

Proračun osjetljivosti i šuma VP filtra 5. reda

Jerković, Toni

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:190:630308>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-18**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

PRORAČUN OSJETLJIVOSTI I ŠUMA VP FILTRA 5. REDA

Rijeka, svibanj 2024

Toni Jerković

0069086075

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

PRORAČUN OSJETLJIVOSTI I ŠUMA VP FILTRA 5. REDA

Mentor: prof. dr. sc. Nino Stojković

Rijeka, svibanj 2024

Toni Jerković

0069086075

Rijeka, 28.02.2024.

Zavod: Zavod za automatiku i elektroniku
Predmet: Analogna obrada signala

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Toni Jerković (0069086075)**
Studij: Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike (1300)
Modul: Automatika (1331)

Zadatak: **Proračun osjetljivosti i šuma VP filtra 5. reda / Sensitivity and Noise calculation of 5th-order HP Filter**

Opis zadatka:

Potrebno je realizirati Chebyshevljevi VP filtar 5. reda u kaskadnoj strukturi. Odrediti prijenosnu funkciju, raspored polova i nula, frekvencijske karakteristike, vremenske karakteristike te vrijednosti elemenata filtra. Izvršiti proračun šuma i osjetljivosti. 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 pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
prof. dr. sc. Nino Stojković

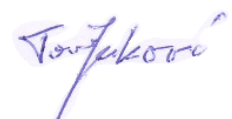
Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:
prof. dr. sc. Dubravko Franković

IZJAVA

U skladu sa člankom 9. te 1. stavkom Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta u Rijeci od 29. lipnja 2011., izjavljujem da sam samostalno izradio ovaj diplomski rad.

Rijeka, svibanj 2024

Toni Jerković



SADRŽAJ

1. UVOD.....	3
2. ELEKTRIČNI FILTRI.....	4
2.1. Prijenosna funkcija filtra.....	4
2.2. Frekvencijska karakteristika.....	5
2.3. Filtarske aproksimacije i filtarske strukture višeg reda.....	6
2.3.1. Chebysheva aproksimacija.....	8
2.3.2. Kaskadni spoj.....	9
2.4. Vremenski odzivi.....	10
2.4.1. Impulsni odziv.....	10
2.4.2. Skokovni odziv.....	10
2.5. Osjetljivost filtarskih karakteristika.....	11
2.5.1. Schoefflerova osjetljivosti.....	11
2.5.2. Monte Carlo analiza.....	12
2.6. Šum.....	12
3. ANALIZA NORMIRANIH KARAKTERISTIKA.....	14
3.1. Normirana prijenosna funkcija.....	14
3.2. Normirani polovi i nule.....	14
3.3. Normirane frekvencijske karakteristike.....	15
3.3.1. Amplitudno frekvencijska karakteristika.....	15
3.3.2. Fazno frekvencijska karakteristika.....	18
3.3.3. Karakteristika grupnog kašnjenja.....	19
3.4. Normirani vremenski odzivi.....	19
3.4.1. Impulsni odziv.....	19
3.4.2. Skokovni odziv.....	20
3.5. Proračun parametara normiranih filtarskih sekcija.....	21
4. ANALIZA DENORMIRANIH KARAKTERISTIKA.....	25
4.1. Denormirana prijenosna funkcija.....	25
4.2. Denormirani polovi i nule.....	25
4.3. Denormirane frekvencijske karakteristike.....	26

4.3.1. Amplitudno frekvencijska karakteristika.....	27
4.3.2. Fazno frekvencijska karakteristika.....	28
4.3.3. Karakteristika grupnog kašnjenja.....	29
4.4. Denormirani vremenski odzivi.....	30
4.4.1. Impulsni odziv.....	30
4.4.2. Skokovni odziv.....	31
4.5. Proračun denormiranih elemenata.....	32
5. PRORAČUN OSJETLJIVOSTI.....	34
6. PRORAČUN GUSTOĆE ŠUMA.....	37
7. SIMULACIJA U SPICE PROGRAMU.....	40
7.1. Frekvencijske karakteristike i vremenski odzivi.....	40
7.2. Monte Carlo analiza.....	43
7.3. Šum.....	44
8. LABORATORIJSKA REALIZACIJA.....	48
9. IZRADA TISKANE PLOČICE.....	53
10. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	57
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	58
ABSTRACT AND KEYWORDS.....	59
POPIS SLIKA I TABLICA.....	60

1. UVOD

Električni filter je električni sklop ili sustav kojim se omogućava promjenu spektralnih svojstava električnog signala. Filter može mijenjati amplitudu ili fazu frekvencijskih sastavnica signala dovedenih na ulaz. Uglavnom se neke komponente signala propuštaju ili prigušuju, takvim djelovanjem se odvajaju korisni signali od šuma ili smetnji.[1]

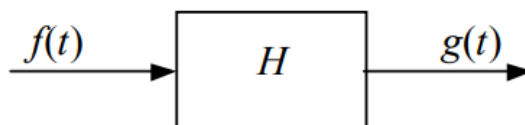
U ovom diplomskom radu izvršit će se analiza i realizacija visoko propusnog filtra 5. reda s aproksimacijom po Chebyshevu u kaskadnoj strukturi. Analiza započinje normiranom prijenosnom funkcijom, te izračunom amplitudno-frekvencijske karakteristike, grupnog kašnjenja, rasporeda polova i nula, te izračunom impulsnog i skokovnog odziva. Nakon izračuna normirane prijenosne funkcije može se prijeći na denormiranje prijenosne funkcije na graničnu frekvenciju od 4 kHz. Zatim se ponavljaju izračuni amplitudno-frekvencijske karakteristike, grupnog kašnjenja, raspored polova i nula, te se izračunava osjetljivost i šum. Normirani i denormirani izračun će se izvršiti upotrebom računalnog programa „Matlab”[2], zatim će se izvršiti provjera dobivenih rezultata u SPICE programu „QSPICE”[3]. Nakon provjere rezultata izračuna može se prijeći na fizičku realizaciju, te će se mjerenje izvršiti osciloskopom i mrežnim analizatorom „Agilent 4395A”. Potvrdom ispravnosti rada filtra može se prijeći na dizajn tiskane pločice u programu za dizajn tiskanih pločica „KiCAD” [4].

2. ELEKTRIČNI FILTRI

U ovom poglavlju opisuje se teorijska pozadina električnih filtara, te se vrši podjela električnih filtara. Nakon podjele električnih filtara se prelazi na izračun amplitudno-frekvencijske karakteristike, grupnog kašnjenja, osjetljivosti, te šuma.

2.1. Prijenosna funkcija filtra

Predstavlja matematičku funkciju koja modelira izlaz iz filtra za svaku moguću ulaznu funkciju. Sustav je linearan i vremenski nepromjenjiv.



Slika 2.1. Prikaz sustava pobude i odziva

U vremenskoj domeni izlaz iz prijenosne funkcije filtra jednak je konvoluciji impulsnog odziva filtra i ulazne funkcije.

$$g(t) = \int_0^{\infty} h(t-\tau) f(\tau) dt \quad (2.1)$$

Primjenom Laplaceove transformacije na (2.1), dobije se izraz za prijenosnu funkciju filtra.

$$G(s) = H(s)F(s) \quad (2.2)$$

Preoblikovanjem (2.2) dobije se izraz za prijenosnu funkciju, gdje je s kompleksna varijabla koja sadrži imaginarni i realni dio.

$$H(s) = \frac{G(s)}{F(s)} \quad (2.3)$$

Funkcija $F(s)$ se naziva prijenosna funkcija filtra. Prijenosna funkcija filtra može se dobiti na više načina upotrebom raznih metoda rješavanja električnih krugova, kao što su metoda napona

čvorova, prvi i drugi Kirchhoffov zakon. Dobiye se n-jednadžbi s n-nepoznanica, a primjenom Laplaceove transformacije dobiju se algebarske jednadžbe. Rješavanjem postavljenih jednadžbi moguće je dobiti vezu između pobude i odziva nekog električnog kruga ili električnog filtra.

$$G(s) \sum_{m=0}^M a_m s^m = F(s) \sum_{n=0}^N b_n s^n \quad (2.4)$$

Nakon izlučivanja iz funkcije (2.4) dobije se:

$$H(s) = \frac{G(s)}{F(s)} = \frac{\sum_{m=0}^M a_m s^m}{\sum_{n=0}^N b_n s^n} \quad (2.5)$$

Što daje prijenosnu funkciju filtra, koji je određen koeficijentima u brojniku i nazivniku. Poznavanjem iznosa koeficijenata prijenosna funkcija filtra je potpuno određena. Faktorizacijom prijenosne funkcije $H(s)$ mogu se izračunati polovi i nule prijenosne funkcije.

$$H(s) = k \frac{(s-s_{oM})(s-s_{oM-1})+..+(s-s_{o1})}{(s-s_{pN})(s-s_{pN-1})+..+(s-s_{p1})} = \frac{\prod_{m=1}^M (s-s_{om})}{\prod_{n=1}^N (s-s_{pn})}, \quad k = \frac{a_m}{b_n} \quad (2.6)$$

Korijeni polinoma u brojnik s_{om} predstavljaju nule funkcije. Iznos kompleksne frekvencije pri kojima je iznos funkcije jednak nula. Dok je s_{pn} predstavlja polove funkcije. To je iznos kompleksne frekvencije pri kojima je iznos funkcije beskonačan. Poznavanjem rasporeda nula i polova u potpunosti se opisuje prijenosna funkcija filtra.

2.2. Frekvencijska karakteristika

Predstavlja odziv sustava u stacionarnom stanju na sinusoidalnu funkciju. Pri kojoj kompleksna frekvencija s prijelazi u $j\omega$.

$$H(j\omega) = H(s)|_{s=j\omega} \quad (2.7)$$

Zapis funkcije može se izvršiti u pravokutnim koordinatama ili u polarnim koordinatama. Prikaz polarnog zapisa broja.

$$H(j\omega) = |H(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)} \quad (2.8)$$

Član $|H(\omega)|$ predstavlja amplitudno-frekvencijsku karakteristiku filtra, dok $\varphi(\omega)$ određuje faznu karakteristiku filtra. Amplitudno djelovanje na spektar signala se upotrebljava kod obrade signala, npr. uklanjanje neželjenih frekvencijskih komponenti. Te se može djelovati na fazni dio spektra, međutim promjenom faze može se izvršiti korekcija grupnog kašnjenja filtra.

Izračun amplitudne karakteristike:

$$|H(j\omega)| = \sqrt{(\Re[H(j\omega)])^2 + (\Im[H(j\omega)])^2} \quad (2.9)$$

Izračun fazne karakteristike:

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{\Im[H(j\omega)]}{\Re[H(j\omega)]}\right) \quad (2.10)$$

Primjenom derivacije na faznu frekvencijsku karakteristiku može se izračunati grupno kašnjenje filtra. Fazno kašnjenje je mjera koja govori koliko će vremena trebati ulaznom signalu neke frekvencije da signal sigao do izlaza iz filtra.

$$T_g(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \quad (2.11)$$

2.3. Filtarske aproksimacije i filtarske strukture višeg reda

Filtarske aproksimacije omogućavaju realizaciju filtara. Međutim nije moguće postići idealne karakteristike filtra u kojima je izlaz iz filtra u području gušenja jednak nula, dok je u području propuštanja izlazna amplituda jednaka ulaznoj (ili ovisno o pojačanju filtra). Prilikom realizacije

filtrara polazi se od niskopropusnog prototipa, te se primjenom frekvencijske transformacije dobivaju ostale vrste filtara. Kod realizacije niskopropusnog prototipa filtra moraju biti zadovoljeni zahtjevi kao što su specifikacija, stabilnost i izvedivost. Osim osnovnih specifikacija mogu biti i zadane specifikacije koje se postižu određenim tipovima aproksimacija, kao što je maksimalno glatka Butterworthova transformacija, transformacija s valovitošću u području propuštanja ili Chebysheva transformacija, aproksimacija s linearnom fazom odnosno Besselova transformacija ili aproksimacija s konačnim nulama ili Cauerova transformacija. Nakon odabira pogodne transformacije i pogodnog niskopropusnog filtra, može se prijeći na simulaciju odziva u nekom odgovarajućem programskom paketu.

Tablica 2.1. Transformacije NP prototipa filtra

Transformacija	NP-NP	NP-VP	NP-PP	NP-PB
Supstitucija	$s \rightarrow \frac{s}{\omega_g}$	$s \rightarrow \frac{\omega_g}{s}$	$s \rightarrow \frac{s^2 + \omega_0^2}{Bs}$	$s \rightarrow \frac{Bs}{s^2 + \omega_0^2}$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_d \cdot \omega_g} \quad (2.12)$$

$$B = \omega_g - \omega_d \quad (2.13)$$

Gdje je:

- ω_g – granična frekvencija
- ω_0 – centralna frekvencija (2.12)
- B – širina pojasa (2.13)

Filtarske strukture višeg reda se upotrebljavaju kod realizacije filtara višeg reda. Prilikom odabira strukture treba voditi računa o osjetljivosti pojedine strukture, neke realizacije imaju veću osjetljivost, a neke manju. Implementacijom povratne veze se smanjuje osjetljivost filtra. Postoje dvije skupine filtarskih struktura višeg reda. Prvu čine strukture bazirane na simulaciji

prijenosne funkcije varijablama stanja, a to su kaskadna struktura, struktura bikvarta i „Follow the leader feedback”. Dok drugu skupinu čine strukture zasnovane na simulaciji pasivnih RLC filtara, a to su strukture s frekvencijski negativnim otporima i „Leap frog” struktura.[5]

2.3.1. Chebysheva aproksimacija

Standardna aproksimacija filtara koja se redovito upotrebljava u praksi. Daje amplitudnu karakteristiku jednaku idealnoj na frekvenciji $\omega=0$. Chebysheva aproksimacija ima više jednostrukih nula unutar područja propuštanja, što daje funkciju oblika

$$|K(j\omega)|^2 = \varepsilon^2 T_n^2(\omega) \quad (2.14)$$

Gdje je:

- $T(\omega)$ – Chebyshev polinom n-tog stupnja
- ε – valovitost u području propuštanja

Chebyshev polinom se računa:

$$T_n(\omega) = \begin{cases} \cos(n \cdot \arccos(\omega)) & |\omega| \leq 1 \\ \cosh(n \cdot \operatorname{arch}(\omega)) & |\omega| \geq 1 \end{cases} \quad (2.15)$$

Ostali polinom se dobivaju preko rekurzivne formule:

$$T_n(\omega) = 2\omega T_{n-1}(\omega) - T_{n-2}(\omega) \quad (2.16)$$

Ako se karakteristična funkcija (2.14) uvrsti u izraz za amplitudno-frekvencijsku karakteristiku, izraz prijelazi u:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 T_n^2(\omega)}} \quad (2.17)$$

Dok se maksimalna i minimalna vrijednost pojačanja u propusnom području računaju kao:

$$\alpha(\omega_1) = -10 \log(1 + \varepsilon^2) = \alpha_{min} \quad (2.18)$$

$$\alpha(\omega_2) = -10 \log(1 + \varepsilon^2 T_n^2(\omega)) = \alpha_{max} \quad (2.19)$$

Iz ove dvije formule može se izračunati gušenje i potreban red filtra:

$$\varepsilon = \sqrt{10^{-0.1 \alpha_{min}} - 1} \quad (2.20)$$

$$n \geq \frac{\operatorname{arch} \sqrt{\frac{10^{-0.1 \alpha_{max}} - 1}{10^{-0.1 \alpha_{min}} - 1}}}{\operatorname{arch}(\omega_2)} \quad (2.21)$$

2.3.2. Kaskadni spoj

Najjednostavniji način za ostvarivanje filtarskih struktura višeg reda. Realizacija se izvršava tako da se prijenosne funkcije izlaz iz prve sekcije predstavlja ulaz u drugu sekciju, itd. Prijenosna funkcija filtra je jednaka umnošku pojedinih sekcija.

$$T(s) = T_1(s) \cdot T_2(s) \cdot \dots \cdot T_{n/2}(s) \quad (2.22)$$

Prednosti kaskadnog spoja je jednostavnost izračuna prijenosne funkcije, jednostavno podešavanje ili promjena parametara, međutim mana je visoka osjetljivost na promjenu elemenata.

2.4. Vremenski odzivi

Predstavlja odziv sustava u vremenu. U ovisnosti o vrsti pobude, postoje dvije vrste odziva: impulsni odziv i skokovni odziv.

2.4.1. Impulsni odziv

Impulsni odziv predstavlja odziv sustava na Dirac-ovu delta funkciju.

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & t=0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

Primjenom Laplaceove transformacije:

$$\mathcal{L}[\delta(t)] = 1 \quad (2.24)$$

Zatim primjenom (2.5) i inverzne Laplaceove transformacije dobije se:

$$G(s) = 1 \cdot H(s) \rightarrow h(t) = \mathcal{L}^{-1}[H(s)] \quad (2.25)$$

2.4.2. Skokovni odziv

Osim impulsnog odziva upotrebljava se i odziv na skokovnu pobudu. Što predstavlja odziv na jediničnu stepenicu.

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

Primjenom Laplaceove transformacije jedinična stepenica postaje:

$$\mathcal{L}[U(s)] = \frac{1}{s} \quad (2.27)$$

Zatim primjenom (2.5) i inverzne Laplaceove transformacije dobije se:

$$A(s) = \frac{1}{s} \cdot H(s) \rightarrow a(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{s} \cdot H(s) \right] \quad (2.28)$$

2.5. Osjetljivost filtarskih karakteristika

Osjetljivost filtra definira se kao promjena karakteristike filtra prilikom promjene vrijednosti njegovih komponenata. Također može se definirati i osjetljivost parametara filtra na promjenu elemenata. Postoje različiti kriteriji osjetljivosti, ali se definira neidealnost elemenata od kojih je sam filter sastavljen. Neki razlozi nastanka neidealnosti filtera je uslijed zaokruživanja vrijednosti kod izračuna, te kod izvedbe samih komponenata kod proizvodnje i uslijed parazitnih elemenata. Osim načina proizvodnje do neidealnosti se može doći uslijed vanjskih utjecaja kao što su promjene temperature i starenja komponenata.

