1.1530
$R_{3ni}$	1.72	1.7199
$R_{4ni}$	1	1
$C_{1ni}$	1	1
$C_{2ni}$	1	1

Za dobivanje denoriranih vrijednosti filtra na frekvenciji 4000 Hz i vrijednosti kapaciteta od 10 nF koristi se izraz:

$$R_0 = \frac{C_n}{\omega_0 C} = 3980 \Omega. \quad (4.5)$$

Potom je potrebno pomnožiti  $R_0 = 3980 \Omega$  s normiranim vrijednostima otpora. Vrijednosti kondenzatora su  $C = 10 \text{ nF}$ . Denormirane vrijednosti elemenata su dane u Tablici 4.2.

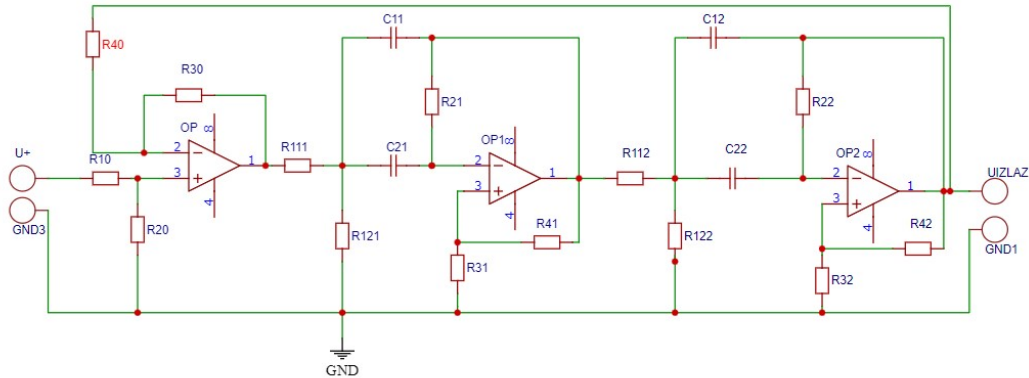
Tablica 4.2. Denormirane vrijednosti elemenata kaskadne strukture.

<i>Element</i>	<i>Prva sekcija</i>	<i>Druga sekcija</i>
$R_{11ni}$	27060 $\Omega$	27050 $\Omega$
$R_{12ni}$	3955 $\Omega$	5525 $\Omega$
$R_{2ni}$	3450 $\Omega$	4590 $\Omega$
$R_{3ni}$	6844 $\Omega$	6843 $\Omega$
$R_{4ni}$	3980 $\Omega$	3980 $\Omega$
$C_{1ni}$	10 nF	10 nF
$C_{2ni}$	10 nF	10 nF



## 4.2. Realizacija bikvartne strukture

Na Slici 4.2 je prikazana električna shema bikvartne strukture PP filtra.



Slika 4.2. Prikaz sheme bikvartne strukture.

Za izračun normiranih vrijednosti elemenata bikvartnog spoja koriste se već napisane formule (4.1 - 4.4) uz dodatak za izračunavanje otpora diferencijalnog pojačala (4.6 - 4.7). Potrebno je ponovno proizvoljno odabrati neke vrijednosti elemenata pošto je broj nepoznanica veći od broja jednadžbi. Odabrane vrijednosti su:

$$R_1 = R_2 = R_{ni},$$

$$C_{1n} = C_{2n} = 1,$$

$$R_{20} = R_{40} = R_{4ni} = 1$$

Formule za izračunavanje otpora povratne veze:

$$R_{10} = \frac{R_{20}R_{30}}{R_{40}}, \quad (4.6)$$

$$R_{30} = R_{40}\beta \quad (4.7)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz Tablice 2.2 se dobiju normirane vrijednosti elemenata bikvartne strukture koje su prikazane u Tablici 4.3

Tablica 4.3. Normirane vrijednosti elemenata bikvartne strukture.

<i>Element</i>	<i>Povratna veza</i>	<i>Prva sekcija</i>	<i>Druga sekcija</i>
$R_{10}$	0.5		
$R_{20}$	1		
$R_{30}$	0.5		
$R_{40}$	1		
$R_{11ni}$		6.7914	6.7914
$R_{12ni}$		1.1727	1.1727
$R_{2ni}$		1	1
$R_{3ni}$		1.7171	1.7171
$R_{4ni}$		1	1
$C_{1ni}$		1	1
$C_{2ni}$		1	1

Vrijednosti kondenzatora su  $C = 10 \text{ nF}$  i množenjem  $R_0 = 3980 \Omega$  s normiranim vrijednostima otpora se dobivaju denormirane vrijednosti elemenata koje su dane u Tablici 4.4.

Tablica 4.4. Denormirane vrijednosti elemenata bikvartne strukture.

<i>Element</i>	<i>Povratna veza</i>	<i>Prva sekcija</i>	<i>Druga sekcija</i>
$R_{10}$	1990 $\Omega$		
$R_{20}$	3980 $\Omega$		
$R_{30}$	1990 $\Omega$		
$R_{40}$	3980 $\Omega$		
$R_{11ni}$		27030 $\Omega$	27030 $\Omega$
$R_{12ni}$		4667 $\Omega$	4667 $\Omega$
$R_{2ni}$		3980 $\Omega$	3980 $\Omega$
$R_{3ni}$		6834 $\Omega$	6834 $\Omega$
$R_{4ni}$		3980 $\Omega$	3980 $\Omega$
$C_{1ni}$		10 nF	10 nF
$C_{2ni}$		10 nF	10 nF

## 5. OSJETLJIVOST FILTRA

Osjetljivost se definira kao promjena frekvencijskih karakteristika uslijed promjene vrijednosti elemenata samog filtra. Schofflerovom osjetljivosti se računa koliko pojedini element u filtru utječe na osjetljivost cijelog filtra. Promjene vrijednosti elemenata nastaju zbog neidealnosti samih elemenata. Razlozi neidealnosti mogu biti:

Zaokruživanja na cijele vrijednosti prilikom proračuna

Vanjskih i mehaničkih utjecaja

Starosti samog elementa

Schofflerova osjetljivost se računa kao derivacija amplitudno frekvencijske karakteristike po pojedinom elementu u filtra i umnošku elementa po amplitudno frekvencijskoj karakteristici.

$$S_{x_i}^{|H(j\omega)|} = \frac{d|H(j\omega)|}{dx_i} \cdot \frac{x_i}{|H(j\omega)|}, \quad (5.1)$$

gdje  $x_i$  predstavlja pojedini element. Za prikaz u logaritamskoj mjeri se korisiti:

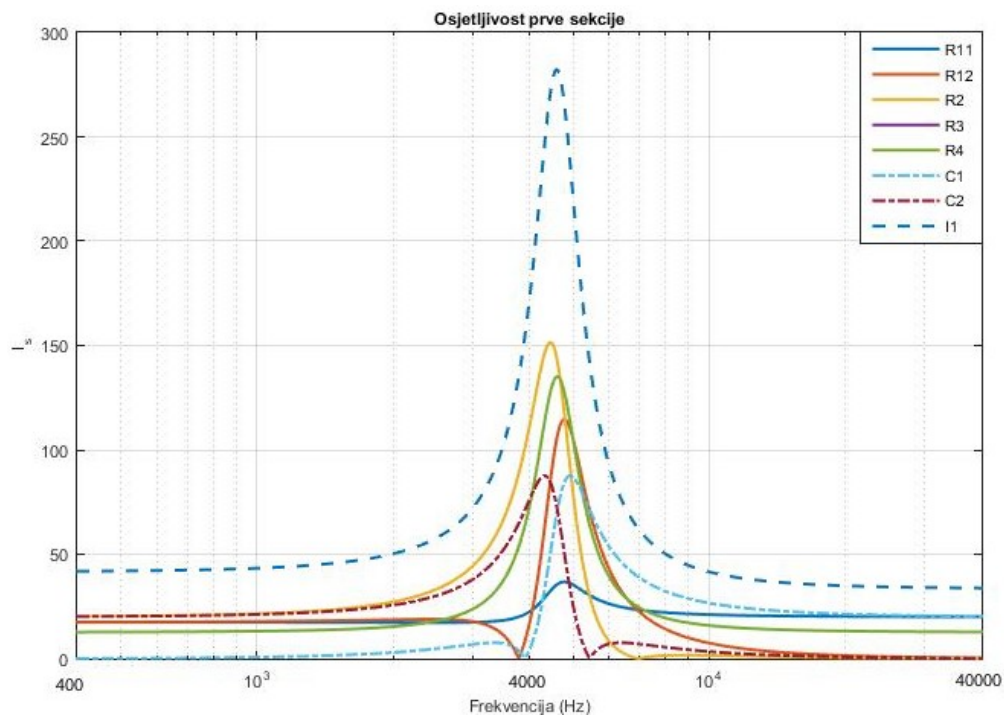
$$S_{x_i}^{\alpha(\omega)} = \frac{d\alpha(\omega)}{dx_i} \cdot x_i \quad (5.2)$$

Schofflerova mjera osjetljivosti se računa funkcijom:

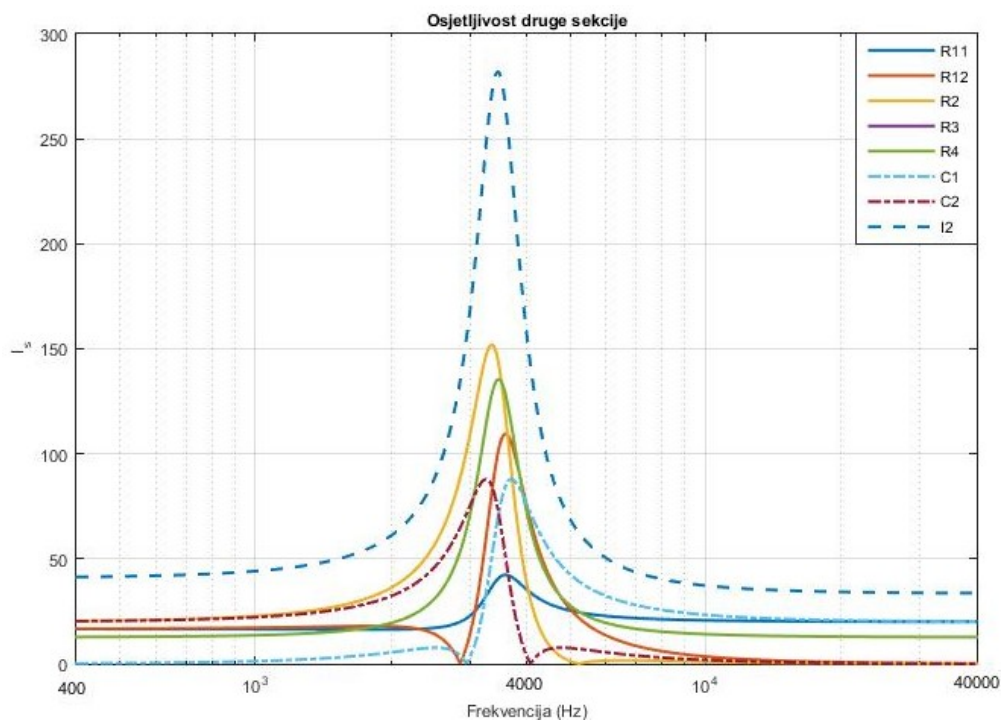
$$I_s^2(\omega) = \sum_i (S_{x_i}^{\alpha(\omega)})^2 \quad (5.3)$$

### 5.1. Osjetljivost kaskadne strukture

Na Slici 5.1 je prikazana Schofflerova osjetljivost pojedinog elementa prve sekcije filtra za kaskadnu strukturu, dok je na Slici 5.2 prikazana za drugu sekciju.