2.5.1. Schoefflerova osjetljivosti

Schoefflerova osjetljivost je definirana kao:

$$S_{x_i}^{|H(j\omega)|} = \frac{d|H(j\omega)|}{dx_i} \cdot \frac{x_i}{|H(j\omega)|} \quad (2.29)$$

gdje je S označava osjetljivost filtra, $|H(j\omega)|$ označava prijenosnu funkciju filtra, dok x_i označava elemente filtra. Ako se računa pojačanje u decibelima onda:

$$\alpha(\omega) = 20 \log(|H(j\omega)|) \quad (2.30)$$

zatim funkcija osjetljivost dobiva oblik kao:

$$S_{x_i}^{\alpha(\omega)} = x_i \frac{d(\alpha(\omega))}{dx_i} \quad (2.31)$$

Schoefflerova osjetljivost određena je funkcijom $I_s(\omega)$

$$I_s(\omega) = \sum_i \left(S_{x_i}^{\alpha(\omega)} \right)^2 \quad (2.32)$$

Funkcija Schoefflerove osjetljivosti se prikazuje grafički u ovisnosti o frekvenciji, međutim može se prikazati i brojačno korištenjem izraza za višeparametarsku mjeru Schoefflerove osjetljivosti.

$$M = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \sum_i \left(S_{x_i}^{|H(j\omega)|} \right)^2 d\omega \quad (2.33)$$

2.5.2. Monte Carlo analiza

Postupak analize osjetljivosti primjenom Monte Carlo analize vrši se tako da se svim pasivnim elementima odredi tolerancija. Nakon određivanja tolerancije pasivnih elemenata može računalo izračunati skup frekvencijskih karakteristika uz nasumičnu promjenu vrijednosti pojedinih komponenata. Osjetljivost se ocjenjuje tako da što je skup karakteristika uži to je osjetljivost filtra manja.

$$x_i = x_n(1 + pX) \quad X \sim U(-1, 1) \quad (2.34)$$

Gdje je:

- x_n - nominalna vrijednost elementa,
- p - tolerancija [%],
- X - varijabla uniformne distribucije.

2.6. Šum

Šum se generalno opisuje kao stohastičke promjene signala koje se pojavljuju u elektroničkim uređajima i komponentama. Prema načinu nastanka šum se dijeli na dvije kategorije, a to su šum koji nastaje izvan sustava (atmosferski), te šum koji nastaje unutar sustava (termički šum, šum sačme, 1/f šum)[6].

Termički šum nastaje uslijed kretanja elektrona materijala od kojeg je građen otpornik. Uslijed termičkog gibanja elektrona u vodiču se pojavljuje usmjereno gibanje elektrona odnosno električna struja. Koja na krajevima vodiča proizvodi razliku potencijala. Aritmetička sredina kvadrata napona Jonhson-Nyquistovg šuma ima oblik kao:

$$\bar{u}_n^2 = 4kTR\Delta f \quad (2.35)$$

Gdje je:

- k [J/K]– Boltzmannova konstanta
- T [K]– temperatura
- Δf [Hz] – širina frekvencijskog pojasa

Formula (2.18) prikazuje izvor šuma spojen u seriju s otporom R , te se izvor šuma može prikazati kao izvor šuma kao strujni izvor spojen paralelno s vodljivosti G .

$$\bar{i}_n^2 = 4kTG\Delta f \quad (2.36)$$

Efektivna vrijednost šuma se računa prema izrazu:

$$(E_n)_{ef} = \sqrt{\int_{\omega_1}^{\omega_2} U_n^2(\omega) d\omega} \quad (2.37)$$

Šum operacijskog pojačala se prikazuje kao naponski izvor šuma i strujnim izvorima šuma na invertirajućim i neinvertirajućim ulazima pojačala. Iznos šuma kod operacijskog pojačala može se pronaći u dokumentaciji koju pruža proizvođač.

3. ANALIZA NORMIRANIH KARAKTERISTIKA

U ovom poglavlju će se prikazati postupak izračuna prijenosnih funkcija, amplitudno-frekvencijske karakteristike, grupnog kašnjenja, te polova i nula. Nakon proračuna će se prikazati postupak realizacije filtra.

3.1. Normirana prijenosna funkcija

Izračun normirane funkcije VP filtra započinje s odabirom NP prototipa filtra 5. reda. Prijenosna funkcija 5. reda, aproksimirana po Chebyshev, uz 0.1 dB valovitosti, očitana je kao[7]:

$$H_{NP}(s) = \frac{0.474932}{s+0.474932} \cdot \frac{0.493886}{s^2+0.768457s+0.493886} \cdot \frac{0.928045}{s^2+0.293524s+0.928045} \quad (3.1)$$

Upotrebom NP→VP transformacije, gdje je $\omega_0 = 1$, dobije se prijenosna funkcija:

$$H_{VP}(s) = \underbrace{\frac{s}{s+2.106}}_{H_1} \cdot \underbrace{\frac{s^2}{s^2+1.556s+2.025}}_{H_2} \cdot \underbrace{\frac{s^2}{s^2+0.3163s+1.078}}_{H_3} \quad (3.2)$$

$$H_{VP}(s) = \frac{s^5}{s^5+3.978s^4+7.538s^3+9.889s^2+7.064s+4.597} \quad (3.3)$$

3.2. Normirani polovi i nule

Izjednačavanjem brojnika i nazivnika s nulom, mogu se izračunati polovi i nule prijenosne funkcije (3.2). Dobiveni su slijedeći rezultati nula:

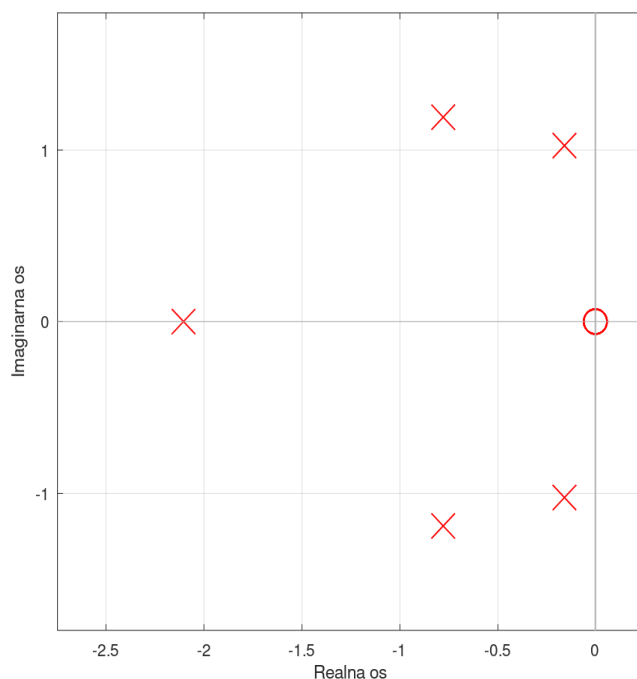
$$z_{1-5} = 0 \quad (3.4)$$

Zatim polova:

$$p_1 = -2.106 \quad (3.5)$$

$$p_{2,3} = -0.778 \pm j1.1914 \quad (3.6)$$

$$p_{4,5} = -0.1581 \pm j1.0259 \quad (3.7)$$



Slika 3.1. Raspored nula i polova

3.3. Normirane frekvencijske karakteristike

Frekvencijska analiza podrazumijeva promjenu karakteristike filtra ovisnosti o frekvenciji. Prvi korak je supstitucija $s \rightarrow j\omega$ u (3.3) dobije se:

$$H(j\omega) = \frac{j\omega^5}{j\omega^5 + 3.978\omega^4 - 7.538j\omega^3 - 9.889\omega^2 + 7.064j\omega + 4.597} \quad (3.8)$$

3.3.1. Amplitudno frekvencijska karakteristika

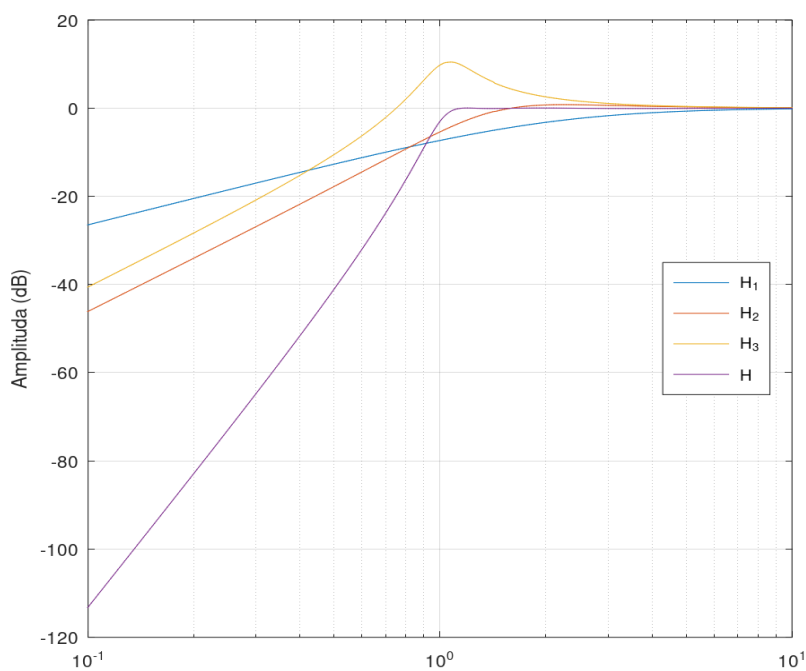
Primjenom (2.9) na (3.8) dobije se izraz za amplitudno-frekvencijsku karakteristiku

$$|H(\omega)| = \frac{0.156\omega^5}{\sqrt{0.0243\omega^{10} + 0.0182\omega^8 - 0.188\omega^6 + 0.679\omega^4 - \omega^2 + 0.515}} \quad (3.9)$$

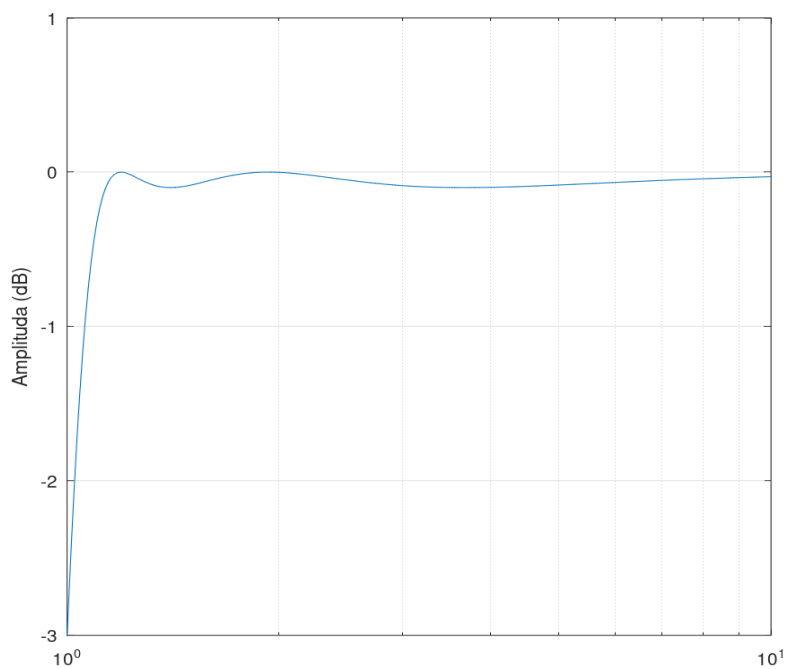
Ako se izraz logaritmiri i pomnoži s dvadeset dobije se izraz u decibelima.

$$\alpha(\omega) = 20 \log \left(\frac{0.156\omega^5}{\sqrt{0.0243\omega^{10} + 0.0182\omega^8 - 0.188\omega^6 + 0.679\omega^4 - \omega^2 + 0.515}} \right) \quad (3.10)$$

Slika dolje prikazuje amplitudnu karakteristiku sve tri sekcije filtra i ukupni frekvencijski odziv, gdje su sekcije označene H_1 , H_2 , H_3 , a ukupni odziv je H .



Slika 3.2. Prikaz amplitudno-frekvencijskih karakteristika



Slika 3.3. Normirana amplitudno-frekvencijska karakteristika u području propuštanja

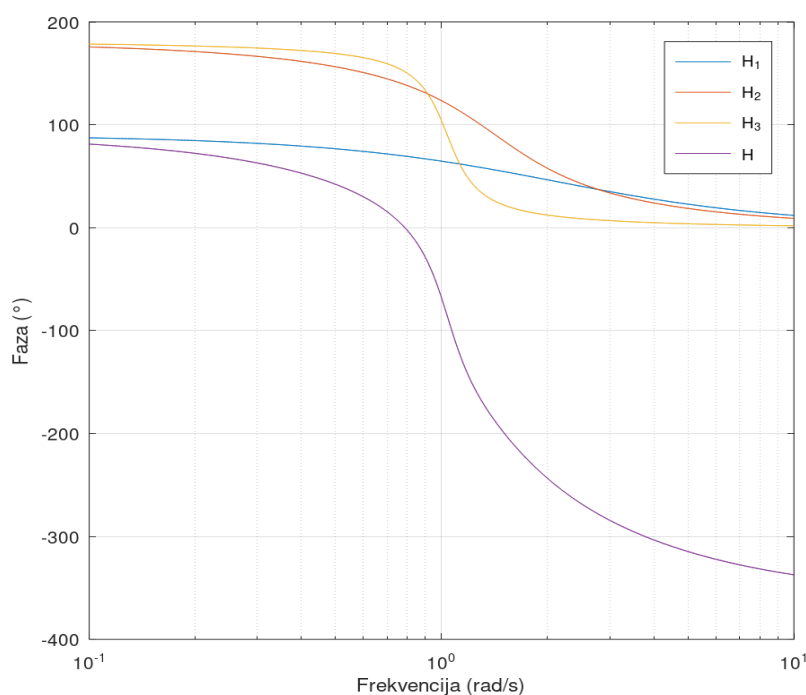
Zatim je prikazano područje propuštanja od $\omega=1$ rad/s do $\omega=10$ rad/s. Kako bi se bolje moglo vidjeti valovitost u području propuštanja, iznosa od 0.1 dB.

3.3.2. Fazno frekvencijska karakteristika

Primjenom (2.10) na (3.8) dobije se izraz za fazno frekvencijsku VP karakteristiku filtra.

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{3.978\omega^4 - 9.889\omega^2 + 4.597}{\omega^5 + 7.538\omega^3 - 7.064\omega}\right) \quad (3.11)$$

Kao što se može primijetiti na slici dolje, zakret faze pri frekvenciji od $\omega=1$ rad/s iznosi 70° .



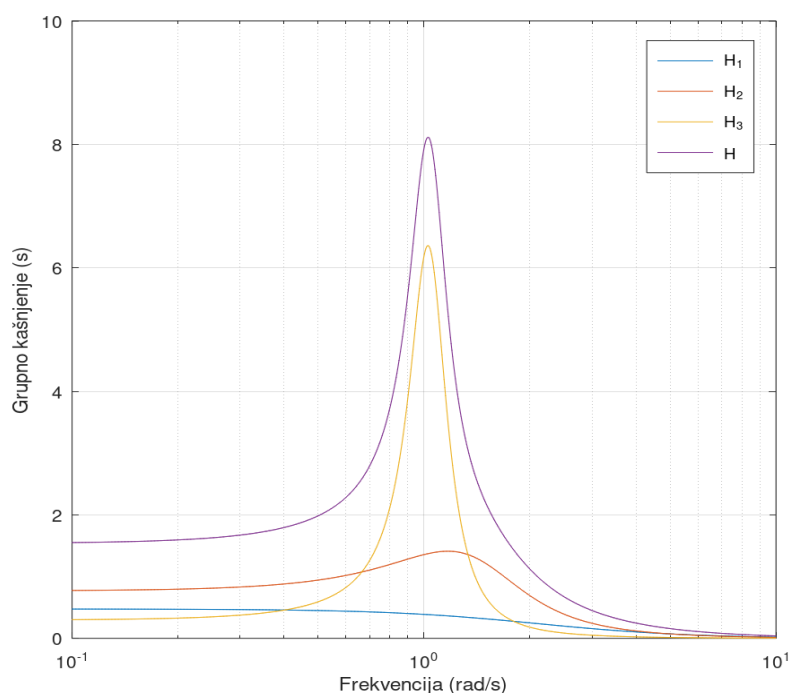
Slika 3.4. Fazno frekvencijska karakteristika

Iz gornjih slika može se zaključiti da je ostvaren zahtjev granične frekvencije na $\omega=1$ rad/s, te se može primijetiti valovitost u propusnom dijelu karakteristike. Koja nastaje zbog primjene Chebysheve aproksimacije. Fazna karakteristika odziva prikazuje vrijednost od -70° na graničnoj frekvenciji $\omega=1$ rad/s.

3.3.3. Karakteristika grupnog kašnjenja

Karakteristika grupnog kašnjenja dobije se iz (3.11) primjenom (2.11).

$$T_g(\omega) = \frac{0.07\omega^{12} - 0.522\omega^{10} + 0.684\omega^8 - 2.314\omega^6 + 6.739\omega^4 - 8.548\omega^2 + 4.037}{0.0175\omega^{14} - 0.119\omega^{12} - 0.111\omega^{10} + 1.609\omega^8 - 5.380\omega^6 + 9.278\omega^4 - 7.903\omega^2 + 2.627} \quad (3.12)$$



Slika 3.5. Karakteristika grupnog kašnjenja

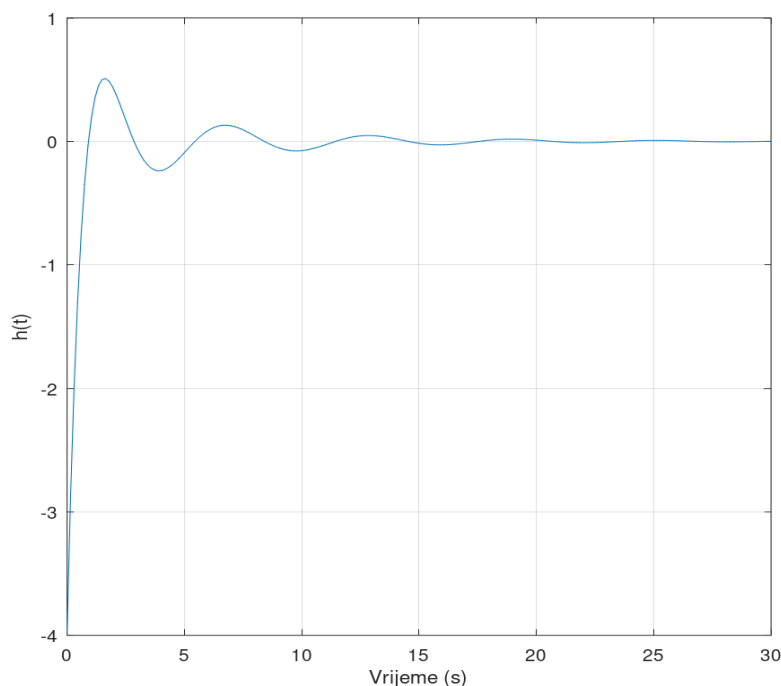
3.4. Normirani vremenski odzivi

U ovom poglavlju će se prikazati impulsni i skokovni odziv normiranog VP filtra. Koji se dobivaju prema formulama

3.4.1. Impulsni odziv

Množenjem Laplaceove transformacije Diracove delta funkcije (2.24) i prijenosne funkcije (3.3), dobije se impulsni odziv. Primjenom inverzne Laplaceove transformacije, izračunat je odziv u vremenskoj domeni:

$$h(t) = 2.684 \cdot e^{-3.041t} \left\{ S(t) \cdot \left[e^{0.936t} + 0.378e^{2.263t} \cdot \sin(1.191t) - 0.579e^{2.263t} \cdot \cos(1.191t) \right. \right. \\ \left. \left. + 0.0925e^{2.883t} \cdot \sin(1.026t) + 0.0978e^{2.883t} \cdot \cos(1.026t) \right] + \delta(t) \cdot e^{3.041t} \right\} \quad (3.13)$$

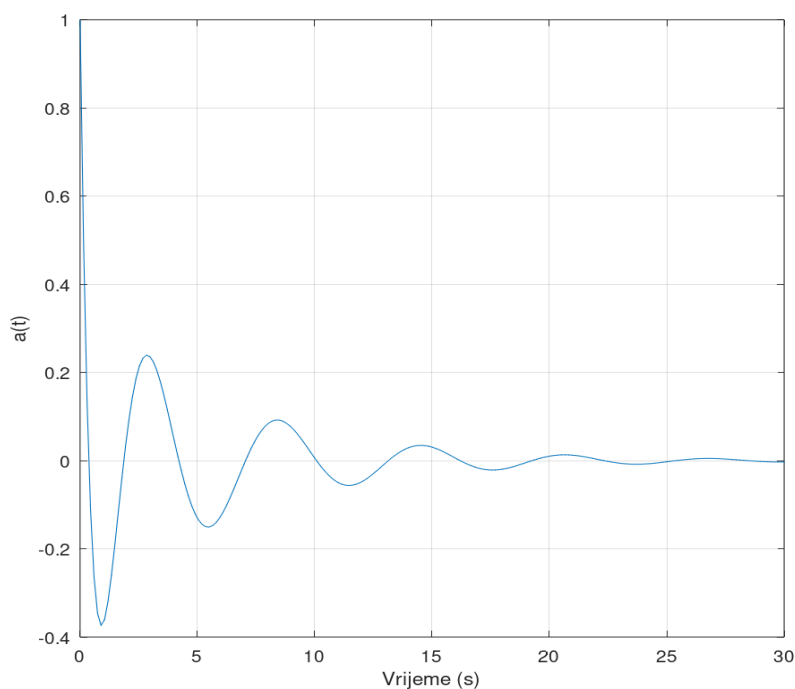


Slika 3.6. Prikaz impulsnog odziva filtra

3.4.2. Skokovni odziv

Skokovni odziv izračunava se primjenom Laplaceove transformacije na jediničnu stepenicu (2.27) i množenjem sa prijenosnom funkcijom (3.3), a zatim se primjenom inverzne Laplaceove transformacije dobije izraz:

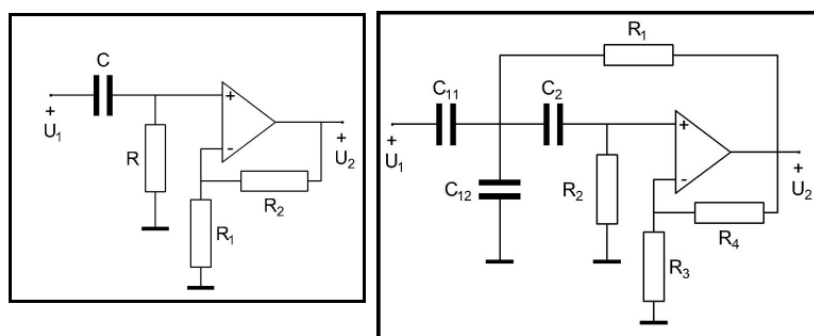
$$a(t) = 1.306e^{-3.041t} S(t) \left[0.975 \cdot e^{0.936t} - e^{2.263t} \cdot \sin(1.191t) + 0.000254 \cdot e^{2.2639t} \cdot \cos(1.191t) \right. \\ \left. + 0.163 \cdot e^{2.883t} \cdot \sin(1.026t) - 0.210 \cdot e^{2.883t} \cdot \cos(1.026t) \right] \quad (3.14)$$



Slika 3.7. Prikaz skokovnog odziva filtra

3.5. Proračun parametara normiranih filtarskih sekcija

Za izračun parametara VP filtra 5. reda potrebno je izvesti jednadžbe da se zadovolje parametri kao što su pojačanje, frekvencije polova i faktor kvalitete pola. Za 1. sekciju odabire se aktivna sekcija prvog reda, te dvije aktivne sekcije 2. reda.



Slika 3.8. Aktivna sekcija 1. reda (lijevo), aktivna sekcija 2. reda (desno)[7]

Prijenosna funkcija aktivne sekcije prvog reda glasi:

$$G_1(s) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{s}{s + \frac{1}{RC}} \quad (3.15)$$

Usporedbom s općim oblikom prijenosne funkcije 1. reda:

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{s}{\frac{1}{RC}} = k \frac{s}{s + \omega_g} \quad (3.16)$$

Može se izračunati:

$$k = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.17)$$

$$\omega_g = \frac{1}{RC} \quad (3.18)$$

Zatim se može prijeći na aktivnu sekciju 2. reda:

$$G(s) = \frac{\left(1 + \frac{G_3}{G_4}\right) \frac{C_{11}}{C_1} \cdot s^2}{s^2 + s \left(\frac{G_2}{C_1} + \frac{G_2}{C_2} - \frac{G_1 G_3}{C_1 G_4} \right) + \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} \quad (3.19)$$

$$C_1 = C_{11} + C_{12}$$

Usporedbom s općim oblikom prijenosne funkcije 2. reda:

$$\frac{\left(1 + \frac{G_3}{G_4}\right) \frac{C_{11}}{C_1} \cdot s^2}{s^2 + s \left(\frac{G_2}{C_1} + \frac{G_2}{C_2} - \frac{G_1 G_3}{C_1 G_4} \right) + \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} = k \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p} \quad (3.20)$$

Dobije se:

$$k = \frac{C_{11}}{C_1} \left(1 + \frac{G_3}{G_4} \right) \quad (3.21)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} \quad (3.22)$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{\frac{C_1 G_1}{C_2 G_2}}}{1 + \frac{C_1}{C_2} - \frac{G_1 G_3}{G_2 G_4}} \quad (3.23)$$

Slijedeći korak izračuna je izdvajanje parametara polova:

Tablica 3.1. Normirani parametri polova

Parametar	1. sekcija	2. sekcija	3. sekcija
k	1	1	1
ω_p	0.474	0.702	0.963
Q_p	/	0.914	3.282

Izračun iznosa normiranih elemenata prve sekcije. Prvi korak izračuna je odabir komponenata koje imaju normiran iznos, odnosno u ovom slučaju $C=1$. Operacijsko pojačalo u prvoj sekciji se ponaša kao naponsko slijedilo.

Nakon izračuna prelazi se na izračun komponenata druge i treće sekcije. Prije izračuna potrebno je smanjiti broj nepoznanica. Zato što je u ovom slučaju broj nepoznanica veći od broja jednadžbi. Vrijednosti elemenata koje su odabrane: $R_3=R_4=1$, $C_{11}=C_{12}=C_2=1$. Odabiru se vrijednosti kondenzatora kako bi se kasnije jednostavnije odabralo vrijednost kondenzatora iz E6 niza.

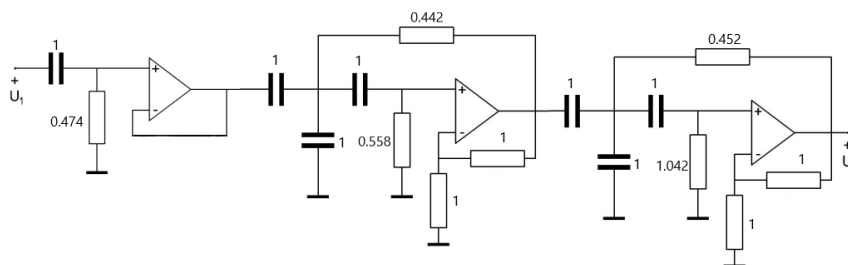
$$R_{2n} = \frac{\sqrt{6Q_p^2 + 1} - 1}{2Q_p \omega_p} \quad (3.24)$$

$$R_{1n} = \frac{1}{2R_{2n}\omega_p^2} \quad (3.25)$$

Tablica 3.2. Izračunate normirane vrijednosti elemenata

Elementi	1. sekcija	2. sekcija	3. sekcija
R	0.474	/	/
R ₁	∞	0.442	0.452
R ₂	0	0.558	1.042
R ₃	/	1	1
R ₄	/	1	1
C	1	/	/
C ₁₁	/	1	1
C ₁₂	/	1	1
C ₂	/	1	1

Prikazom izračunatih vremenskih karakteristika, frekvencijskih karakteristika i nula i polova, te određivanjem vrijednosti elemenata odrađena je potpuna analiza normiranog VP filtra 5. reda s aproksimacijom po Chebyshevu.



Slika 3.9. Shema VP filtra 5. reda s dodanim vrijednostima normiranih elemenata

4. ANALIZA DENORMIRANIH KARAKTERISTIKA

U ovom poglavlju izvršiti će se denormiranje prijenosne funkcije. Za denormiranje se koristi frekvencijska transformacija iz $NP \rightarrow VP$, te se denormira za frekvenciju 4 kHz:

$$s \rightarrow \frac{\omega_g}{s} = \frac{2\pi \cdot 4000}{s} = \frac{25132.74}{s} \quad (4.1)$$

4.1. Denormirana prijenosna funkcija

Denormiranje prijenosne funkcije omogućava da se prijenosna funkcija analizira na frekvenciji za koju se sam filter projektira.

$$H_{VP}(s) = \underbrace{\frac{s}{s + 5.292 \cdot 10^4}}_{H_1} \cdot \underbrace{\frac{s^2}{s^2 + 3.911 \cdot 10^4 s + 1.279 \cdot 10^9}}_{H_2} \cdot \underbrace{\frac{s^2}{s^2 + 7949 s + 6.806 \cdot 10^8}}_{H_3} \quad (4.2)$$

Množenjem svih sekcija dobije se:

$$H_{VP}(s) = \frac{s^5}{s^5 + 9.997 \cdot 10^4 s^4 + 4.76 \cdot 10^9 s^3 + 1.569 \cdot 10^{14} s^2 + 2.817 \cdot 10^{18} s + 4.607 \cdot 10^{22}} \quad (4.3)$$

4.2. Denormirani polovi i nule

Iz prijenosne funkcije (4.3), izračunate su sljedeće nule:

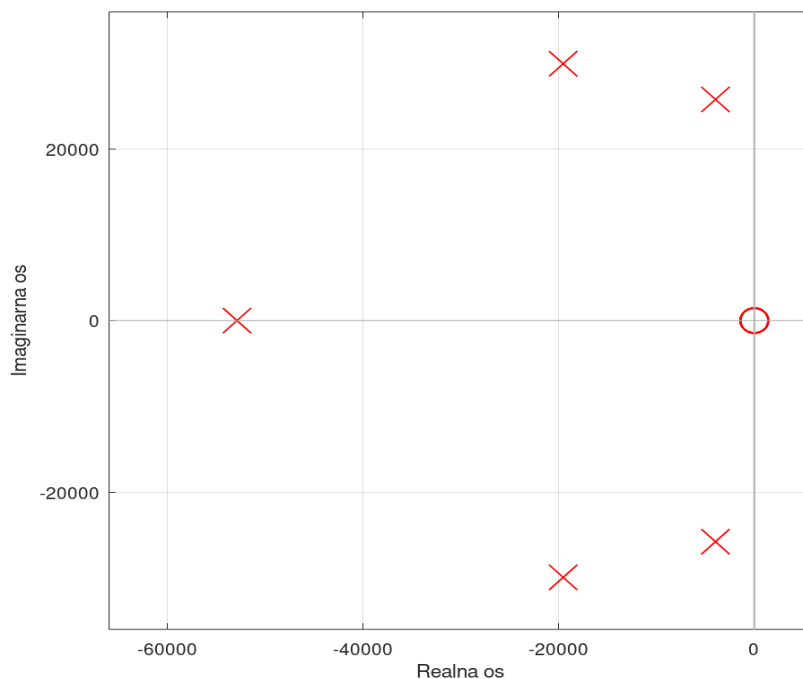
$$z_{1-5} = 0 \quad (4.4)$$

Zatim polovi:

$$p_1 = -5.292 \cdot 10^4 \quad (4.5)$$

$$p_{2,3} = -1.955 \cdot 10^4 \pm j 2.994 \cdot 10^4 \quad (4.6)$$

$$p_{4,5} = -3.975 \cdot 10^4 \pm 2.578 \cdot 10^4 \quad (4.7)$$



Slika 4.1. Raspored polova i nula

Iz slike i iz izračuna može se primijetiti da su polovi u lijevoj poluravnini, što znači da je sustav stabilan.

4.3. Denormirane frekvencijske karakteristike

Denormirana prijenosna funkcija dobije se iz izraza (4.2) primjenom supstitucije $s \rightarrow j\omega$, dobije se izraz:

$$H(j\omega) = \frac{\omega^5}{\omega^5 - 1.002 \cdot 10^5 j \omega^4 - 4.774 \cdot 10^9 \omega^3 + 1.574 \cdot 10^{14} j \omega^2 + 2.825 \cdot 10^{18} \omega - 4.617 \cdot 10^{22}} \quad (4.8)$$

4.3.1. Amplitudno frekvencijska karakteristika

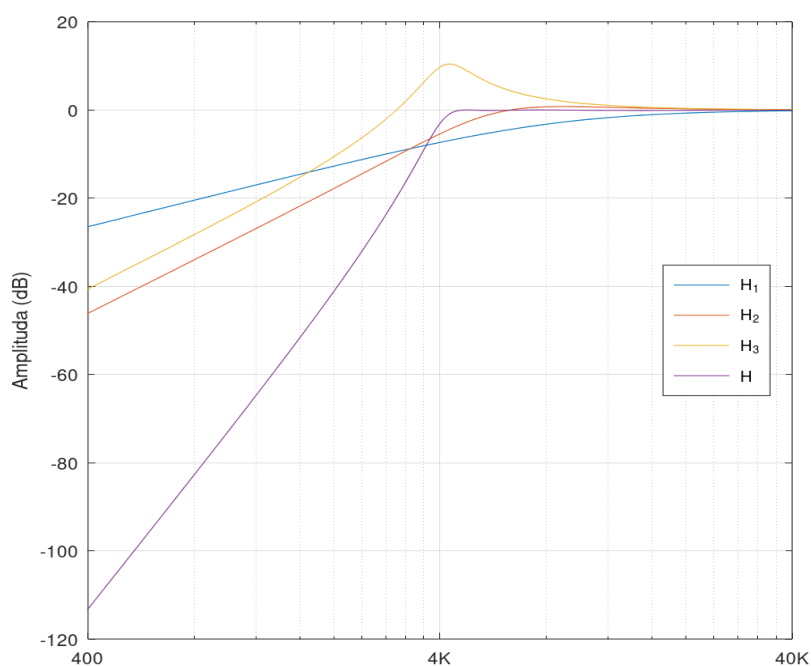
Primjenom izraza (2.9) na izraz (4.8) može se izračunati amplitudno frekvencijska karakteristika visoko propusnog filtra.

$$|H(\omega)| = \frac{0.1562}{\sqrt{0.515\omega^{10} - \omega^8 + 0.679\omega^6 - 0.188\omega^4 + 0.0183\omega^2 + 0.0244}} \quad (4.9)$$

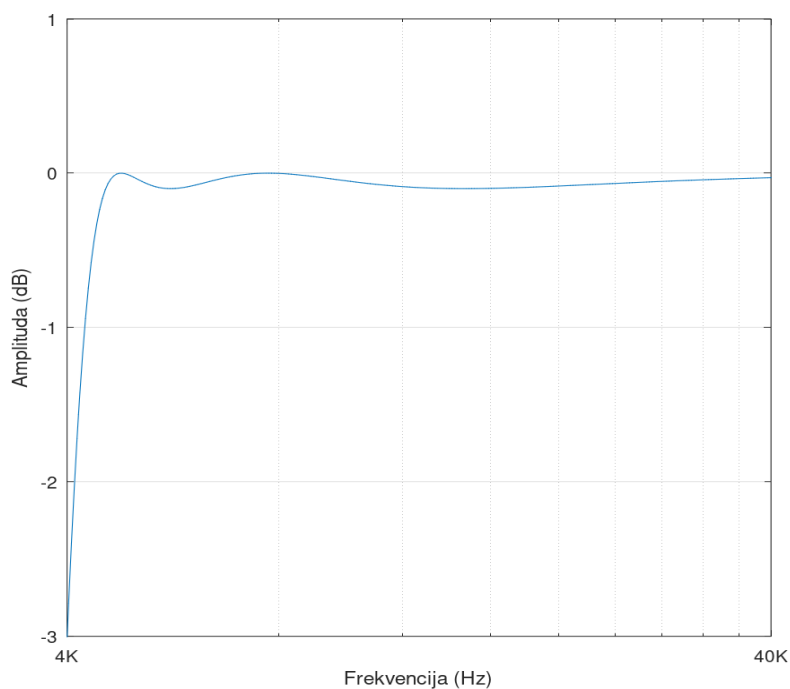
Ako se izraz logaritmiri i pomnoži sa dvadeset dobije se izraz u decibelima.

$$\alpha(\omega) = 20 \log \left(\frac{0.1562}{\sqrt{0.515\omega^{10} - \omega^8 + 0.679\omega^6 - 0.188\omega^4 + 0.0183\omega^2 + 0.0244}} \right) \quad (4.10)$$

Donja slika prikazuje grafički prikaz sve tri sekcije filtra i ukupni odziv filtra. Može se primijetiti da treća sekcija H_3 ima najveće nadvišenje uslijed visokog faktora kvalitete ($Q=3.28$).