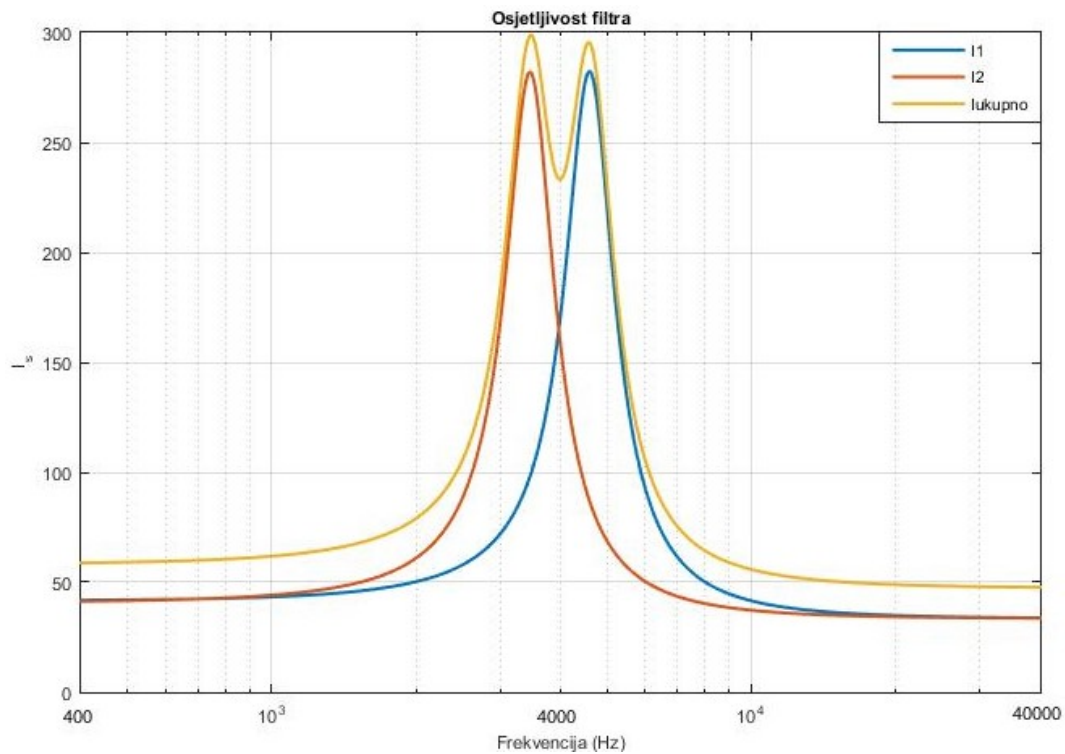


Slika 5.1. Prikaz Schofflerove osjetljivosti prve sekcije kaskadne strukture.



Slika 5.2. Prikaz Schofflerove osjetljivosti druge sekcije kaskadne strukture.

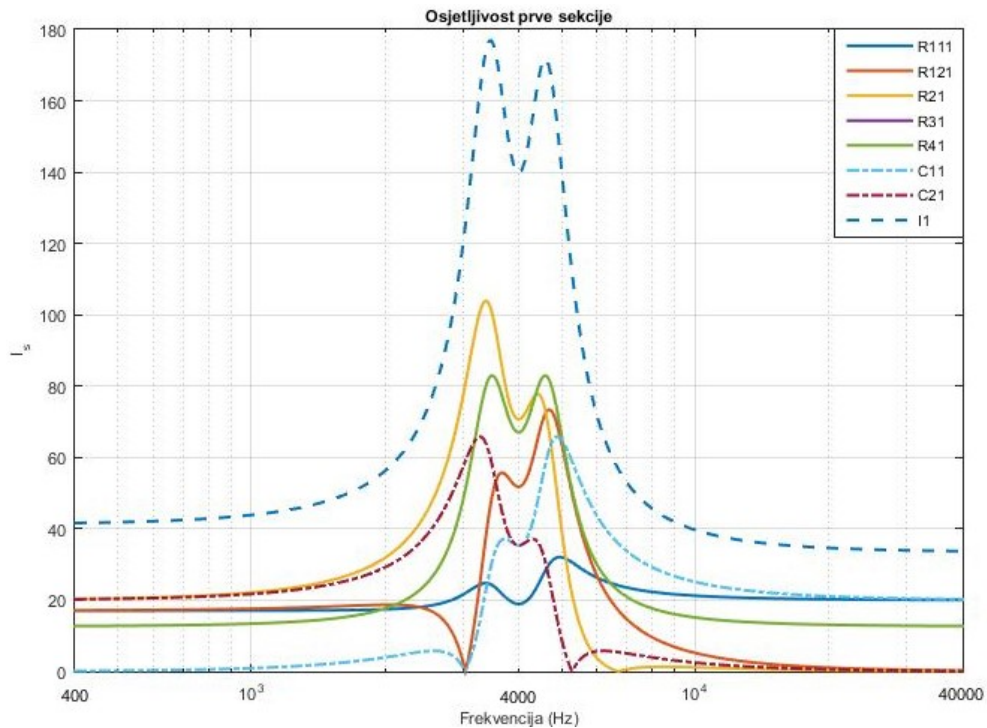
Na Slici 5.3 je prikazana Schofflerova osjetljivost filtra za kaskadnu strukturu. Kao što je vidljivo iz slike, osjetljivost poprima malo veću vrijednost za drugu sekciju. Razlog tomu je što druga sekcija filtra ima veće pojačanje za razliku od prve sekcije, što je vidljivo na Slici 3.3



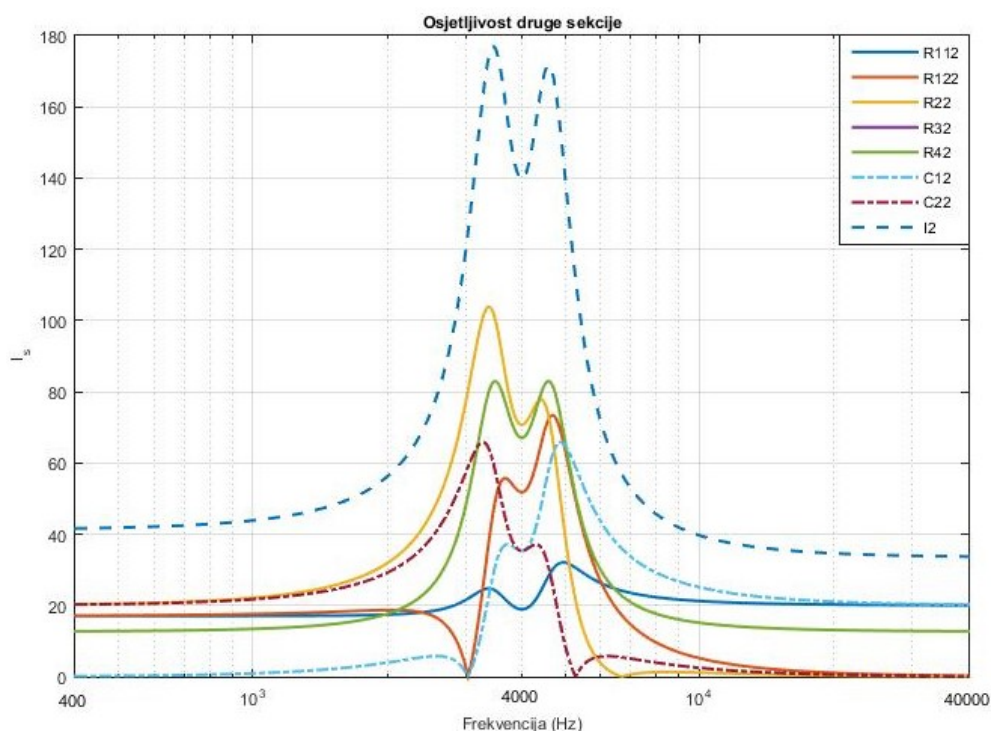
Slika 5.3. Prikaz Schofflerove osjetljivosti kaskadne strukture.

## 5.2. Osjetljivost bikvartne strukture

Na Slici 5.4 je prikazana osjetljivost prve sekcije bikvartne strukture, dok je na Slici 5.5 prikazana za drugu sekciju. Kao što je vidljivo iz slika, osjetljivost prve i druge sekcije su jednake jer su parametri bikvartnog filtra jednaki za prvu i drugu sekciju.

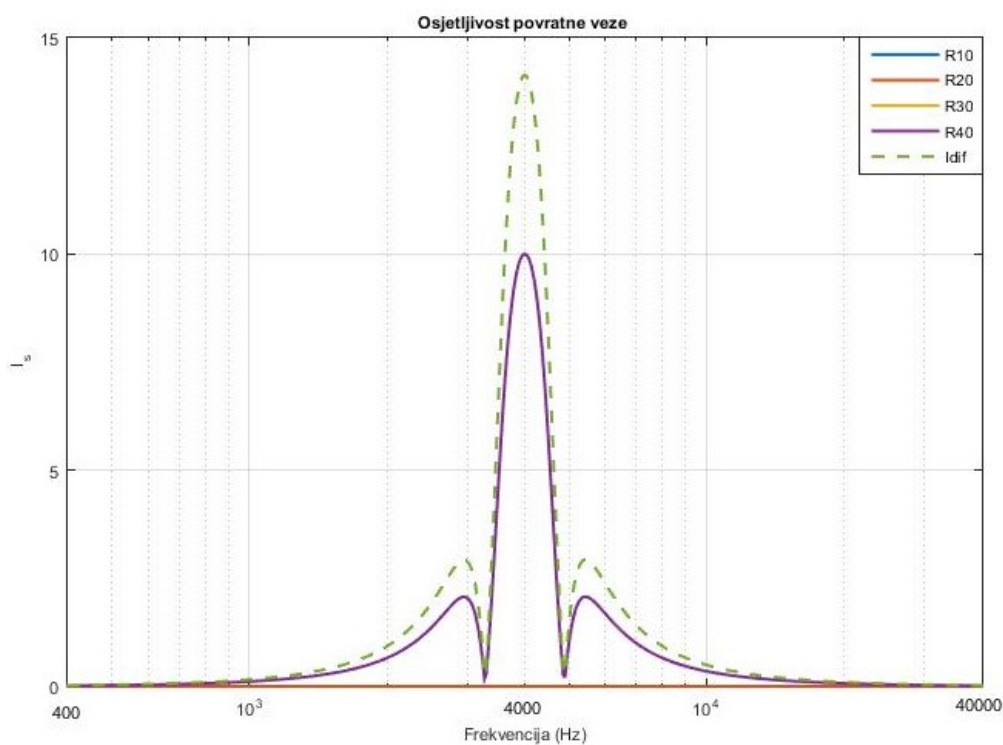


Slika 5.4. Prikaz Schofflerove osjetljivosti prve sekcije bikvartne strukture.