Slika 4.2. Amplitudna karakteristika denormirane prijenosne funkcije



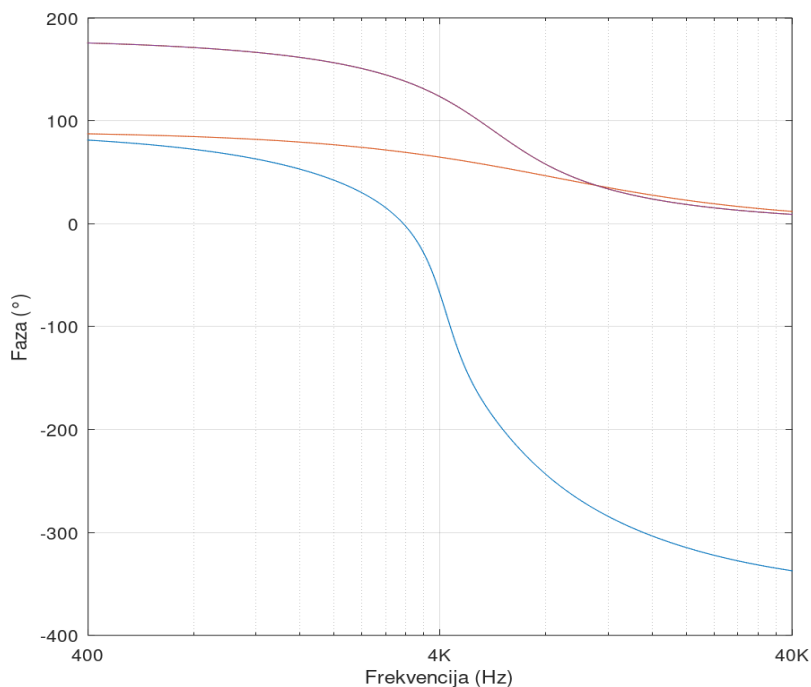
Slika 4.3. Denormirana amplitudno frekvencijska karakteristika u području propuštanja

Iz amplitudno frekvencijskih karakteristika može se zaključiti da je zahtjev za visokopropusni filter zadovoljen.

4.3.2. Fazno frekvencijska karakteristika

Denormirana prijenosna funkcija (4.8) se u prvom koraku zapiše odvojeno kao realni i imaginarni dio, zatim se izračunava arkustangens prema izrazu (2.10). Dobije se izraz za fazno frekvencijsku karakteristiku.

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{2.176 \cdot 10^4 \omega^4 - 3.416 \cdot 10^{13} \omega^2 + 1.002 \cdot 10^{22}}{\omega(0.217 \omega^4 - 1.036 \cdot 10^9 \omega^2 + 6.132 \cdot 10^{17})}\right) \quad (4.11)$$

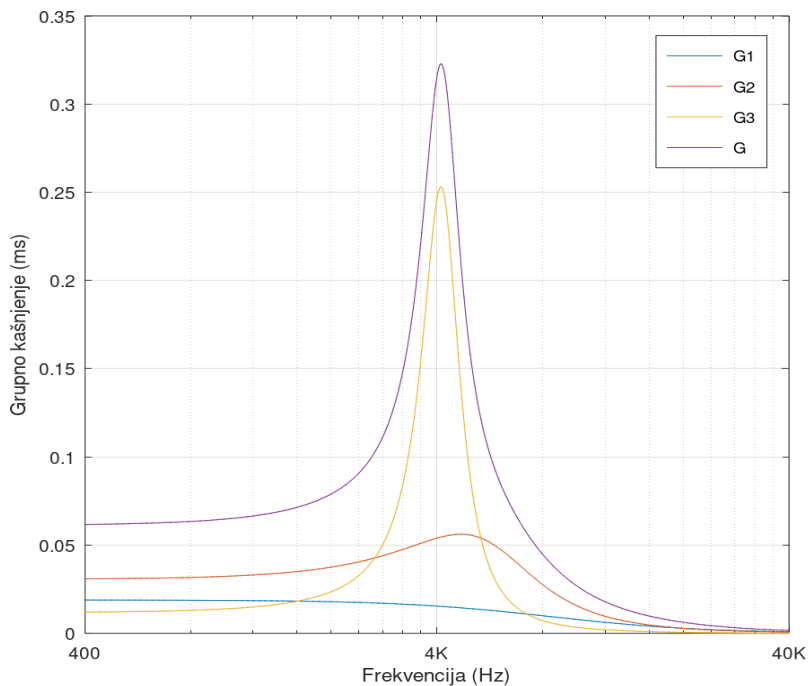


Slika 4.4. Denormirana fazno frekvencijska karakteristika

4.3.3. Karakteristika grupnog kašnjenja

Karakteristika grupnog kašnjenja dobije se kao negativna derivacija (2.11) fazno frekvencijske karakteristike (4.11).

$$T_g(\omega) = \frac{0.07\omega^{12} - 0.522\omega^{10} + 0.684\omega^8 - 2.314\omega^6 + 6.739\omega^4 - 8.548\omega^2 + 4.037}{0.0175\omega^{14} - 0.119\omega^{12} - 0.111\omega^{10} + 1.609\omega^8 - 5.38\omega^6 + 9.278\omega^4 - 7.903\omega^2 + 2.627} \quad (4.12)$$



Slika 4.5. Denormirana karakteristika grupnog kašnjenja

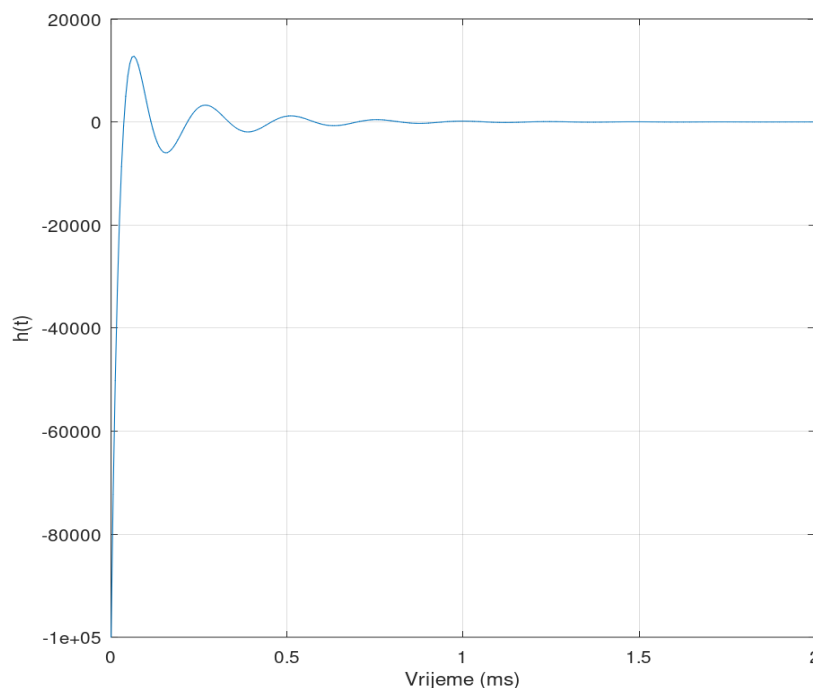
4.4. Denormirani vremenski odzivi

Predstavljaju rezultat kada se na ulaz filtra dovedu pobudne funkcije. Te se kao kod normiranih karakteristika prikazuje impulsni i skokovni odziv

4.4.1. Impulsni odziv

Dobije se množenjem Laplaceove transformacije Diracove delta funkcije sa prijenosnom funkcijom (4.3). Nakon čega se inverznom Laplaceovom transformacijom (2.25) dobije impulsni odziv u vremenu.

$$\begin{aligned}
 h(t) = & (1.521 \cdot 10^4 e^{13342.25t} + 1.261 \cdot 10^4 e^{15623.884t} \sin(14787.625t) - \\
 & 1.931 \cdot 10^4 e^{15623.884t} \cos(14787.625t) - 7364.0 \cdot e^{21589.134t} \sin(23924.752t) + \\
 & (4096 e^{21589.134t} \cos(23924.75t)) e^{-25277.634t}
 \end{aligned} \quad (4.13)$$

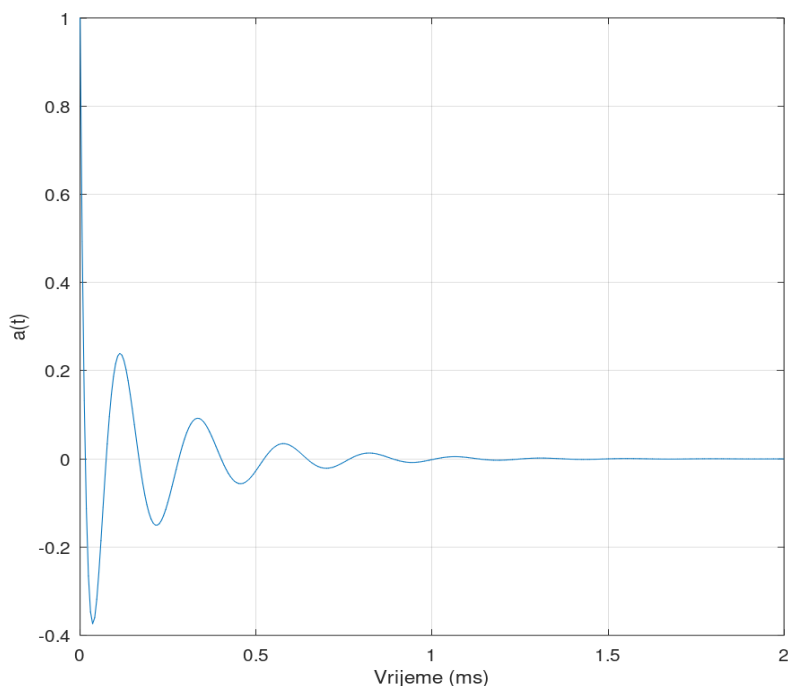


Slika 4.6. Denormirani impulsni odziv filtra

4.4.2. Skokovni odziv

Izračunava se množenjem Laplaceove transformacije skokovnog odziva (2.27) i prijenosne funkcije (4.3), a zatim se inverznom transformacijom (2.28) izračuna skokovni odziv filtra.

$$\begin{aligned}
 a(t) = & (-1.273 e^{13342.25t} - 1.306 e^{15623.884t} \sin(14787.625t) - \\
 & 0.0021 e^{15623.884t} \cos(14787.625t) + 0.2139 e^{21589.134t} \sin(23924.75t) + \\
 & 0.2759 e^{21589.134t} \cos(23924.75t) + 0.9997 e^{25277.634t} e^{-25277.634t}
 \end{aligned} \quad (4.14)$$



Slika 4.7. Skokovni odziv denormiranog filtra

4.5. Proračun denormiranih elemenata

Denormiranje elemenata vrši se odabirom frekvencije i odabirom kapaciteta kondenzatora C , zato što se kondenzatori uzimaju iz E6 niza, dok se otpornici uzimaju iz E24 niza.

$$R = R_n \cdot R_0 \quad (4.15)$$

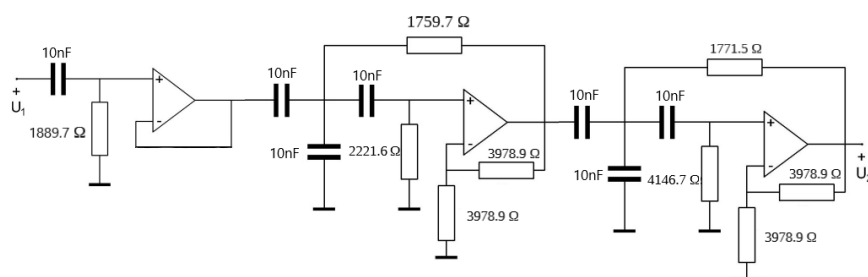
$$R_0 = \frac{C_n}{\omega_0 C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 4000 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = 3978.87 \Omega \quad (4.16)$$

Tablica 4.1. Parametri denormiranih polova

Parametar	1. sekcija	2. sekcija	3. sekcija
k	1	1	1
ω_p [rad/s]	$2.105 \cdot 10^8$	$3.576 \cdot 10^4$	$2.609 \cdot 10^4$
Q_p	/	0.914	3.282

Tablica 4.2. Vrijednosti denormiranih elemenata

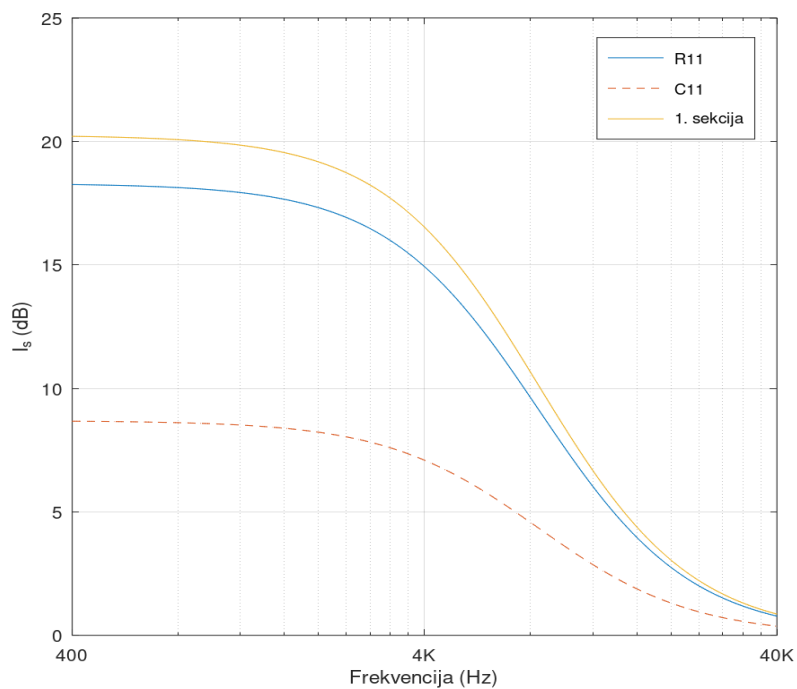
Elementi	1. sekcija	2. sekcija	3. sekcija
R	1889.7 Ω	/	/
R ₁	∞	1.759.7 Ω	1771.5 Ω
R ₂	0	2221.6 Ω	4416.7 Ω
R ₃	/	3978.9 Ω	3978.9 Ω
R ₄	/	3978.9 Ω	3978.9 Ω
C	10 nF	/	/
C ₁₁	/	10 nF	10 nF
C ₁₂	/	10 nF	10 nF
C ₂	/	10 nF	10 nF



Slika 4.8. Shema VP filtra 5. reda sa denormiranim elementima

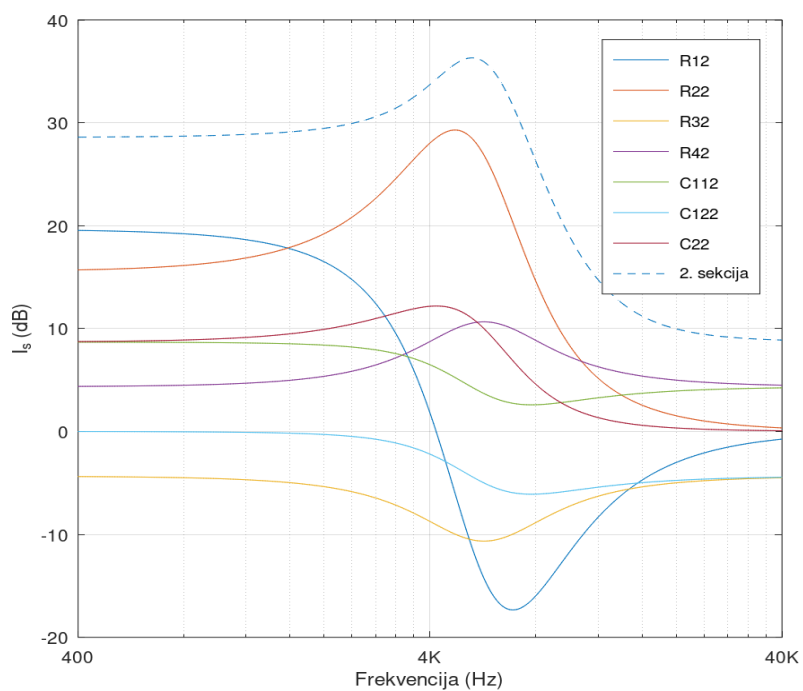
5. PRORAČUN OSJETLJIVOSTI

U ovom o poglavlju prikazati će se osjetljivost VP filtra 5. reda i svake pojedine sekcije filtra. Schoefflerova osjetljivost računa se prema izrazu (2.31) što predstavlja parcijalnu derivaciju prijenosne funkcije po određenom elementu.



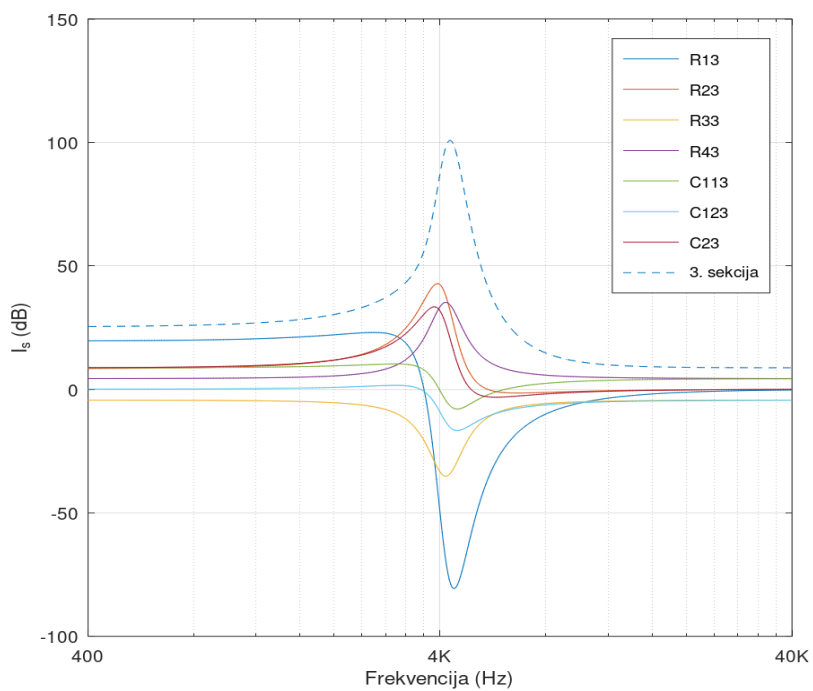
Slika 5.1. Schoefflerova osjetljivost 1. sekcije

U prvoj sekciji može se primijetiti da je najveća osjetljivost ima otpornik R_{11} .

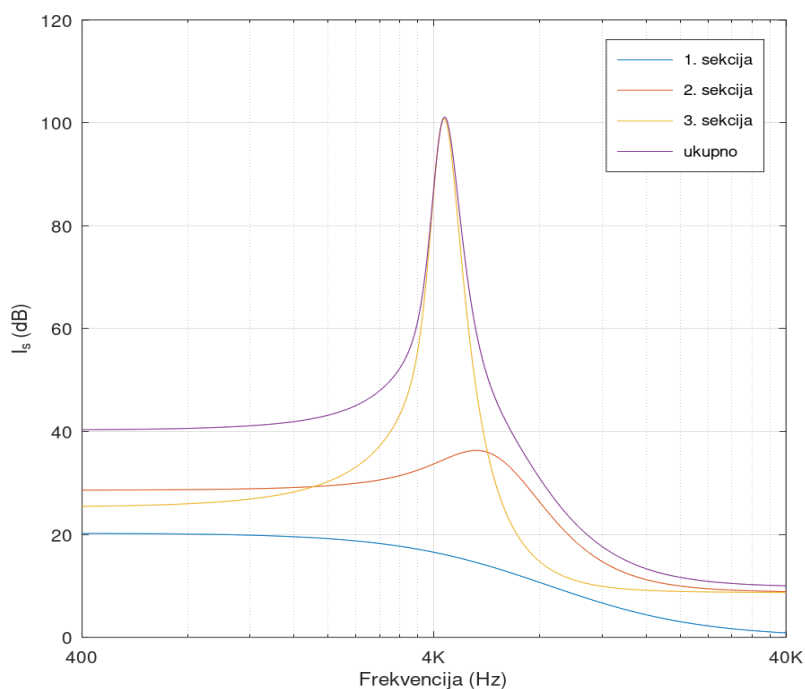


Slika 5.2. Schoefflerova osjetljivost 2. sekcije

Najosjetljiviji elementi u drugoj i trećoj sekciji su R_2 , C_2 i R_4 .



Slika 5.3. Schoefflerova osjetljivost 3. sekcije



Slika 5.4. Schoefflerova osjetljivost filtra

Usporedbom osjetljivosti sve tri sekcije filtra, može se primijetiti da treća sekcija filtra ima najveću osjetljivost. Što znači da treba voditi računa tijekom odabira elemenata kasnije u fizičkoj realizaciji. Primjenom izraza (2.33), može se Schoefflerovu osjetljivost prikazati brojčano.

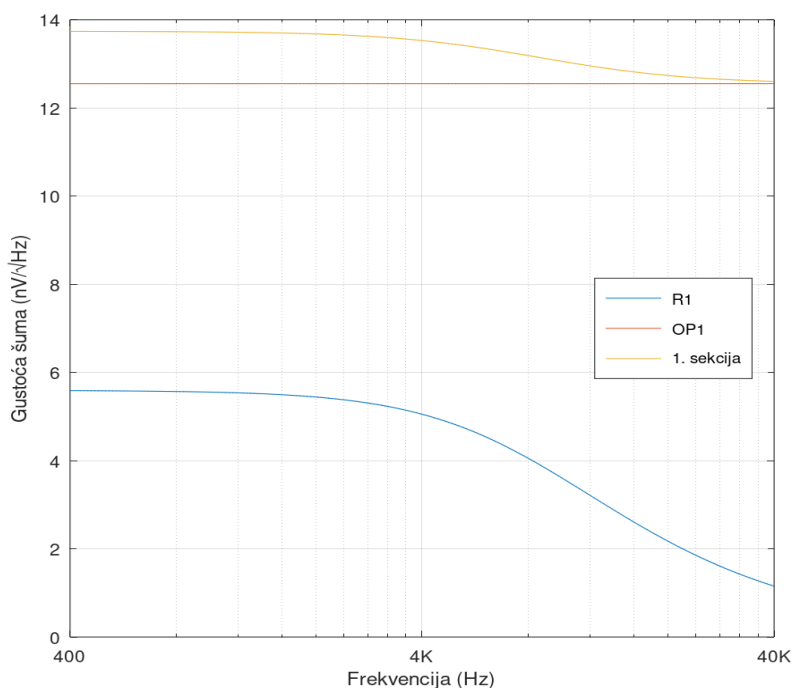
Tablica 5.1. Višeparametarska mjera Schoefflerove osjetljivosti

	1. sekcija	2. sekcija	3. sekcija	Ukupno
$M[10^5]$	0.779	5.912	9.982	317.02

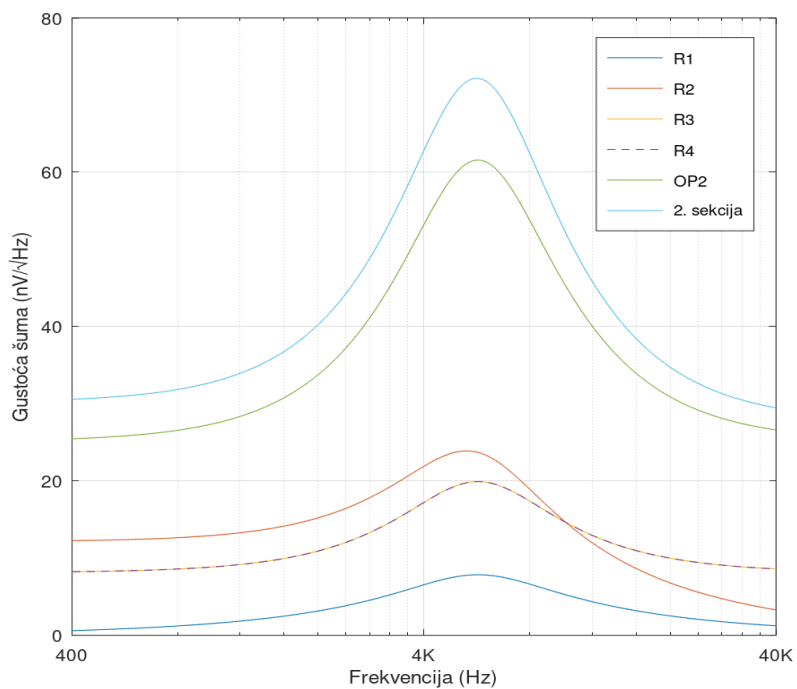
6. PRORAČUN GUSTOĆE ŠUMA

U ovom poglavlju će se prikazati izračunate vrijednosti šuma pojedinih elemenata VP filtra 5. reda. Glavni izvori šuma u filtru su Jonhson-Nyquistov šum u otpornicima, te šum operacijskog pojačala. Upotrebljava se operacijsko pojačalo TL082 sa svojom gustoćom napona šuma $E_s = 25 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, dok je gustoća struje šuma $I_s = 0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$. Gustoća struje šuma se može zanemariti.

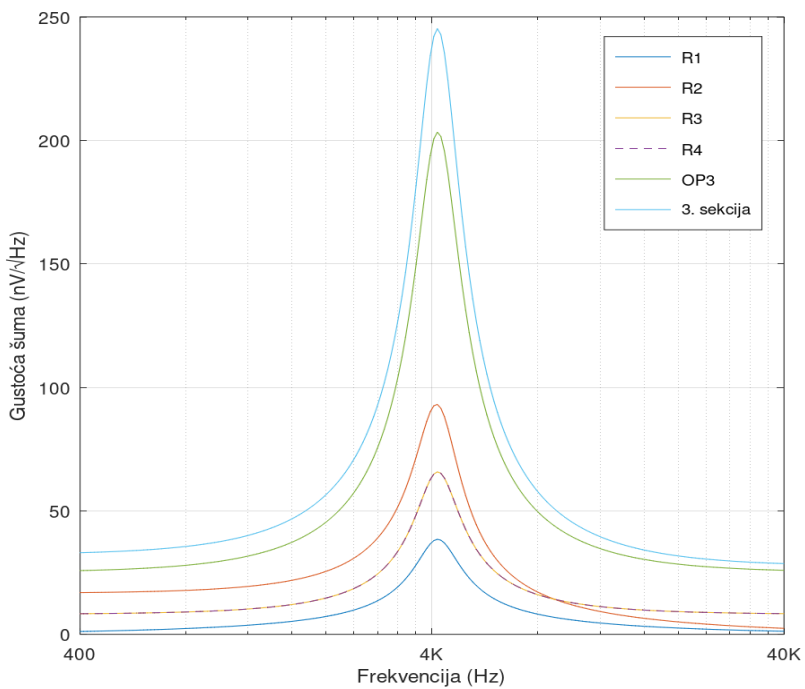
Uz prikaz šuma prikazati će se iznos šuma po svakoj sekciji i iznos šuma svakog otpornika. Osim spektralne gustoće potrebno je prikazati i efektivnu vrijednost šuma po sekciji u brojčanom obliku. Efektivna vrijednost šuma dobije se integracijom kvadrata vrijednosti gustoće šuma i korjenovanjem rezultata.



Slika 6.1. Gustoća šuma 1. sekcije

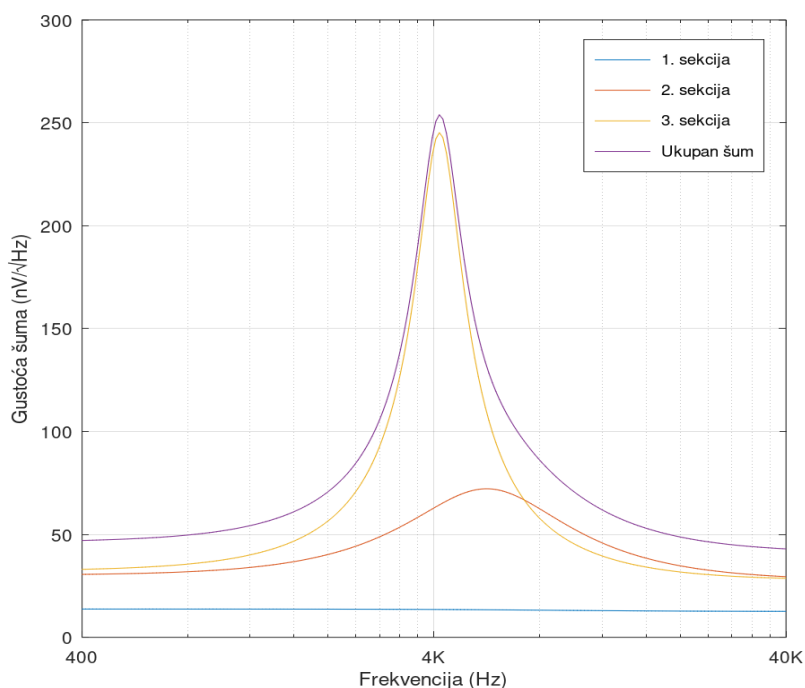


Slika 6.2. Gustoća šuma 2. sekcije



Slika 6.3. Gustoća šuma 3. sekcije

Iz gornjih slika može se primijetiti koji su elementi najviše doprinose gustoći šuma pojedine sekcije. U prvoj sekciji može se primijetiti da operacijsko pojačalo ima najveći šum. Dok u drugoj sekciji isto tako najviše doprinosi operacijsko pojačalo i otpornik R_2 . Treća sekcija ima jednak poredak doprinosa šuma, međutim može se primijetiti da je amplituda šuma treće sekcije gotovo četiri puta veća od druge sekcije slika ispod.



Slika 6.4. Gustoća šuma sve tri sekcije i ukupan šum

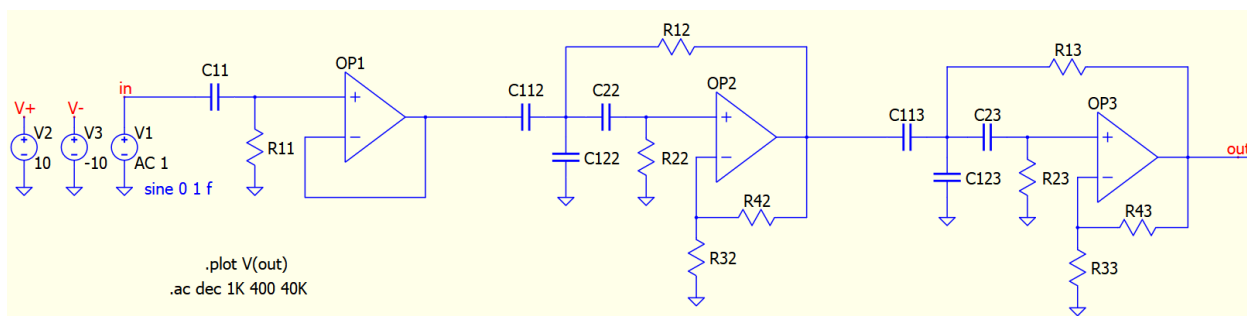
Efektivna vrijednost šuma, izračunava se tako da se funkcija gustoće šuma kvadrira, zatim integrira i na kraju korjenjuje.

Tablica 6.1: Efektivna vrijednost šuma

	1. sekcija	2. sekcija	3. sekcija	Ukupno
E_n [μV]	2.565	8.329	12.074	14.891

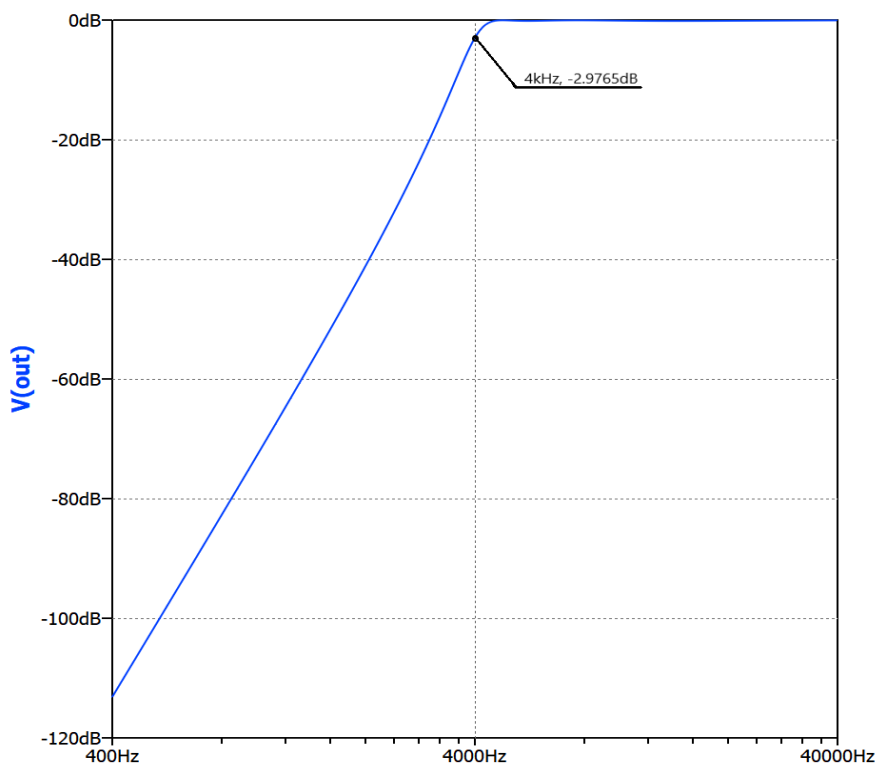
7. SIMULACIJA U SPICE PROGRAMU

U ovom poglavlju izračunate karakteristike će se Matlab izračunate frekvencijske karakteristike, vremenski odzivi, šum, te Monte Carlo analiza.