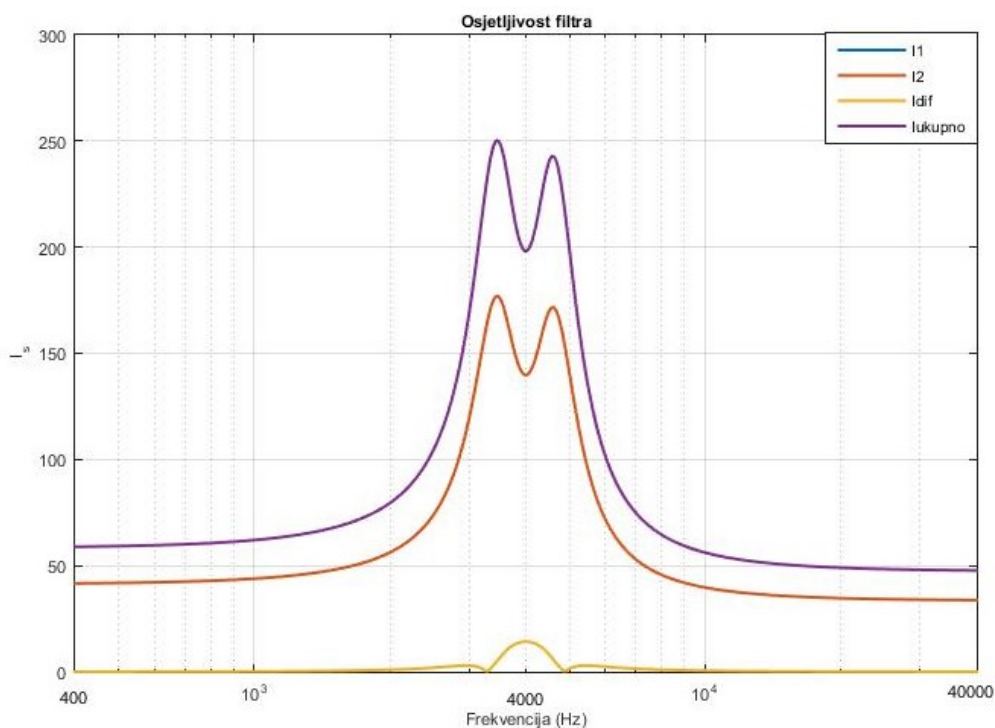


Slika 5.5. Prikaz Schofflerove osjetljivosti druge sekcije bikvartne strukture.

Na Slici 5.6 je prikazana Schofflerova osjetljivost povratne veze koja smanjuje ukupnu osjetljivost filtra. Na posljétku je prikazana Slika 5.7 koja pokazuje ukupnu osjetljivost filtra bikvartne strukture.



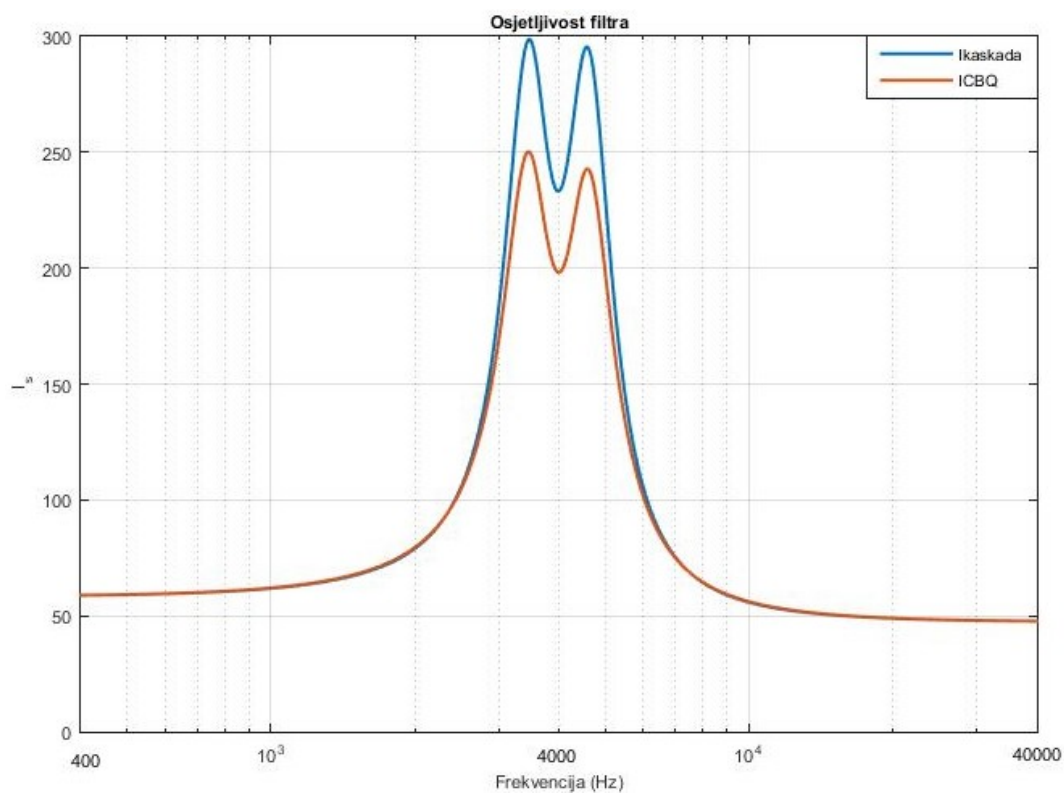
Slika 5.6. Prikaz Schofflerove osjetljivosti povratne veze bikvartne strukture.



Slika 5.7. Prikaz Schofflerove osjetljivosti bikvartne strukture.



Na Slici 5.8 je prikazana usporedba osjetljivosti kaskadne i bikvartne strukture. U području gušenja na niskim i visokim frekvencijama je osjetljivost jednaka. U području propuštanja dolazi do vidljivijih razlika u osjetljivostima dvaju struktura. Osjetljivost bikvartne strukture je manja zbog povratne veze, međutim troškovi izrade su veći i koristi se veći broj elemenata te samim time je i veća potrošnja energije.



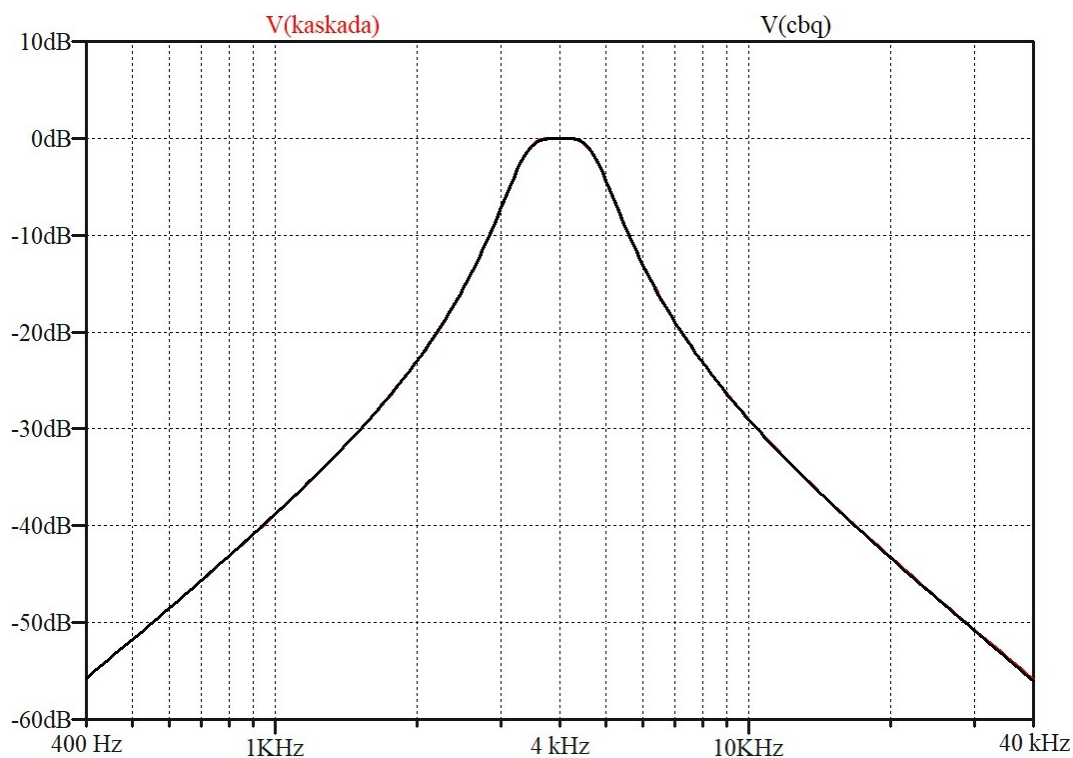
Slika 5.8. Usporedba Schofflerove osjetljivosti kaskadne i bikvartne strukture.

## 6. SIMULACIJE FILTARSKIH STRUKTURA

Simulacije odziva filtra su rađene u programskom paketu LTSpice. Usporedbom s karakteristikama dobivenih u Matlabu se može zaključiti da je filter dobro proračunat.