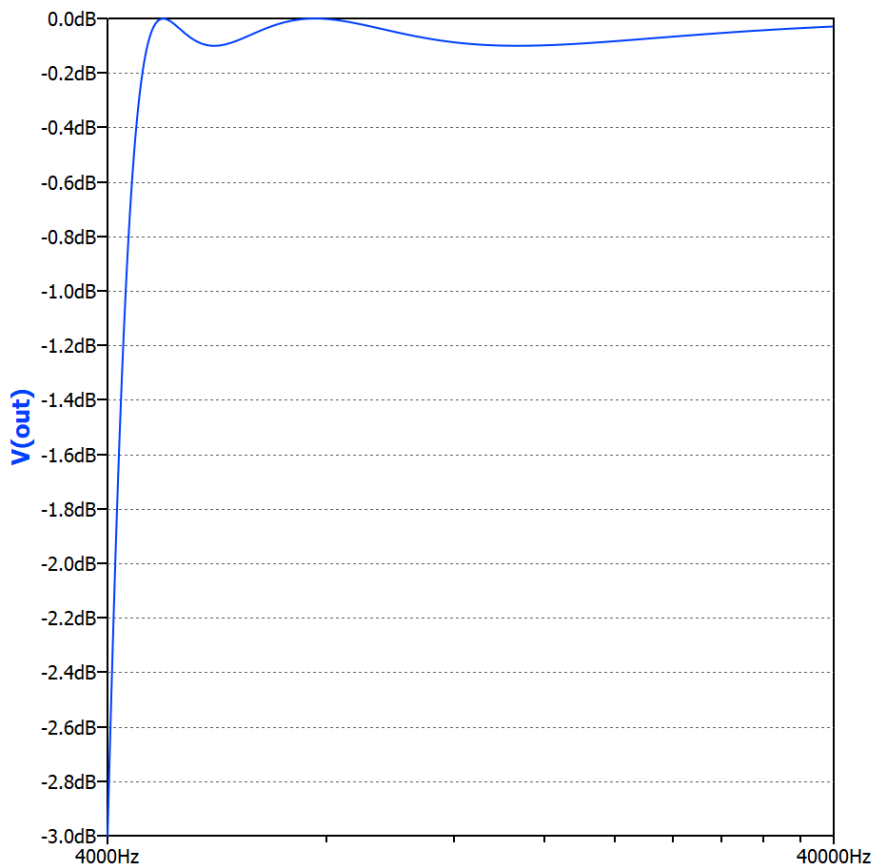


Slika 7.1. Shema VP filtra 5. reda u programu QSPICE

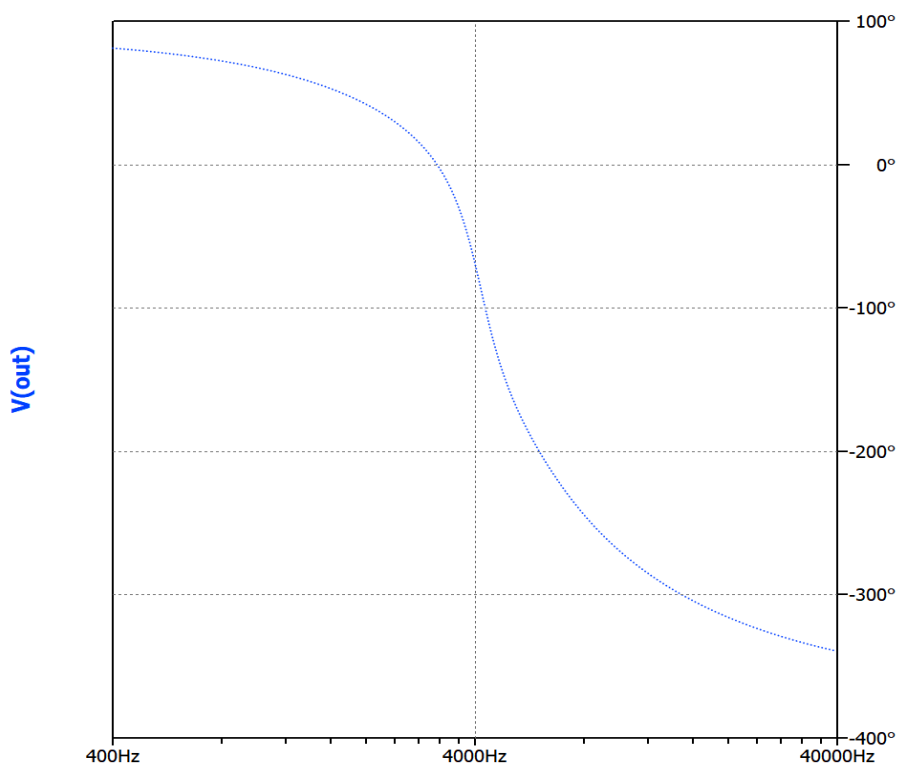
7.1. Frekvencijske karakteristike i vremenski odzivi



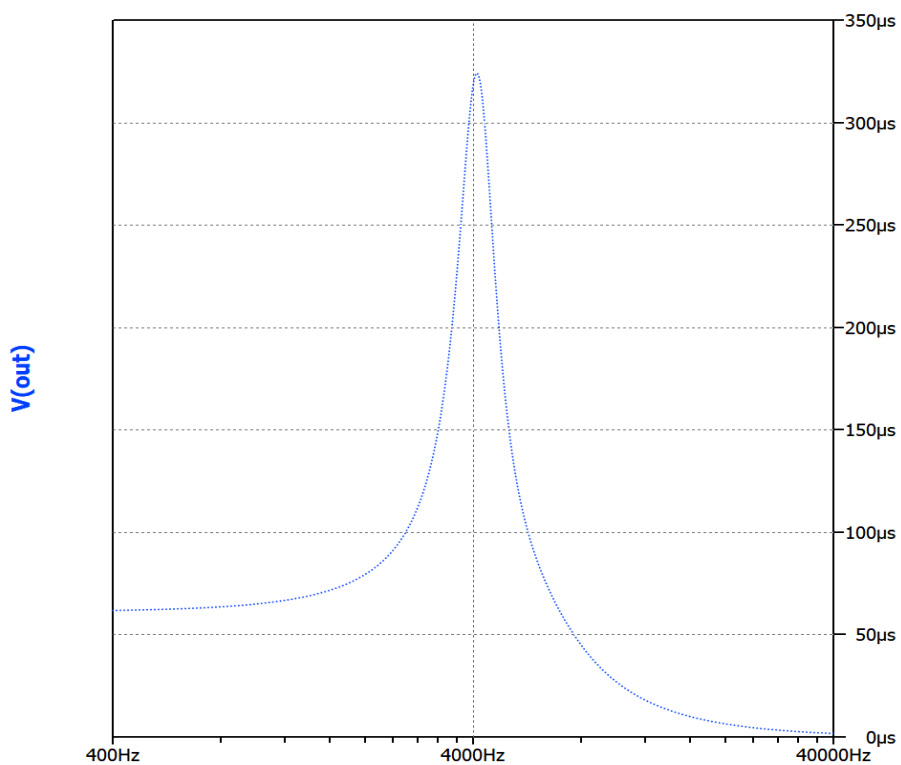
Slika 7.2. Amplitudna karakteristika



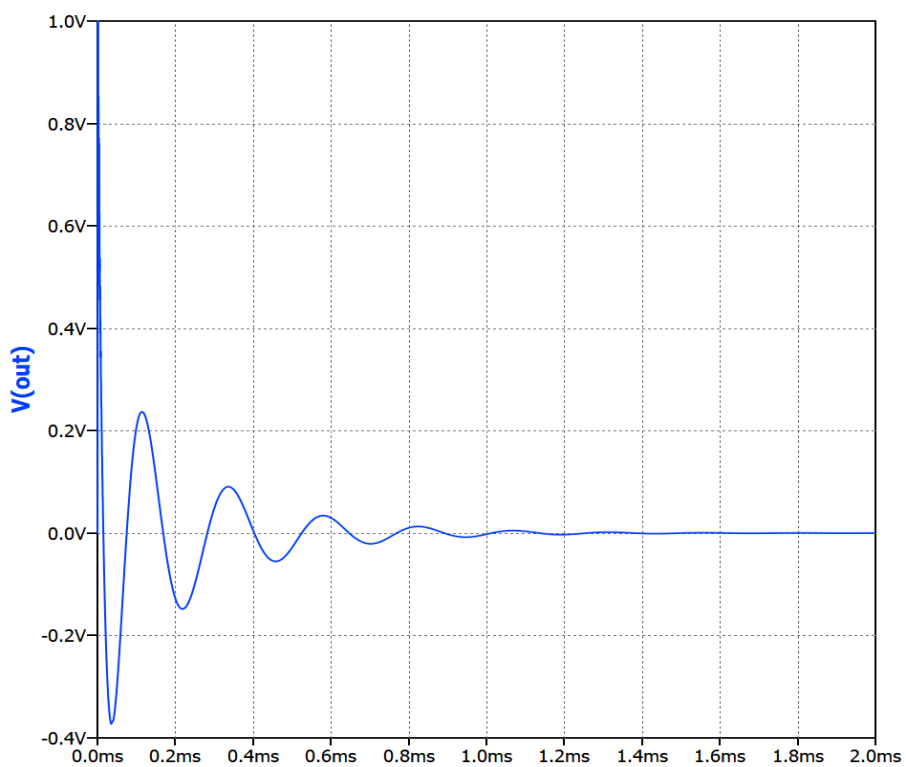
Slika 7.3. Amplitudna karakteristika u propusnom području



Slika 7.4. Fazno frekvencijska karakteristika



Slika 7.5. Karakteristika grupnog kašnjenja

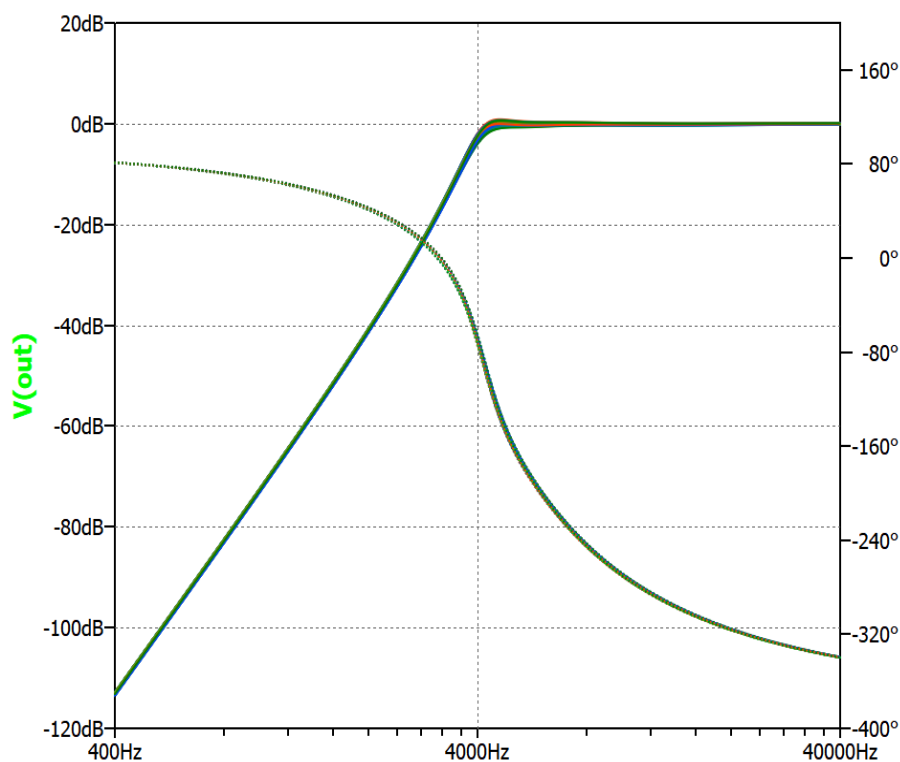


Slika 7.6. Skokovni odziv

Usporedbom odziva između Matlaba i QSPICE, može se zaključiti da amplitudne karakteristike, fazne karakteristike, karakteristika grupnog kašnjenja, te skokovnog odziva gotovo identične.

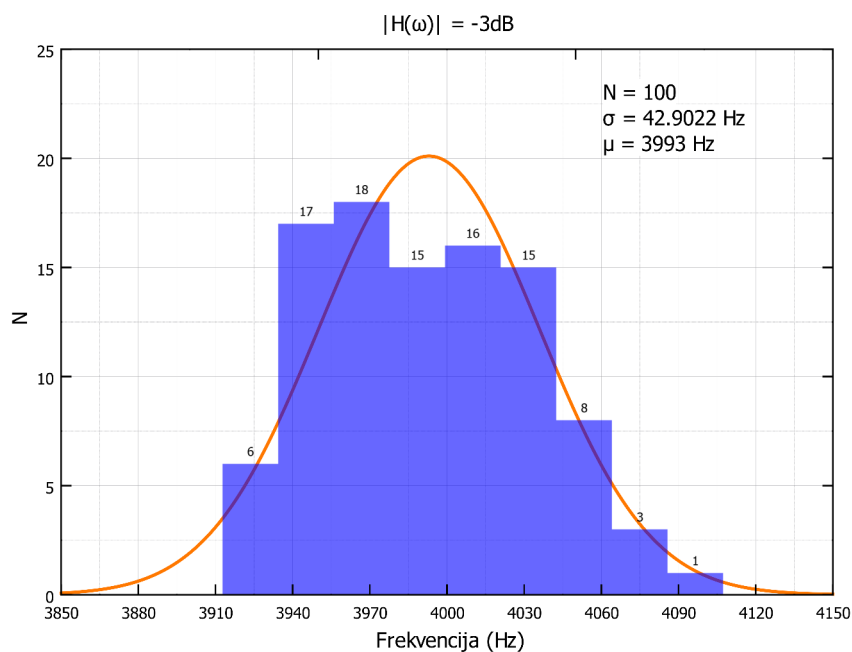
7.2. Monte Carlo analiza

Izvršena je Monte Carlo analiza, gdje je tolerancija komponenata 1%. Simulacija ima sto prolaza, odnosno simulacija se ponavlja sto puta, uz zamjenu vrijednosti komponenata.



Slika 7.7. Monte Carlo analiza, $N=100$

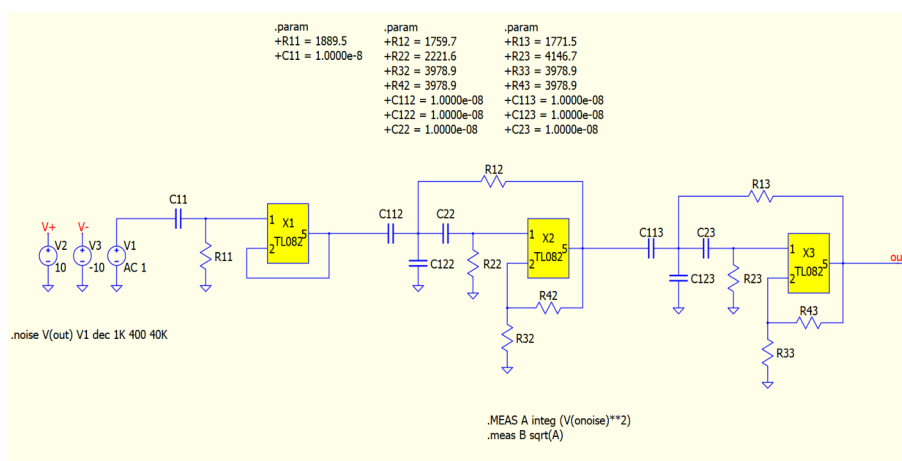
Nakon završetka Monte Carlo analize dobije se 100 amplitudnih karakteristika. Zatim se podaci pohranjuju i primjenom Matlaba se može dobiti vrijednost frekvencije pri kojoj pojedina amplitudna karakteristika ima vrijednost -3 dB . Primjenom histograma može se prikazati kako izgleda rasip granične frekvencije filtra u ovisnosti od promjene komponenata.



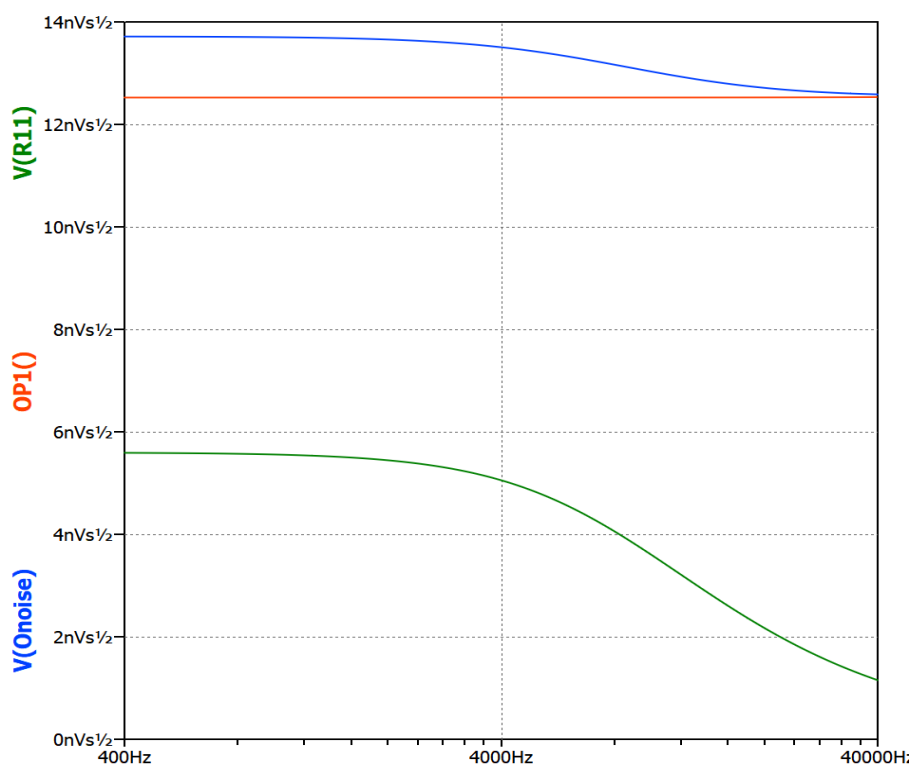
Slika 7.8. Histogram rasipa frekvencija

7.3. Šum

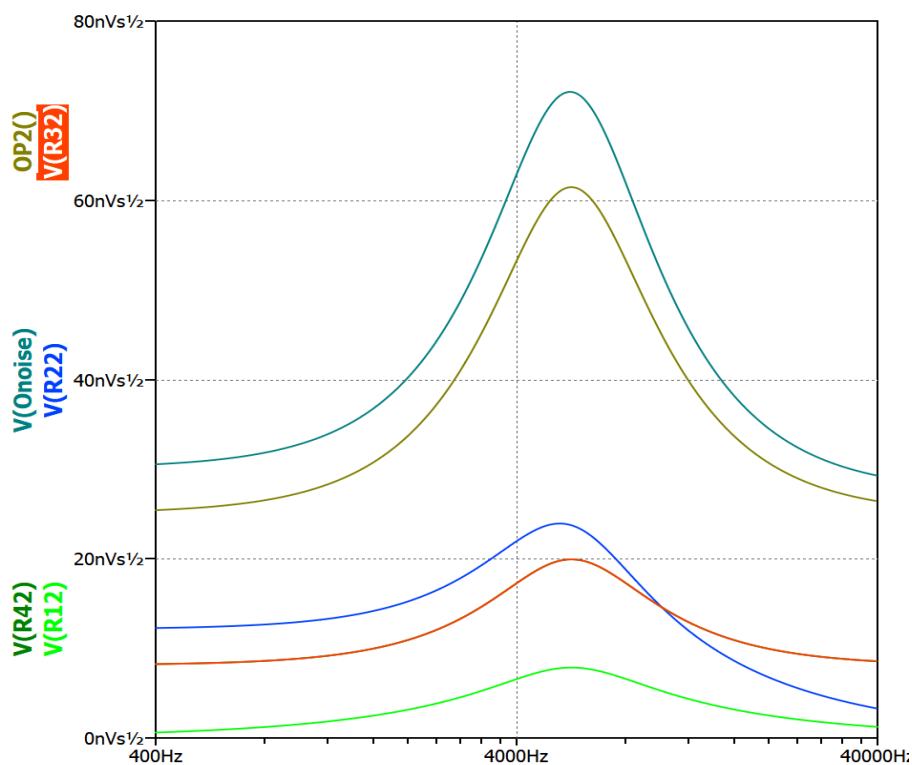
U ovom poglavlju potrebno je izvršiti provjeru izračunatih vrijednosti spektralne gustoće šuma. Šum će biti podijeljen prema sekcijama, te će se prikazati ukupan šum sve tri sekcije. Za izračun šuma dodano je operacijsko pojačalo TL082.



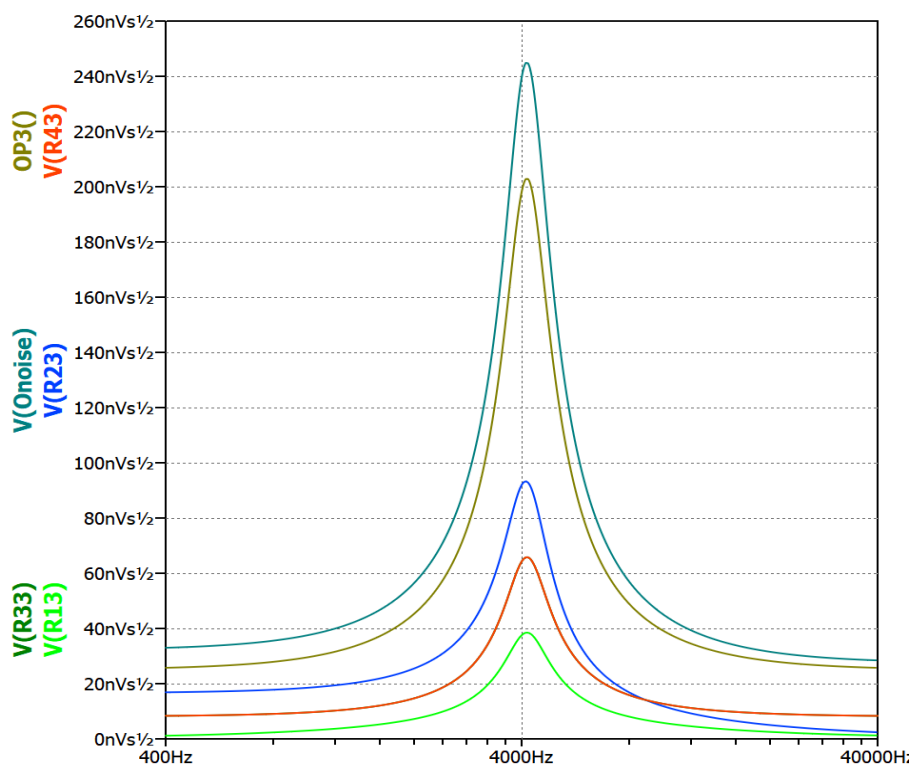
Slika 7.9. Shema spoja za mjerenje gustoće šuma



Slika 7.10. Gustoća napona šuma 1. sekcije



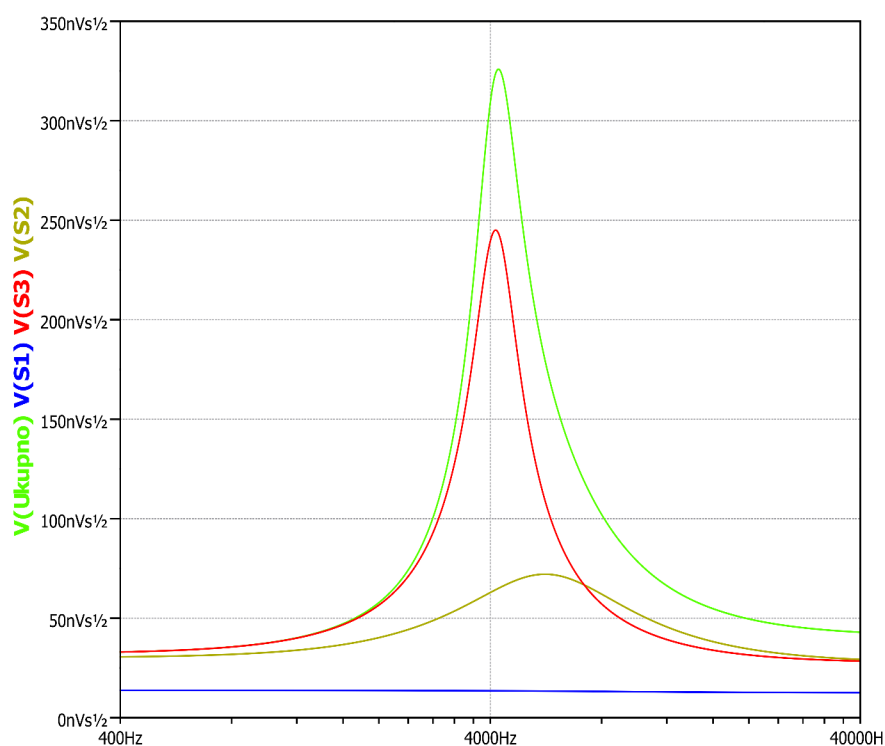
Slika 7.11. Gustoća napona šuma 2. sekcije



Slika 7.12. Gustoća napona šuma 3. sekcije

Kada se promotri izmjerena gustoća šuma, može se primijetiti da u svim sekcijama najveći doprinos dolazi od operacijskog pojačala. Dok je slijedeći najveći doprinos dolazi od R_{11} u prvoj sekciji, R_{22} , R_{32} i R_{42} u drugoj sekciji. Te u trećoj sekciji R_{23} , R_{33} i R_{43} . Potrebno je primijetiti da su iznosi šuma otpornika R_{32} , R_{42} , R_{33} i R_{43} jednaki pa su na samom grafičkom prikazu prikazani jedan preko drugog.

Zatim je na donjoj slici prikazan ukupan šum kaskade i svake pojedine sekcije. Može se primijetiti da najveći doprinos šuma ima treća sekcija. Te da je najmanji doprinos prve sekcije. Na graničnoj frekvenciji gustoća šuma je jednaka $308.92 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$.



Slika 7.13. Gustoća šuma svake pojedine sekcije i ukupna gustoća šuma kaskade

Kvadriranjem spektralne gustoće šuma i integracijom, može se dobiti efektivna vrijednost napona šuma.

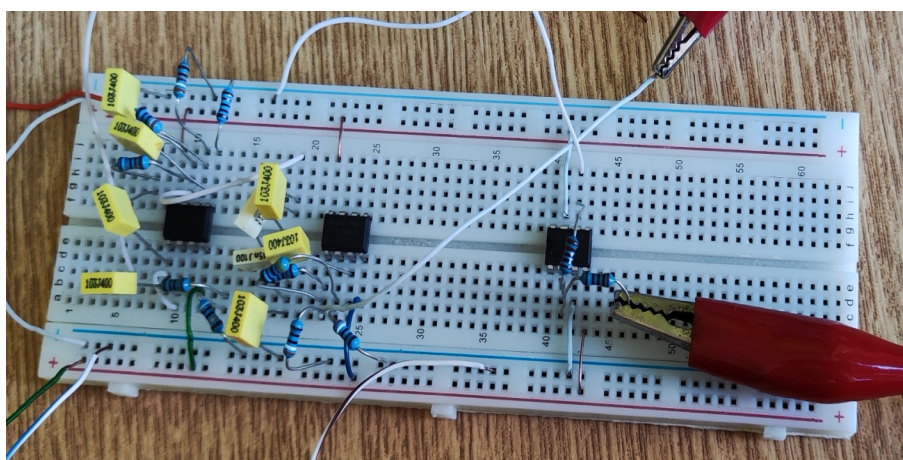
Tablica 7.1. Efektivna vrijednost napona šuma

	1. sekcija	2. sekcija	3. sekcija	Ukupno
E_n [μV]	2.561	8.291	12.021	17.399

Usporedbom iz vrijednosti dobivenih izračunom u Matlabu, može se zaključiti da je odstupanje po sekcijama minimalno, dok je ukupna efektivna vrijednost šuma odstupa za $3 \mu\text{V}$. Što je vjerojatno uslijed točnijeg modela operacijskog pojačala.

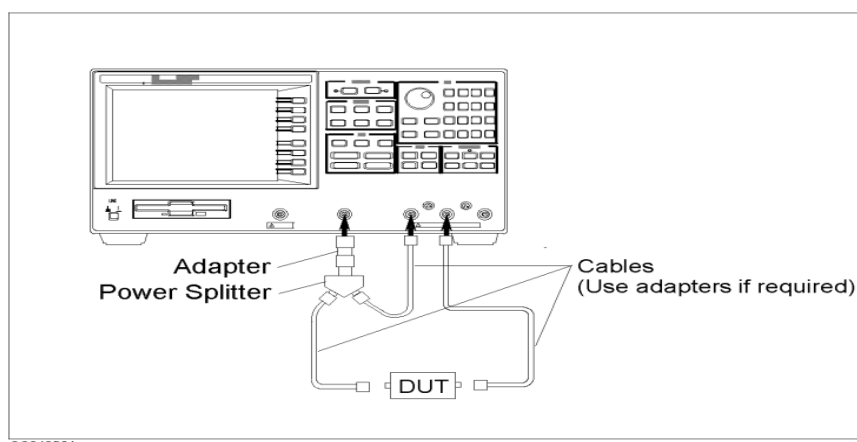
8. LABORATORIJSKA REALIZACIJA

Nakon simulacije u SPICE-u i Matlabu može se prijeći na fizičku realizaciju VP filtra 5. reda. Fizička realizacija započinje odabirom komponenata, a zatim i samim spajanjem na eksperimentalnoj pločici. Provjera granične frekvencije vrši se tako da se sa funkcijskim generatorom generiraju frekvencije amplitude 1 V. Te se uz pomoć osciloskopa mjeri vrijednost amplitude na izlazu iz filtra koja iznosi 0.707 V, nakon čega se očita granična frekvencija. Ako je provjera funkcionalnosti filtra uspješna može se prijeći na mjerenje mrežnim analizatorom Agilent 4395A.



Slika 8.1. Realizacija VP filtra 5. reda

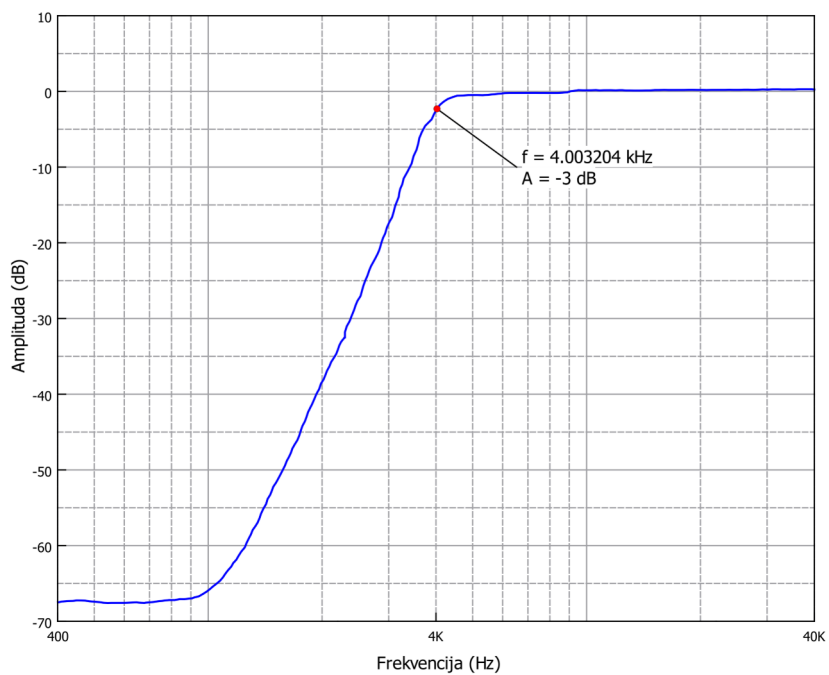
Na slici 8.1 može se vidjeti realizacija filtra 5. reda lijevo, dok donja slika prikazuje način spajanja mrežnog analizatora. DUT predstavlja uređaj koji se mjeri, odnosno filter.



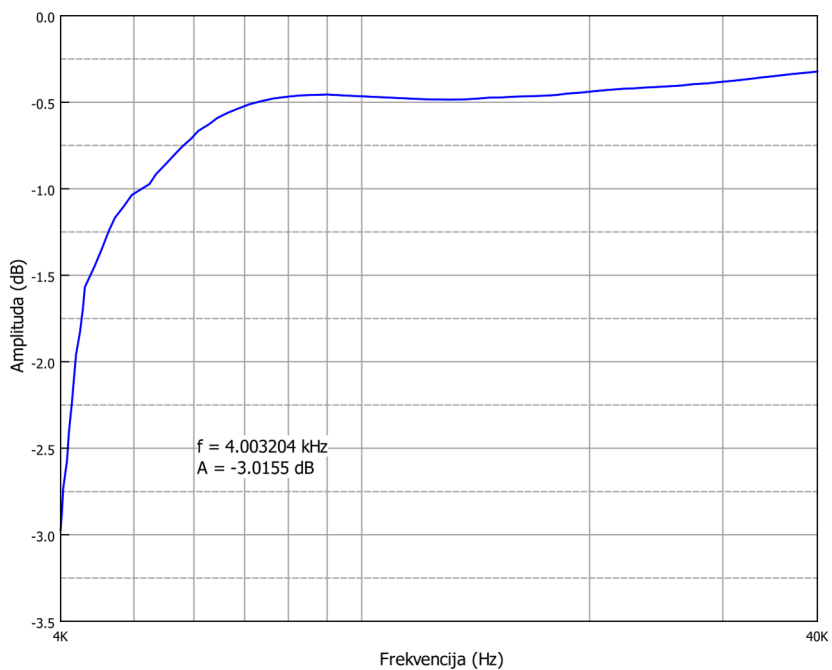
Slika 8.2. Shema spajanja mrežnog analizatora

	Element	Idealna vrijednost	Stvarna vrijednost	Odstupanje
1. sekcija	R	1889.7 Ω	1891 Ω	-0.68%
	C	10 nF	9.95 nF	-0.5%
2. sekcija	R12	1759.7 Ω	1742 Ω	1%
	R22	2221.6 Ω	2222 Ω	-0.018%
	R32	3978.9 Ω	3975 Ω	0.098%
	R42	3978.9 Ω	3976 Ω	0.072%
	C112	10 nF	9.98 nF	-0.2%
	C122	10 nF	10.03 nF	0.3%
	C22	10 nF	9.97 nF	-0.3%
3. sekcija	R13	1771.5 Ω	1768 Ω	-1.97%
	R23	4146.7 Ω	4148 Ω	0.31%
	R33	3978.9 Ω	3974 Ω	-0.123%
	R43	3978.9 Ω	3975 Ω	-0.098%
	C113	10 nF	9.98 nF	-0.2%
	C123	10 nF	10.01 nF	0.1%
	C23	10 nF	9.97 nF	-0.3%

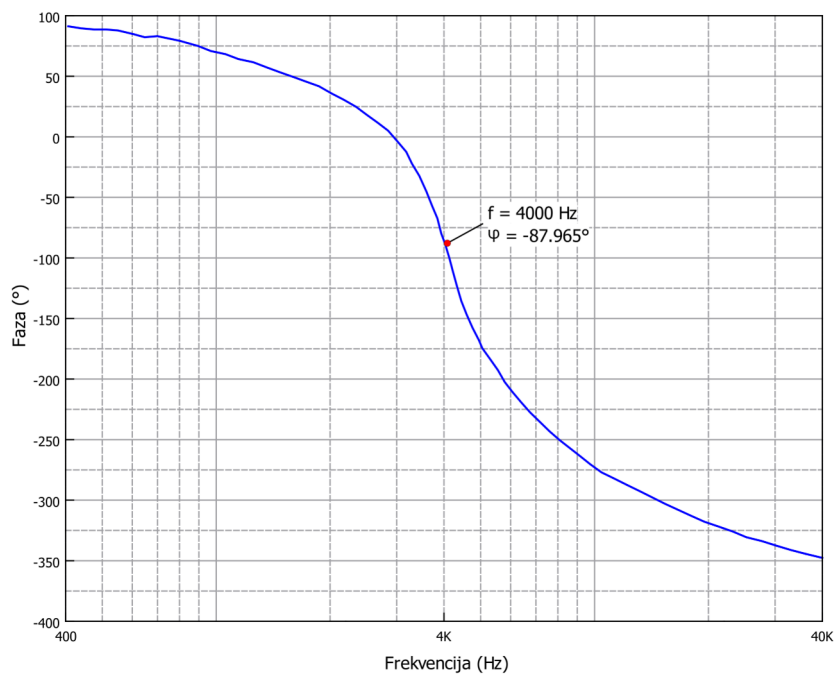
Na donjim slikama mogu se vidjeti izmjerene karakteristike filtra. Amplitudna karakteristika ima minimalno odstupanje od idealne karakteristike. Međutim u propusnom području može se primijetiti odstupanje od 0.5 dB, što predstavlja pogrešku od 5 % u amplitudi, te se pogreška smanjuje povećanjem frekvencije. Fazna karakteristika nema većih odstupanja od izračunatih, dok karakteristika grupnog kašnjenja u točki 4 kHz ima jednaku vrijednost grupnog kašnjenja kao i u simulaciji. Iako karakteristika grupnog kašnjenja ima u nepropusnom području oscilacije, zato jer se mjeri unutar šuma samog instrumenta (-70 dB). Šum filtra ima jednak iznos kao i u QSPICE simulaciji, te skokovni odziv gotovo identično odgovara simuliranom skokovnom odzivom u QSPICE-u.