### 6.1. Amplitudno frekvencijska karakteristika

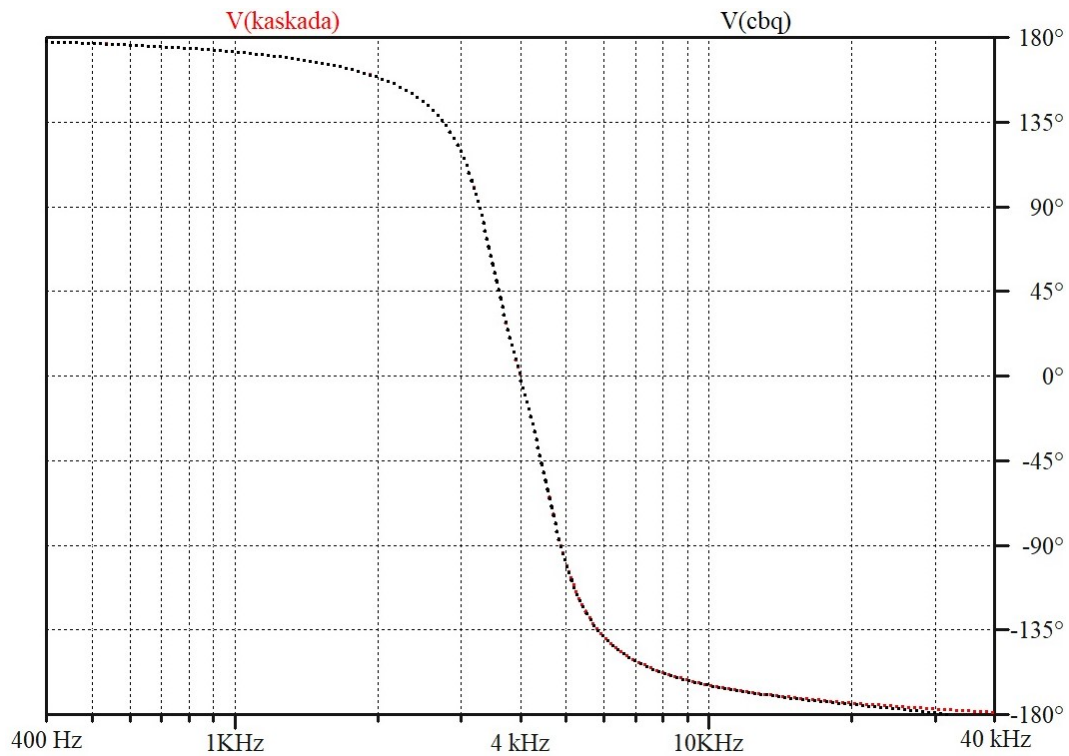
Na Slici 6.1 je prikazana simulacija amplitudno frekvencijske karakteristike. Kao što je vidljivo sa slike kaskadna i bikvartna karakteristika se podudaraju čime se potvrđuje da su vrijednosti elemenata dobro izračunate. Ako se uspoređi sa Slikom 3.3 koja je dobivena u Matlab-u, vidljivo je da su karakteristike jednake.



Slika 6.1. Amplitudno frekvencijska karakteristika kaskadne i bikvartne strukture.

## 6.2. Fazno frekvencijska karakteristika

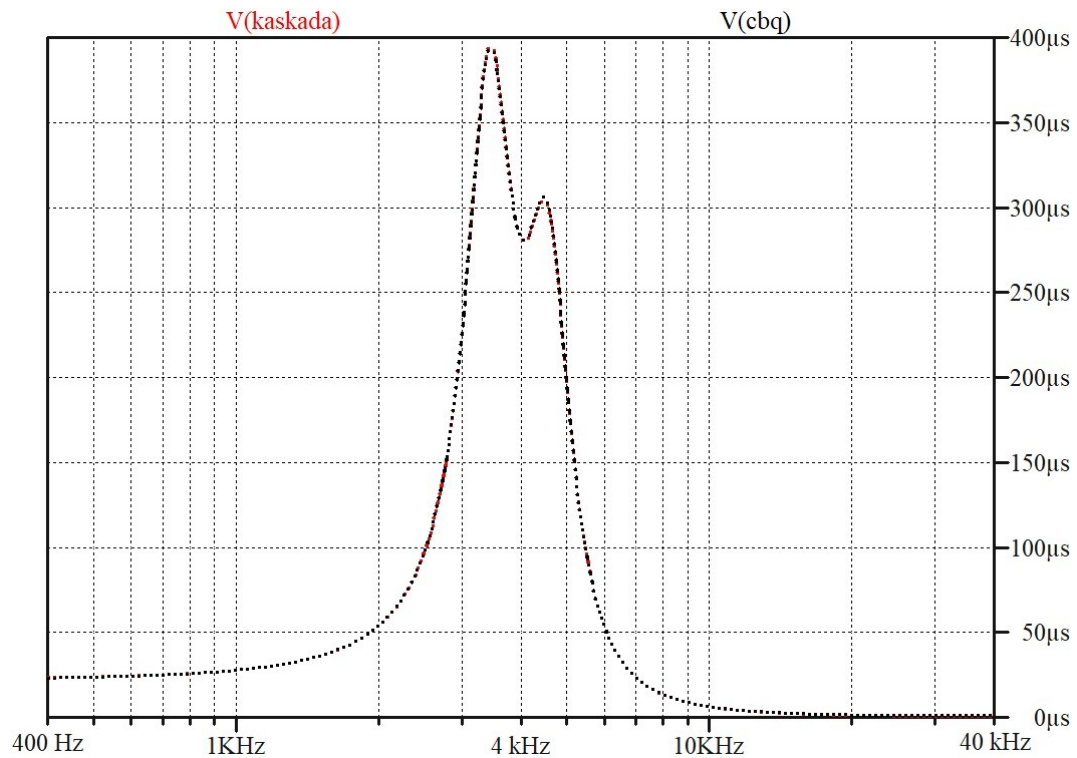
Na Slici 6.2 je prikazana simulacija fazno frekvencijske karakteristike. Još jednom je vidljivo da se kaskadna i bikvartna karakteristika podudaraju. Usporedbom sa Slikom 3.5 vidi se da su karakteristike jednake i da se izračuni iz Matlaba podudaraju sa simulacijama iz LTSpice-a.



Slika 6.2. Fazno frekvencijska karakteristika kaskadne i bikvartne strukture.

### 6.3. Grupno vrijeme kašnjenja

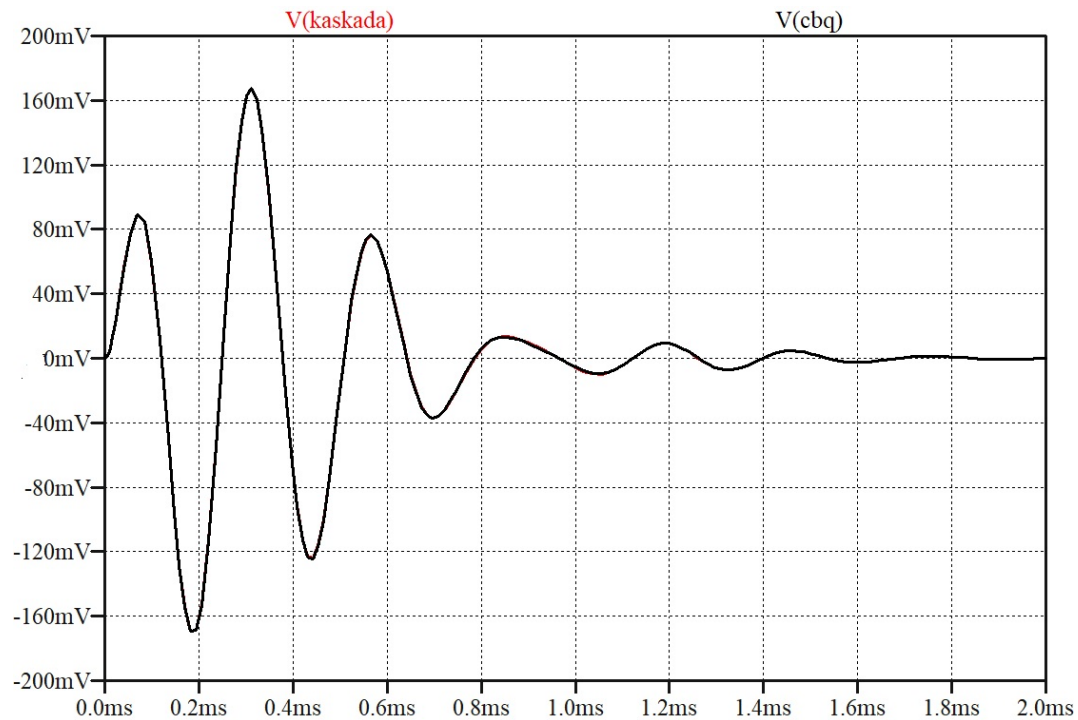
Na Slici 6.3 je prikazana simulacija grupnog vremena kašnjenja. Vidljivo da se kaskadna i bikvartna karakteristika podudaraju. Usporedbom sa Slikom 3.6 vidi se da su karakteristike jednake i da se izračuni iz Matlaba podudaraju sa simulacijama iz LTSpice-a.



Slika 6.3. Grupno vrijeme kašnjenja kaskadne i bikvartne strukture.

#### 6.4. Skokovni odziv

Na Slici 6.4 je prikazana simulacija skokovnog odziva. Kao i prije kaskadna i bikvartna karakteristika podudaraju. U početku postoje oscilacije no kasnije se odziv stabilizira. Usporedbom sa Slikom 3.8 vidi se da su karakteristike jednake.

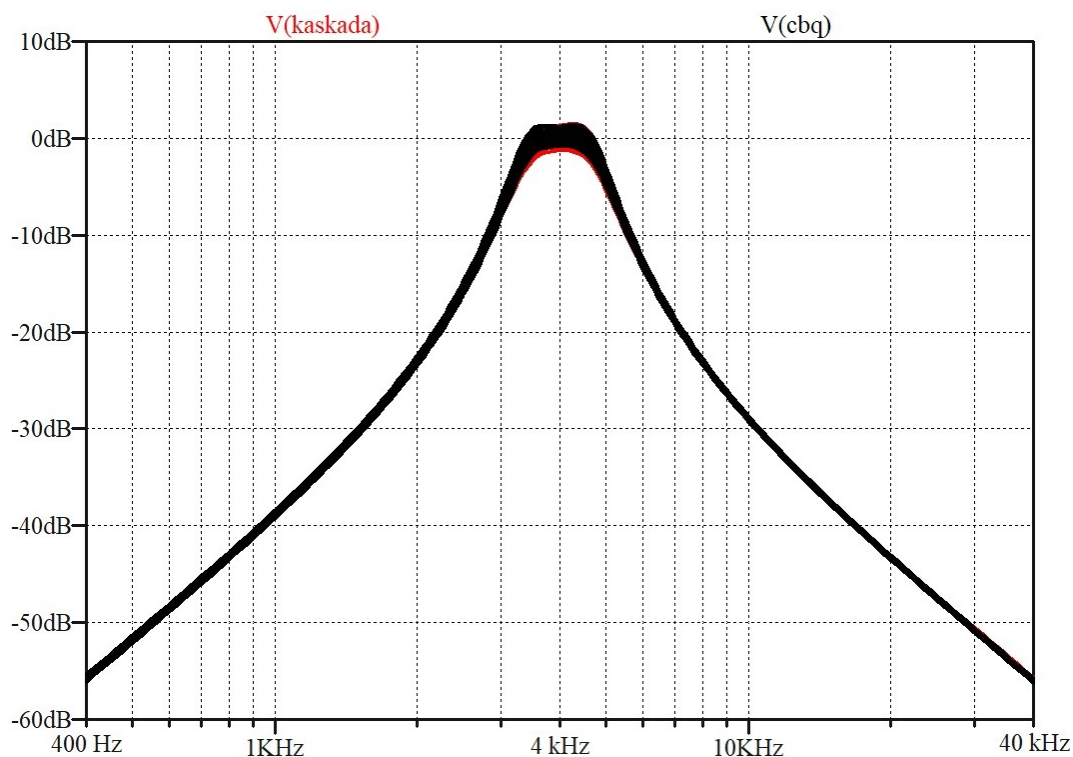


Slika 6.4. Skokovni odziv kaskadne i bikvartne strukture.

## 6.5. Monte Carlo analiza

Monte Carlo analiza je metoda kojom se dobiva osjetljivost filtra. Prikazuje promjenjivost izlaznog signala zbog tolerancije pojedinih elemenata. Za dobivanje osjetljivosti unutar LTSpice-a potrebno je postaviti toleranciju od 1 posto za sve otpornike i kondenzatore, te je potrebno ponoviti 100 iteracija.

Na Slici 6.5 je prikazana osjetljivost za kaskadnu i bikvartnu strukturu. Kao što je vidljivo u području propuštanja je manja osjetljivost kod bikvartne strukture kao što je bilo očekivano i dobiveno u Matlabu na Slici 5.8.



Slika 6.5. Monte Carlo analiza kaskadne i bikvartne strukture.

## 7. TISKANE PLOČICE

U ovom poglavlju je objašnjen proces izrade tiskane pločice u programskom paketu EasyEda. Sheme i izgled tiskanih pločica su realizirane u programu EasyEda. Za vrijednosti otpora su korišteni otpornici reda E24 jer se kasnije koriste u laboratorijskim mjerenjima.

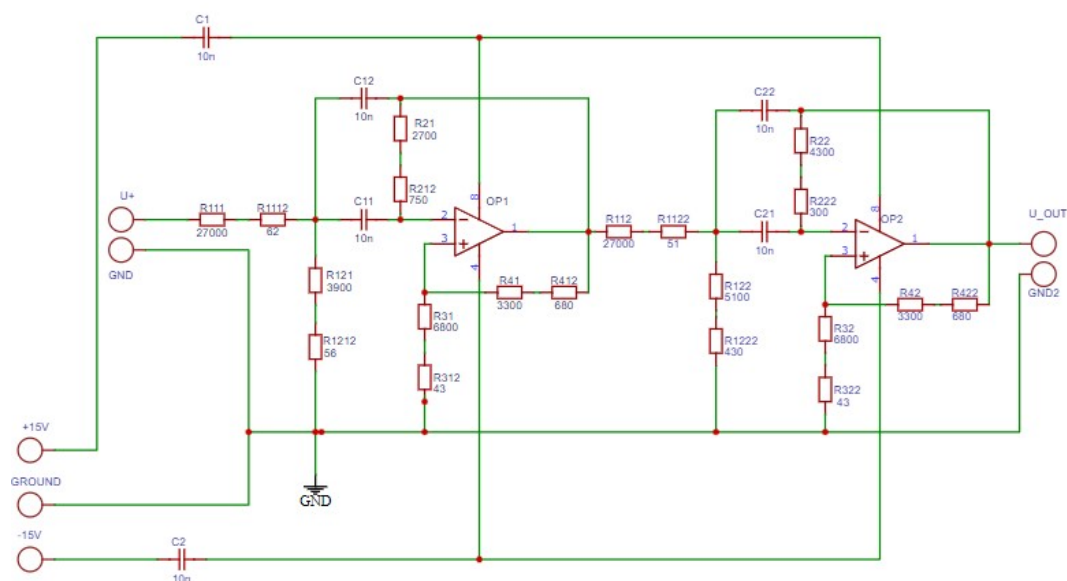
### 7.1. Kaskadna struktura

U Tablici 7.1 su dane realne vrijednosti otpora, kombinacija otpora kojima se dobivaju izračunate vrijednosti otpora i odstupanje od izračunate vrijednosti zbog korištenja reda E24.

Tablica 7.1. Realne vrijednosti elemenata kaskadne strukture.

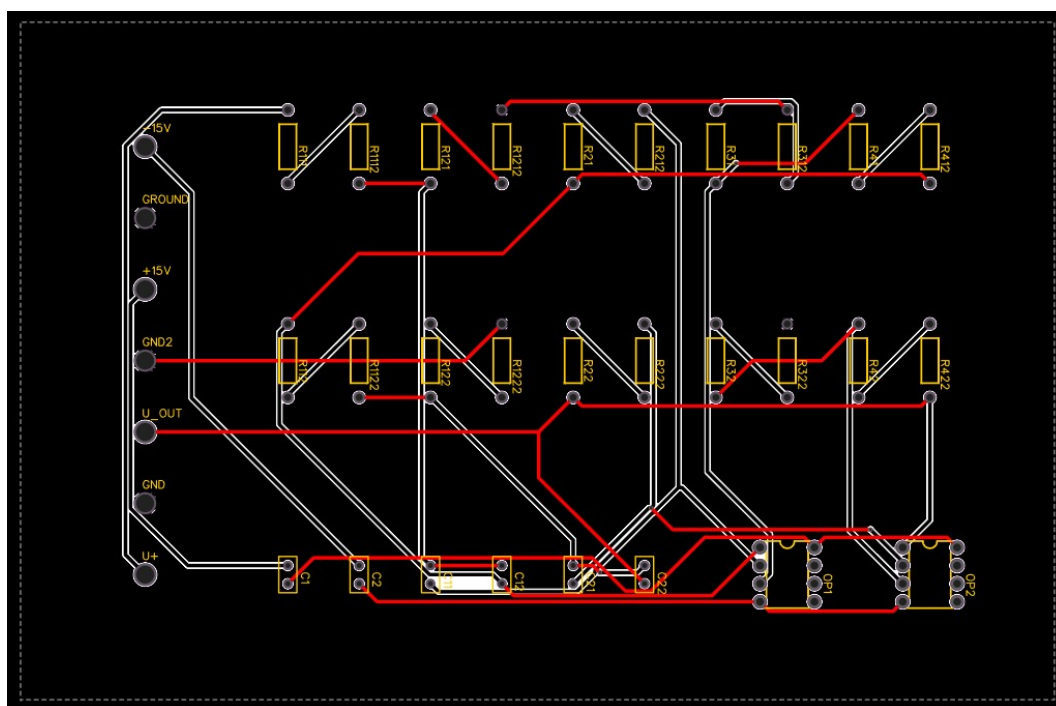
<i>Element</i>	<i>Vrijednost</i>	<i>Kombinacija</i>	<i>Odstupanje</i>
$R_{111}$	27060 $\Omega$	27000 $\Omega$ + 62 $\Omega$	+0.007%
$R_{121}$	3955 $\Omega$	3900 $\Omega$ + 56 $\Omega$	+0.025%
$R_{21}$	3450 $\Omega$	2700 $\Omega$ + 750 $\Omega$	0%
$R_{31}$	6844 $\Omega$	6800 $\Omega$ + 43 $\Omega$	-0.015%
$R_{41}$	3980 $\Omega$	3300 $\Omega$ + 680 $\Omega$	0%
$C_{11}$	10 nF	10 nF	0%
$C_{21}$	10 nF	10 nF	0%
$R_{112}$	27050 $\Omega$	27000 $\Omega$ + 51 $\Omega$	+0.004%
$R_{122}$	5525 $\Omega$	5100 $\Omega$ + 430 $\Omega$	+0.09%
$R_{22}$	4590 $\Omega$	4300 $\Omega$ + 300 $\Omega$	+0.218%
$R_{32}$	6843 $\Omega$	6800 $\Omega$ + 43 $\Omega$	0%
$R_{42}$	3980 $\Omega$	3300 $\Omega$ + 680 $\Omega$	0%
$C_{12}$	10 nF	10 nF	0%
$C_{22}$	10 nF	10 nF	0%

Na Slici 7.1 je prikazana shema kaskadne strukture s kombinacijama otpora iz Tablice 7.1.



Slika 7.1. Shema kaskadne strukture za izradu tiskane pločice.

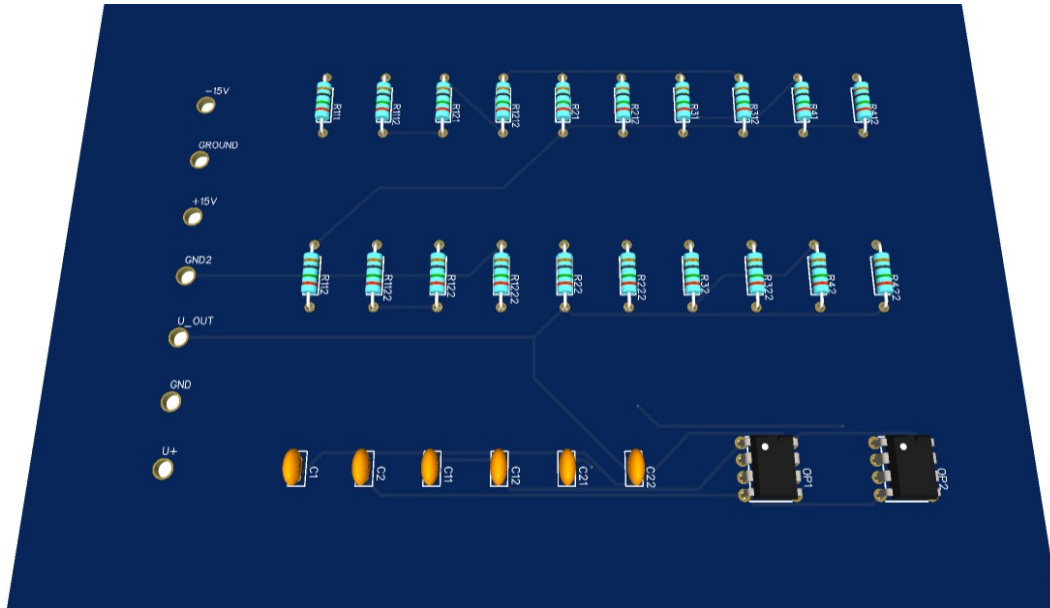
Nakon nacrtu sheme, potrebno je odabrati fizičke izgled elementa koji će se koristiti pri izradi pločice. Potom je potrebno odabrati funkciju 'Convert Schematic to PCB'. Otvara se novi prozor u kojem se naprave redosljedi elemenata te se potom spajaju vodovi. Crvenom bojom su označeni vodovi s gornje strane, dok su s crno označeni vodovi s donje strane pločice. Dimenzije pločica su 150 mm x 100 mm. Nacrt vodova tiskane pločice kaskadnog spoja je prikazan na Slici 7.2.



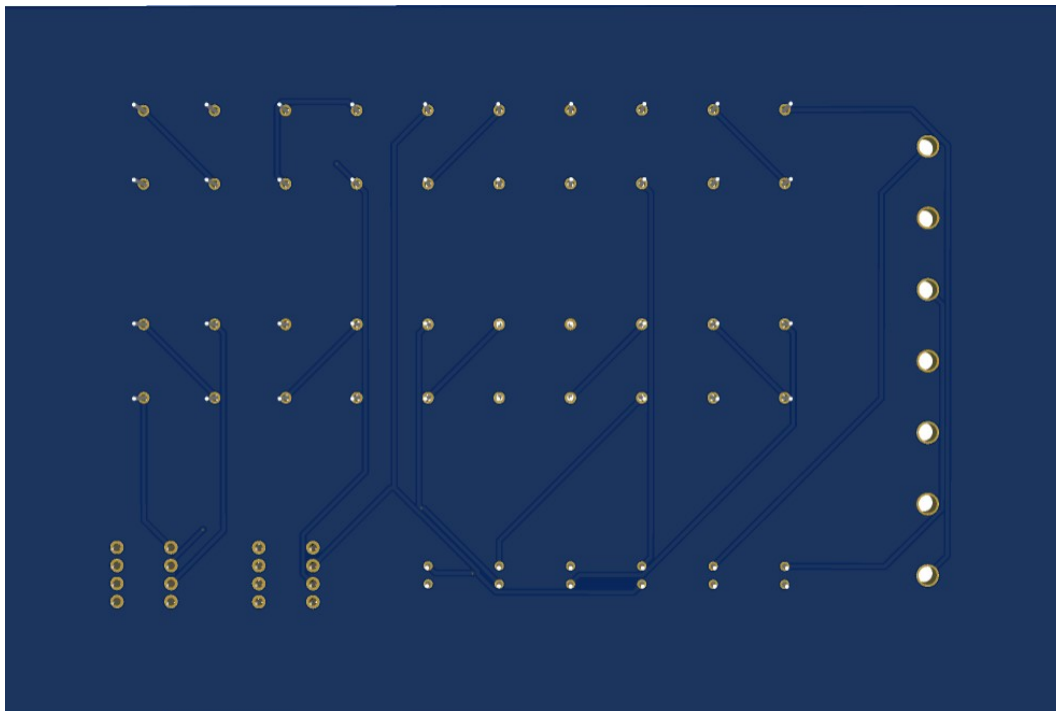
Slika 7.2. Vodovi tiskane pločice kaskadne strukture.



Na Slici 7.3 je prikazan 3D model tiskane pločice za kaskadnu strukturu. Dok su na Slici 7.4 prikazani vodovi tiskane pločice u 3D modelu.



Slika 7.3. 3D prikaz tiskane pločice kaskadne strukture.



Slika 7.4. Vodovi tiskane pločice kaskadne strukture u 3D prikazu.

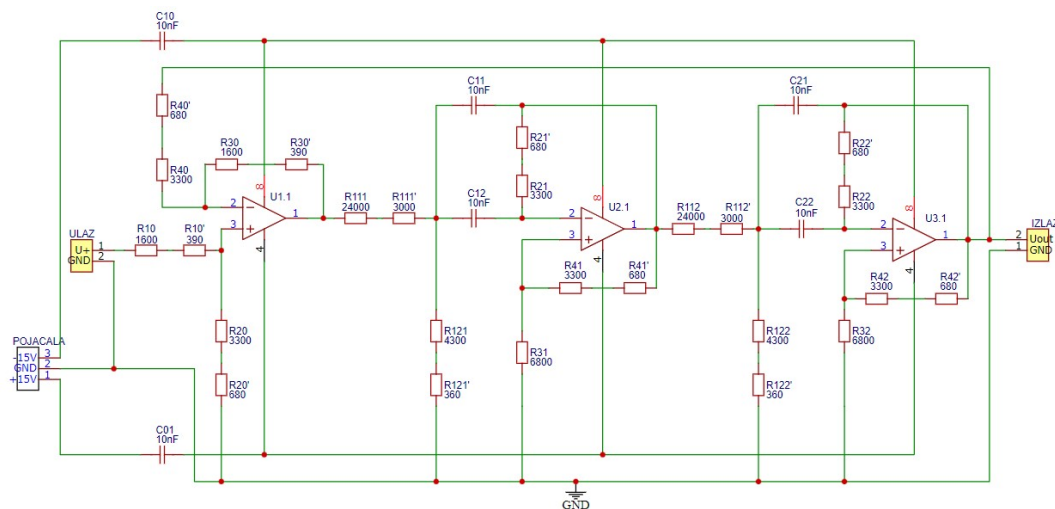
## 7.2. Bikvartna struktura

U Tablici 7.2 su dane realne vrijednosti otpora, kombinacija otpora kojima se dobivaju izračunate vrijednosti otpora i odstupanje od izračunate vrijednosti zbog korištenja reda E24 koji se također koristi pri laboratorijskim mjerenjima.

Tablica 7.2. Realne vrijednosti elemenata bikvartne strukture.

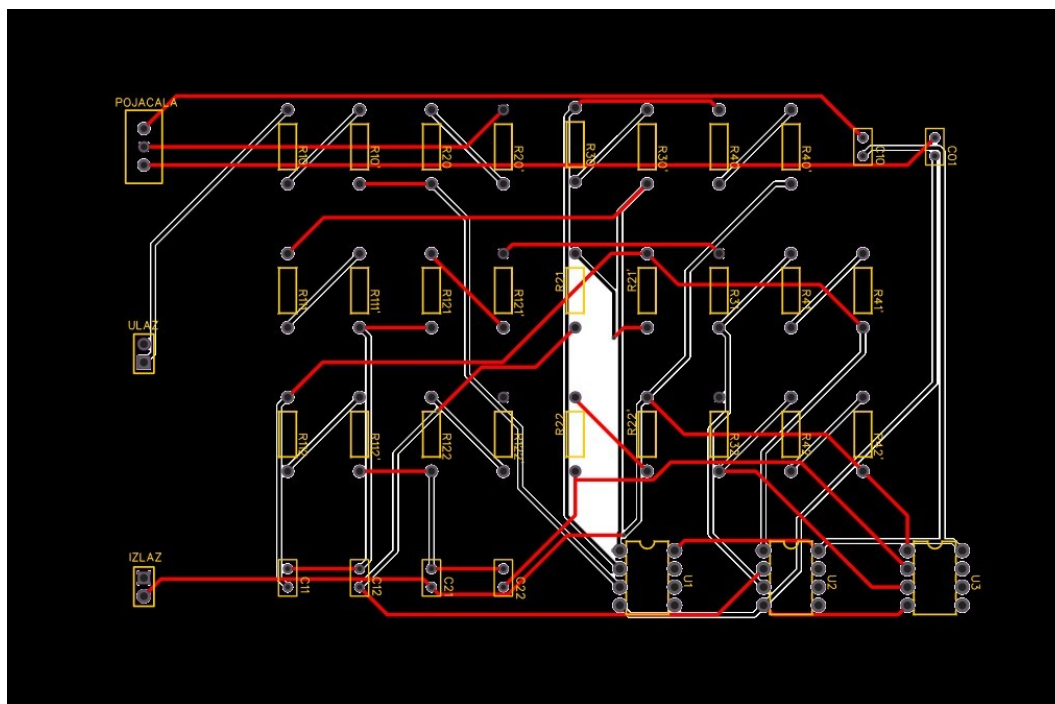
Element	Vrijednost	Kombinacija	Odstupanje
$R_{10}$	$1990\Omega$	$1600\Omega + 390\Omega$	0%
$R_{20}$	$3980\Omega$	$3300\Omega + 680\Omega$	0%
$R_{30}$	$1990\Omega$	$1600\Omega + 390\Omega$	0%
$R_{40}$	$3980\Omega$	$3300\Omega + 680\Omega$	0%
$R_{111}$	$27030\Omega$	$24000\Omega + 3000\Omega$	-0.111%
$R_{121}$	$4667\Omega$	$4300\Omega + 360\Omega$	-0.15%
$R_{21}$	$3980\Omega$	$3300\Omega + 680\Omega$	0%
$R_{31}$	$6834\Omega$	$6800\Omega$	-0.498%
$R_{41}$	$3980\Omega$	$3300\Omega + 680\Omega$	0%
$C_{11}$	10 nF	10nF	0%
$C_{21}$	10 nF	10nF	0%
$R_{112}$	$27030\Omega$	$24000\Omega + 3000\Omega$	-0.111%
$R_{122}$	$4667\Omega$	$4300\Omega + 360\Omega$	-0.15%
$R_{22}$	$3980\Omega$	$3300\Omega + 680\Omega$	0%
$R_{32}$	$6834\Omega$	$6800\Omega$	-0.498%
$R_{42}$	$3980\Omega$	$3300\Omega + 680\Omega$	0%
$C_{12}$	10nF	10 nF	0%
$C_{22}$	10nF	10 nF	0%

Na Slici 7.5 je prikazana shema bikvartne strukture s vrijednostima elemenata iz Tablice 7.2.



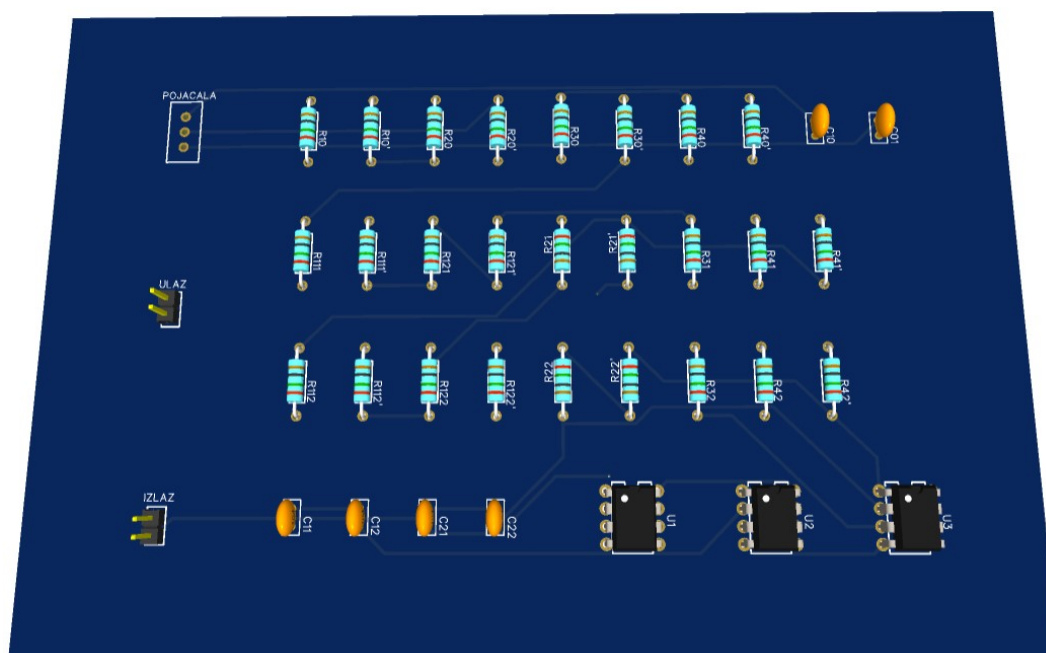
Slika 7.5. Shema bikvartne strukture za izradu tiskane pločice.

Potom je opet napravljen raspored elemenata na pločici te su na Slici 7.6 prikazani vodovi. Crvenom bojom su označeni vodovi s gornje strane pločice, dok su crnom označeni vodovi s donje strane pločice. Radi velikog broja elemenata vodovi su na obje strane pločice.

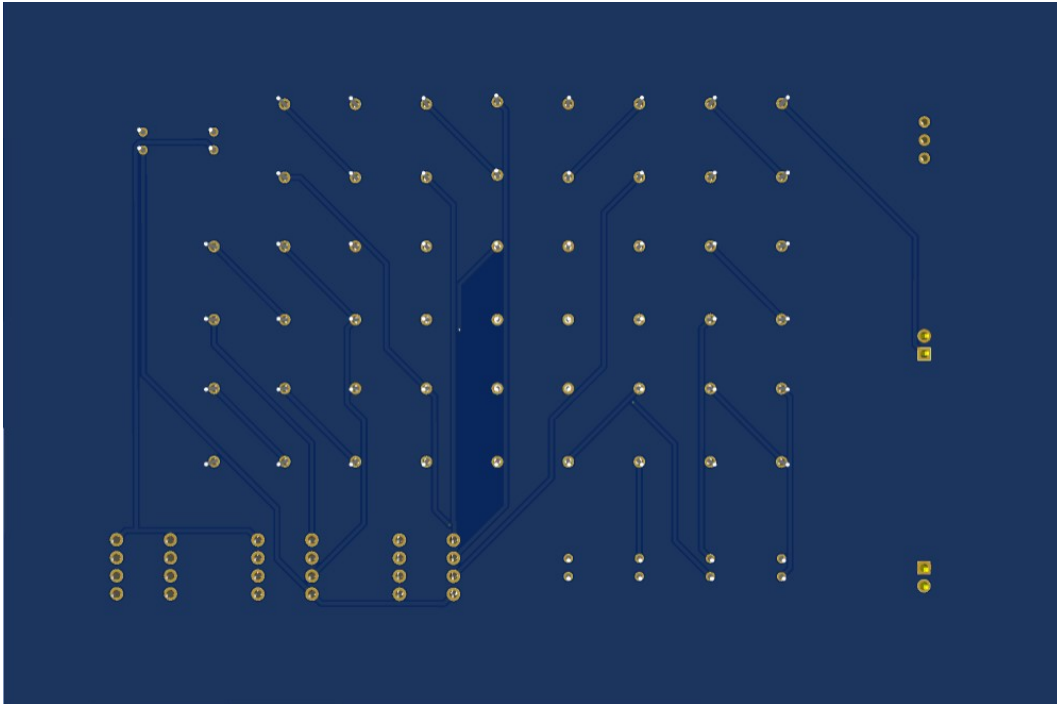


Slika 7.6. Vodovi tiskane pločice bikvartne strukture.

Na Slici 7.7 i Slici 7.8 je prikazan 3D izgled pločice s gornje i donje strane te je prikazan raspored elemenata i svi vodovi.



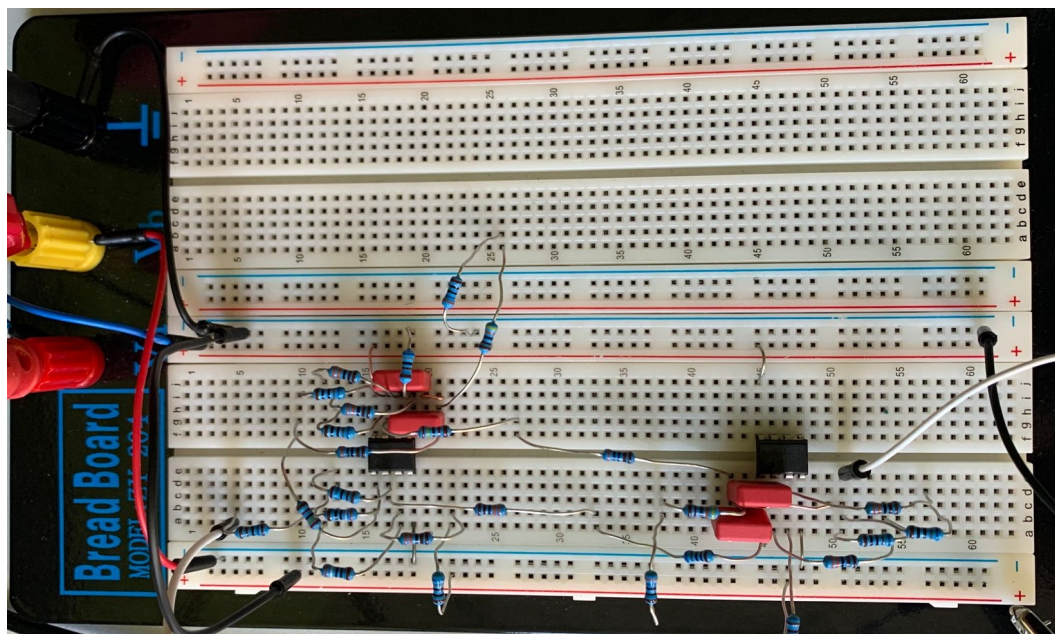
Slika 7.7. 3D prikaz tiskane pločice bikvartne strukture.



*Slika 7.8. 3D prikaz ostalih vodova tiskne pločice bikvartne strukture.*

## 8. LABORATORIJSKA MJERENJA

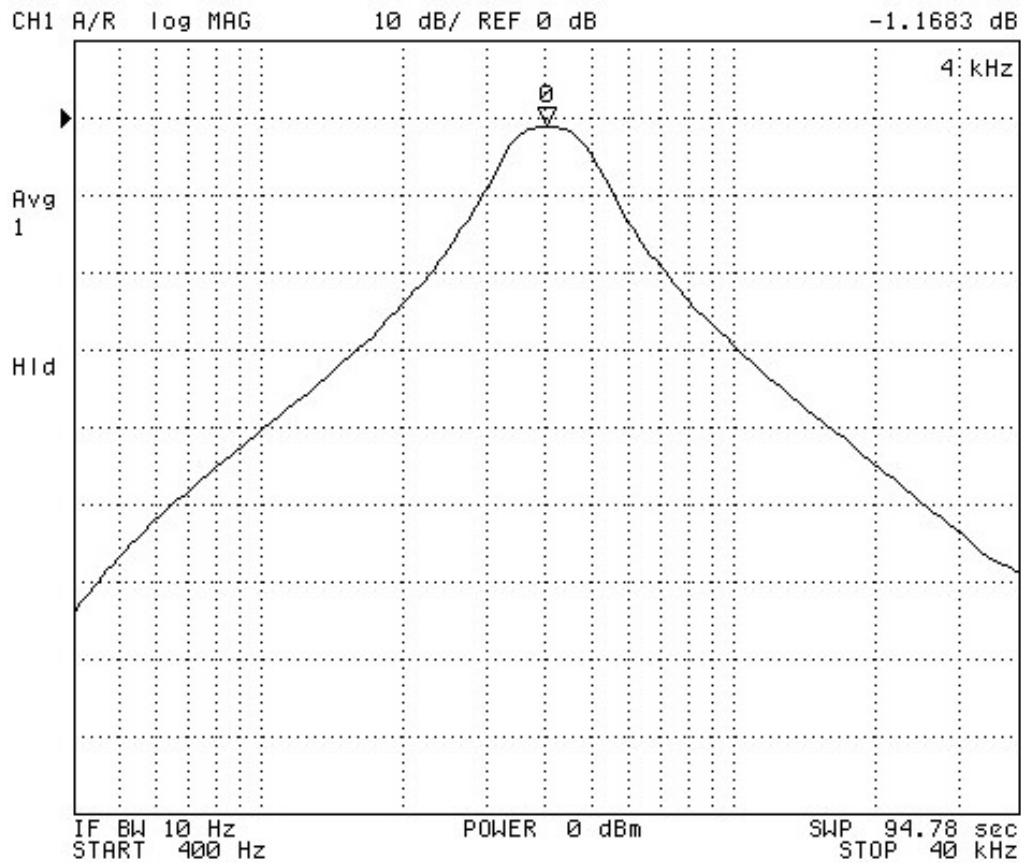
Nakon svih proračuna i simulacija bilo je potrebno filter realizirati i izmjeriti vrijednosti u laboratoriju. Svi elementi su spojeni na eksperimentalnoj pločici, kao na Slici 7.5, što je prikazano na Slici 8.1. Korišteni su otpornici reda E24, četiri kondenzatora, te dva operacijska pojačala 'TL082cp'.



Slika 8.1. Spoj filtra na eksperimentalnoj pločici.

Mrežnim analizatorom Agilent 4395A su dobivene amplitudna i fazno frekvencijska karakteristika te grupno vrijeme kašnjenja. Na ulazu u mrežni analizator se javlja pojačanje od 6 dB, te je potrebno dodati pojačalo koje će smanjiti pojačanje za 6 dB da bi ukupno pojačanje filtra bilo 1. Razlozi odstupanja dobiveni tijekom mjerenja su zbog neidealnost elemenata. Svi otpornici su u granici odstupanja od  $\pm 0.5\%$ , međutim kondenzatori su vrijednosti 9.8 nF što daje odstupanje od 2%.

Na Slici 8.2 je prikazana amplitudno frekvencijska karakteristika koja je dobivena na mrežnom analizatoru. Kao što je vidljivo sa slike postoji gušenje od -1.1683 dB na graničnoj frekvenciji. Usporedbom sa Slikom 6.1 se vidi sličnost karakteristika te se time potvrđuje da su prototip i sklop dobro napravljeni.



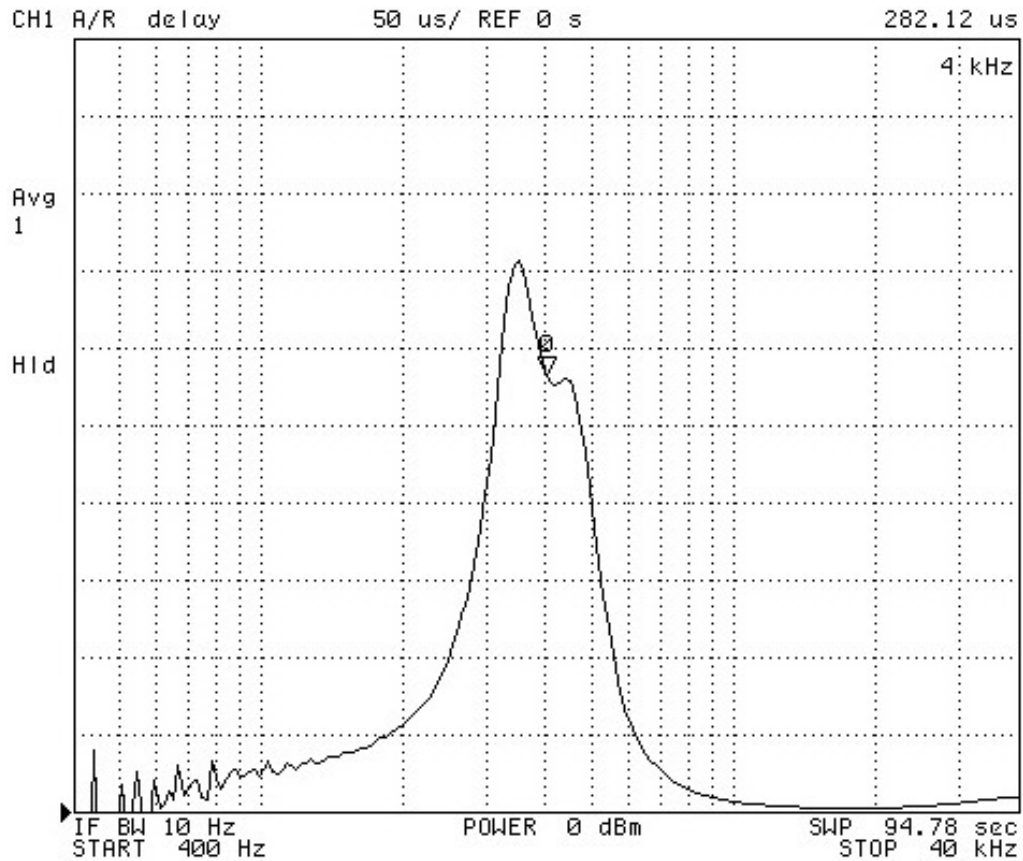
Slika 8.2. Amplitudno frekvencijska karakteristika dobivena mrežnim analizatorom.

Na Slici 8.3 je prikazana fazno frekvencijska karakteristika dobivena pomoću mrežnog analizatora. U području oko granične frekvencije je vidljiva nelinearnost fazne karakteristike, te na graničnoj frekvenciji faza ne odstupa previše. Na višim frekvencijama dolazi do izobličenja faze, međutim to ne utječe na izlazni signal. Usporedbom sa Slikom 6.2 se vidi sličnost.



Slika 8.3. Fazno frekvencijska karakteristika dobivena mrežnim analizatorom.

Na Slici 8.4 je prikazano grupno vrijeme kašnjenja dobiveno pomoću mrežnog analizatora. Na graničnoj frekvenciji je kašnjenje 282 mikrosekunde, te usporedbom sa Slikom 6.3 je vidljivo da je vrijeme kašnjenja jednako za graničnu frekvenciju. Vrhovi prije i nakon granične frekvencije su nešto manji nego oni dobiveni u LTSpice-u, ali razlog tomu je neidealnost elemenata.



Slika 8.4. Grupno vrijeme kašnjenja dobiveno mrežnim analizatorom.



## 9. ZAKLJUČAK

U diplomskom radu je provedena realizacija Butterworthovog filtra četvrtog reda kaskadne i bikvartne strukture. Provedeni su proračuni, simulacije i mjerenja kako bi se utvrdila točnost realizacije samog filtra. Bilo je potrebno prikazati prijenosne funkcije, položaje polova i nula, amplitudnu i fazno frekvencijsku karakteristiku, grupno vrijeme kašnjenja, impulsni i skokovni odziv, Schofflerovu osjetljivost i Monte Carlo analizu. Proračuni su se radili u programskom paketu Matlab, dok su simulacije izvedene u LTSpice-u. Tiskana pločica je realizirana u programu EasyEda, te su na posljetku provedena laboratorijska mjerenja pomoću mrežnog analizatora.

U poglavlju broj dva su provedeni proračuni za normirane vrijednosti filtra. Preko polova i nula, te impulsnog i skokovnog odziva se utvrđuje stabilnost sustava koja je bila zadovoljena. Također su dobivene amplitudno i fazno frekvencijska karakteristike, te grupno vrijeme kašnjenja. Sve karakteristike su jednake za kaskadnu i bikvartnu strukturu jer se radi o istom filtru samo što bikvartna struktura sadrži povratnu vezu. U trećem poglavlju su izračunate denormirane vrijednosti pomoću kojih se vrši daljnja analiza filtra. Vrijednosti elemenata za kaskadnu i bikvartnu strukturu su odrađene u poglavlju četiri. Te vrijednosti su se kasnije koristile za simulaciju i laboratorijska mjerenja. U petom poglavlju je odrađena Schofflerova osjetljivost za obje strukture. Očekivanje je bilo da će osjetljivost bikvartne strukture biti manja što je i dobiveno u proračunima. Glavni razlog tomu je povratna veza, međutim ona povećava kompleksnost i složenost izračunavanja. Potom u šestom poglavlju su odrađene simulacije u programskom paketu LTSpice. Pomoću njih su provjerene karakteristike dobivene u Matlabu. Monte Carlo analizom je dokazano da je u području propuštanja osjetljivost bikvartne strukture manja nego kod kaskadne. U sedmom poglavlju su prikazane tiskane pločice izrađene u programu EasyEda. Na posljetku u osmom poglavlju su prikazane vrijednosti laboratorijskih mjerenja provedene pomoću mrežnog analizatora kojima se potvrđuje točnost proračuna.

Proračunima i simulacijama je dokazano da kaskadna i bikvartna struktura PP filtra imaju jednake vrijednosti. Jedina razlika je u osjetljivosti pojedinih struktura. Bikvartna struktura ima manju osjetljivost od kaskadne kao što je bilo i očekivano. Laboratorijskim mjerenjima je dokazano da su vrijednosti elemenata i ostali proračuni dobri. Karakteristike su jako slične čime se potvrđuje dobra realizacija filtra. Problem je velik broj elemenata na eksperimentalnoj pločici i neidealnost elemenata. Da bi se dobili što točniji rezultati potrebno je uzeti red E96 za vrijednost otpora te je potrebno eksperimentalnu pločicu zamijeniti s tiskanom pločicom sa zalemljenim elementima.

## Literatura

- [1] Stojković N., Mijat N.: "Analogna obrada signala", Sveučilište u Rijeci - Tehnički fakultet, Rijeka 2005.
- [2] Šverko Z., Stojković N., Vlahinić S., Markovinović I. "Noise and sensitivity comparison for different BP filter designs", Rijeka
- [3] Šverko Z.: "NP filter 5. reda sa SIR aproksimacijom", Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci – Tehnički fakultet, Rijeka 2017.
- [4] Jurišić D.: "Postupak direktnog proračuna parametara generaliziranih fff-sekcija (bikvartnih sekcija)", Zagreb 1993.

## Sažetak i ključne riječi

U diplomskom radu je obrađen proračun i analiza Butterworthovog pojasno propusnog filtra četvrtog reda za kaskadnu i bikvartnu strukturu. Normirane i denormirane vrijednosti su proračunate pomoću Matlab programskog paketa. Simulacije i provjere su rađene u programskom paketu LTSpice. Izrada tiskane pločice je napravljena u programu EasyEda, te je na postljetku napravljeno laboratorijsko mjerenje na mrežnom analizatoru kojim se dokazala ispravnost filtra.

**Ključne riječi:** amplitudno frekvencijska karakteristika, bikvartna struktura, Butterworthova aproksimacija, fazno frekvencijska karakteristika, grupno vrijeme kašnjenja, kaskadna struktura, laboratorijska mjerenja, Monte Carlo analiza, mrežni analizator, pojasno propusni filter, polovi i nule, Schofflerova osjetljivost, tiskane pločice

## Summary and key words

The task of master thesis was to calculate and analyze Butterworth bandwidth filter of the fourth order for cascade and biquart structure. Normalized and denormalized values were calculated using the Matlab software package. Simulations and checks were done in LTSpice software package. Creation of printed circuit boards was done using EasyEda program. Laboratory measurement was made on network analyzer which proved the correctness of the filter.

**Keywords:** amplitude frequency characteristic, bandwidth filter, biquart structure, Butterworth approximation, cascade structure, group delay time, laboratory measurements, Monte Carlo analysis, network analyzer, PCB layout, phase frequency characteristic, poles and zeros, Schoffler sensitivity

**Dodatak A**

Tablica 9.1. Parametri polova prijenosnih funkcija filtra s aproksimacijom po Butterworthu. [1]

$n$	$Re$	$Im$	$Q_p$	$\omega_p$	Faktori nazivnika
1	-1	0	-	1	$s + 1$
2	-0.7071068	$\pm 0.7071068$	0.7071068	1	$s^2 + 1.4142136s + 1$
3	-1	0	-	1	$s + 1$
	-0.5	$\pm 0.8660254$	1	1	$s^2 + s + 1$
4	-0.9238795	$\pm 0.3826834$	0.5411961	1	$s^2 + 1.1847759s + 1$
	-0.3826834	$\pm 0.9238795$	1.3065630	1	$s^2 + 0.7653668s + 1$
5	-1	0	-	1	$s + 1$
	-0.809017	$\pm 0.5877852$	0.6180340	1	$s^2 + 1.618034s + 1$
	-0.309017	$\pm 0.9510565$	1.6180340	1	$s^2 + 0.618034s + 1$
6	-0.9659258	$\pm 0.258819$	0.5176381	1	$s^2 + 1.9318516s + 1$
	-0.7071068	$\pm 0.7071068$	0.7071068	1	$s^2 + 1.4142136s + 1$
	-0.258819	$\pm 0.9659258$	1.9318520	1	$s^2 + 0.5717638s + 1$
7	-1	0	-	1	$s + 1$
	-0.9009689	$\pm 0.4338837$	0.5549581	1	$s^2 + 1.8019378s + 1$
	-0.6234898	$\pm 0.7818315$	0.8019377	1	$s^2 + 1.2469796s + 1$
	0.2225209	$\pm 0.9749279$	2.2469799	1	$s^2 + 0.4450418s + 1$
8	-0.9807853	$\pm 0.1950903$	0.5097956	1	$s^2 + 1.9615706s + 1$
	-0.8314696	$\pm 0.5555702$	0.6013449	1	$s^2 + 1.6629392s + 1$
	-0.5555702	$\pm 0.8314696$	0.8999763	1	$s^2 + 1.1111404s + 1$
	-0.1950903	$\pm 0.9807853$	2.5629158	1	$s^2 + 0.3901806s + 1$
9	-1	$0 \pm 0.3420201$	-	1	$s + 1$
	-0.9396926	$\pm 0.3420201$	0.5320889	1	$s^2 + 1.8793852s + 1$
	-0.7660444	$\pm 0.6427876$	0.6527037	1	$s^2 + 1.5320888s + 1$
	-0.5	$\pm 0.8660254$	1	1	$s^2 + s + 1$
	-0.1736482	$\pm 0.9848078$	2.8793850	1	$s^2 + 0.3472964s + 1$
10	-0.9876883	$\pm 0.1564345$	0.5062326	1	$s^2 + 1.9753766s + 1$
	-0.8910065	$\pm 0.4539905$	0.5611631	1	$s^2 + 1.782013s + 1$
	-0.7071068	$\pm 0.7071068$	0.7071068	1	$s^2 + 1.4142136s + 1$
	-0.4539905	$\pm 0.891006$	1.1013446	1	$s^2 + 0.907981s + 1$
	-0.1564345	$\pm 0.9876683$	3.1962258	1	$s^2 + 0.312869s + 1$