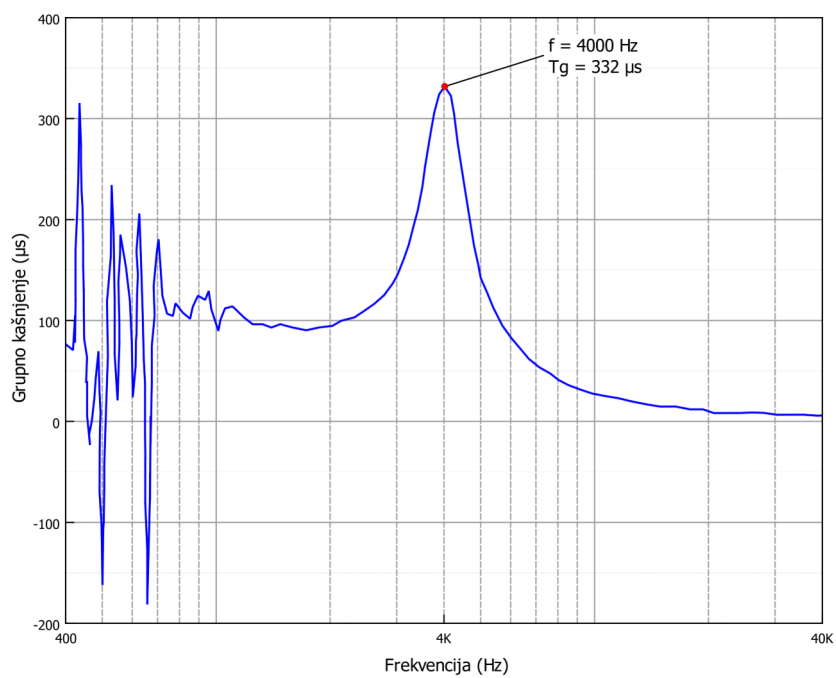
Slika 8.3. Amplituda mjerena analizatorom, IF BW = 10 Hz



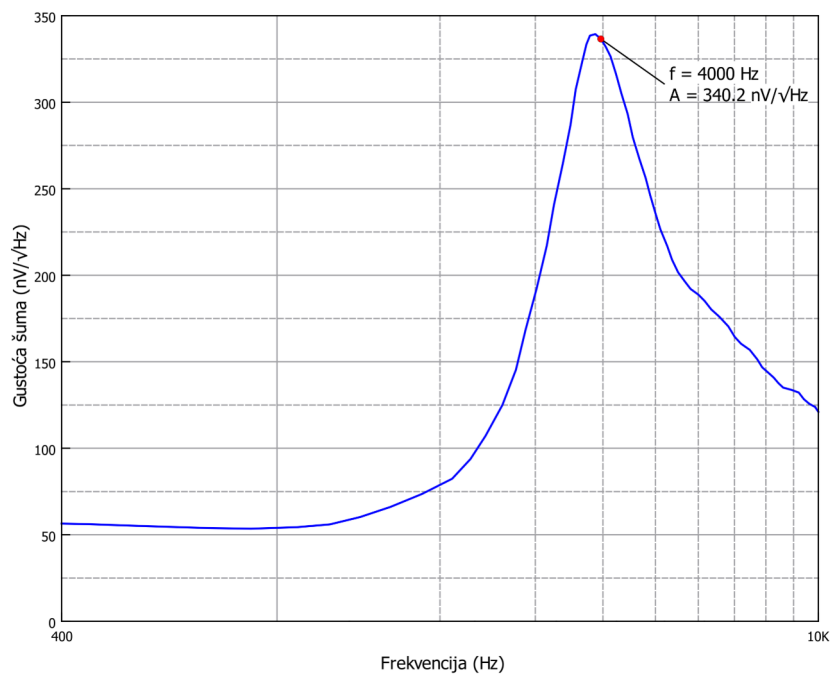
Slika 8.4. Amplitudna karakteristika u propusnom području, IF BW = 10 Hz



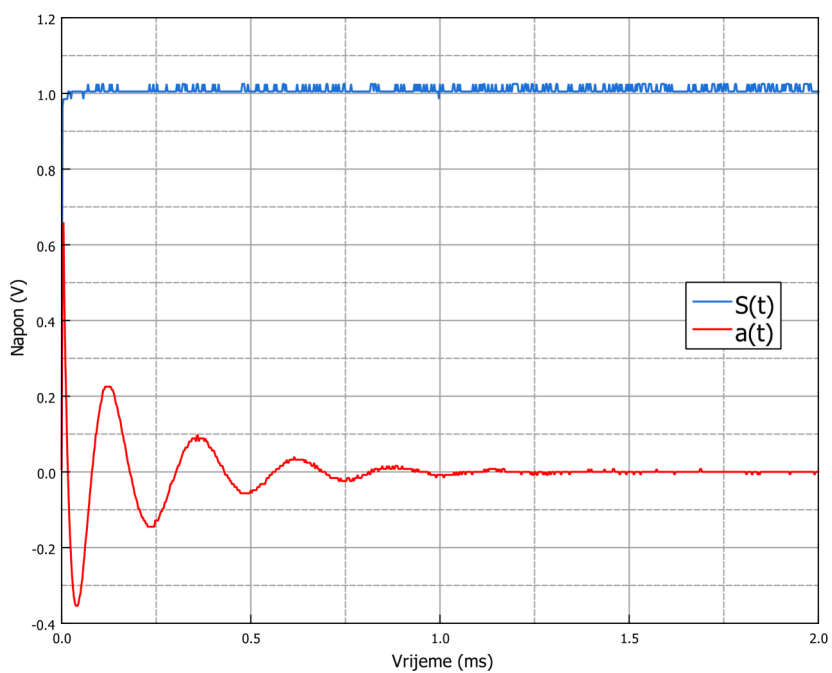
Slika 8.5. Fazna karakteristika, IF BW = 2 Hz



Slika 8.6. Karakteristika grupnog kašnjenja, IF BW = 2 Hz



Slika 8.7. Spektralna gustoća šuma, $RBW = 10 \text{ Hz}$, $VBW = 1 \text{ Hz}$



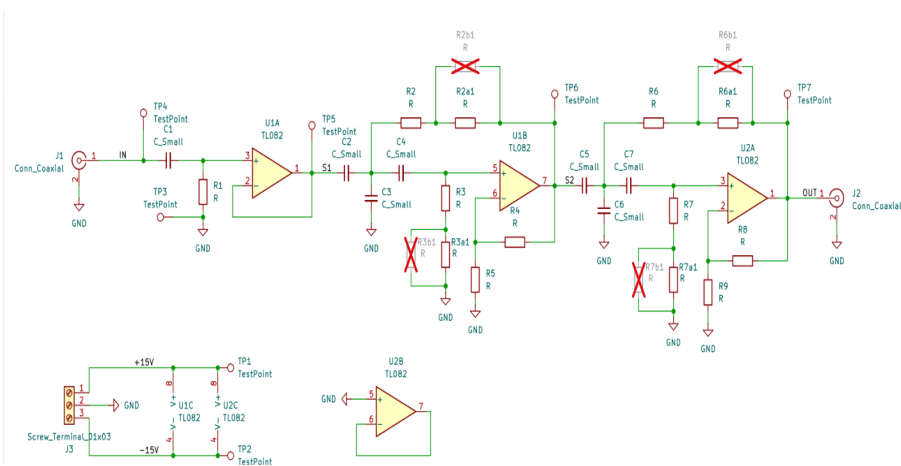
Slika 8.8. Skokovni odziv filtra

9. IZRADA TISKANE PLOČICE

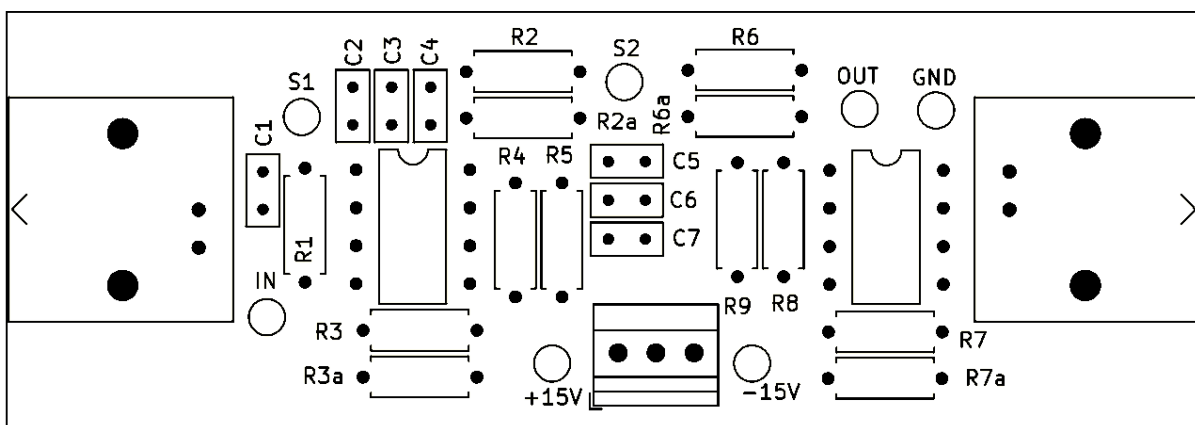
Nakon uspješne analize i provjere u SPICE programu. Te provjere fizičkom realizacijom i mrežnim analizatorom. Zadnji korak je izrada tiskane pločice filtra.

Kod izrade tiskane pločice potrebno je predvidjeti mogućnost dodavanja otpora u seriju, kako bi se vrijednost otpora dobila približno jednaka izračunatoj. Otpornici R_2 , R_3 , R_6 , R_7 u shemi dolje prikazuje otpornike koji imaju mogućnost korekcije otpora. U slučaju da otporniku nije potrebna korekcija, postoji mogućnost kratkog spajanja nekorištenog otpornika. Operacijsko pojačalo koje se upotrebljava je TL082, dvostruko operacijsko pojačalo koje je upotrijebljeno kod realizacije i kod simulacije filtra.

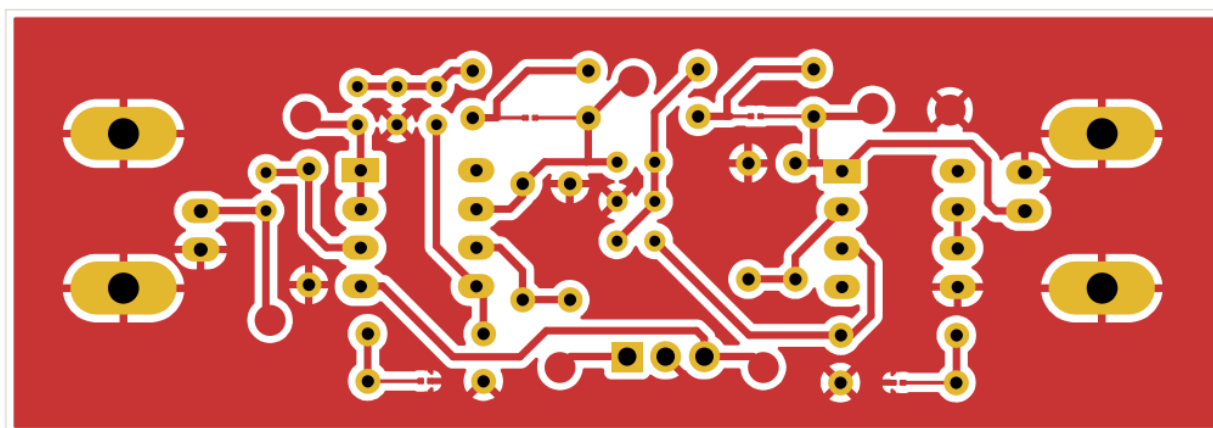
Prvi korak dizajna VP filtra 5. reda u programu KiCAD je nacrtati shemu spoja. Zatim se mogu dodati i vrijednosti komponenata. Te se odabire oblik kućišta pojedine komponente, npr. otpornici, kondenzatori i operacijsko pojačalo mogu se postavljati na pločicu (eng. surface mount) ili kroz pločicu (eng. through hole). U ovom slučaju se odabiru komponente koje se postavljaju kroz pločicu.



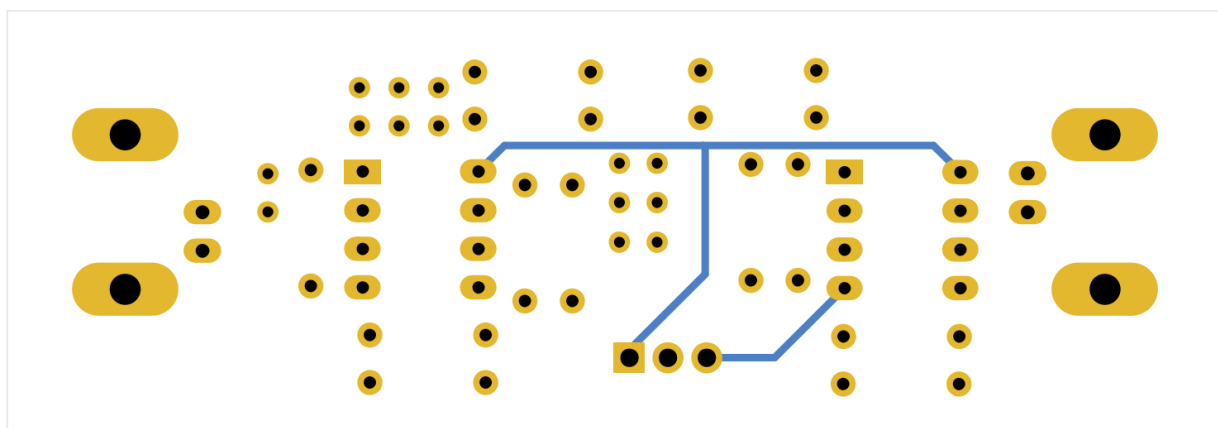
Slika 9.1. Shema VP filtra 5. reda



Slika 9.2. Raspored komponenti

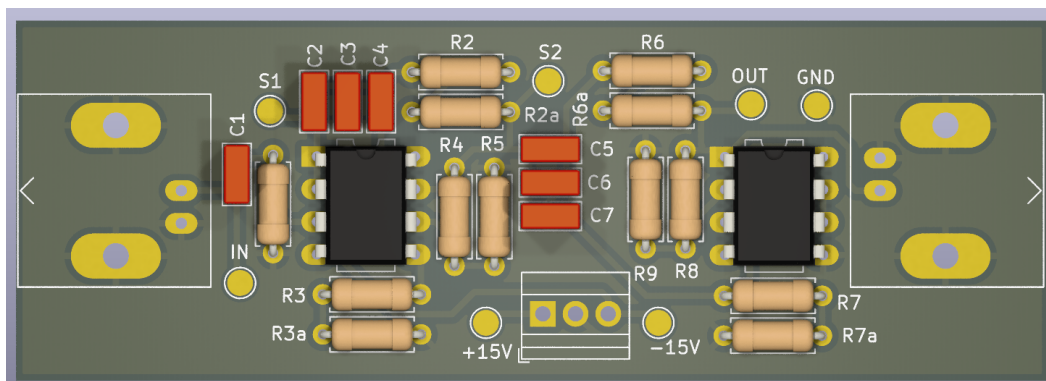


Slika 9.3. Raspored vodova sa gornja strane



Slika 9.4. Raspored vodova sa donje strane

U programu KiCAD je moguće prikazati tiskanu pločicu i 3D.



Slika 9.5. 3D prikaz tiskane pločice

Komponente sklopa su postavljene, što bliže jedna drugoj da se dobije kompaktna tiskana pločica, uz smanjenje utjecaja parazitnih otpora i kapaciteta. Ulazni i izlazni signal se priključuje preko BNC priključnice. Dok se napajanje sklopa vrši preko stezaljki.

10. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu obrađena je teorija i analiza VP filtra 5. reda u kaskadnoj strukturi. Analiza filtra je započeta određivanjem normirane funkcije filtra po Chebyshev, nakon čega su izračunate frekvencijske karakteristike, vremenski odzivi i realizacija filtra. Zatim su se jednaki izračuni primijenili na denormirane prijenosne funkcije, denormiranje je izvršeno na frekvenciju od 4 kHz. Nakon čega se moglo prijeći na izračun Schoefflerove osjetljivosti i šuma denormiranih elemenata. Cijela analiza je odrađena u programskom paketu Matlab, te se provjera izračuna odradila u SPICE programu.

Potvrdom izračuna u SPICE programu se moglo prijeći na fizičku realizaciju filtra. Pri izradi filtra korišteni su otpornici E24 niza, kondenzatori iz E6 niza i operacijska pojačala TL082. Kako bi se dobila vrijednost otpora što sličnija izračunatoj, u seriju su se spajalo otpornike. Ukupno odstupanje otpora je svedeno na $\pm 2\%$. Provjera ispravnosti rada filtra je provjerena upotrebom funkcijskog generatora i osciloskopa, te vremenskog odziva filtra (skokovni odziv). Nakon čega se mrežnim analizatorom dobivene amplitudno frekvencijska karakteristika, fazno frekvencijska karakteristika, grupno vrijeme kašnjenja i spektralna gustoća napona šuma. Odstupanje amplitudno frekvencijske karakteristike iznosilo je 5%, uslijed odstupanja vrijednosti kapaciteta. Usporedbom fazno frekvencijske karakteristike i grupnog kašnjenja može se primijetiti, da je rezultat gotovo jednak simulaciji (SPICE 320 μs , analizator 332 μs). Gustoća šuma filtra je dok je kod realne realizacije i mjerenja razlika oko 10% (SPICE 315 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, mrežni analizator 340 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$).

Kako bi se poboljšale karakteristike filtra potrebno je realizirati filter na tiskanoj pločici. Potrebno obratiti pozornost na vrijednosti komponenata koje se upotrebljavaju. Realizacija tiskane pločice je obavljena u programu KiCAD, te se može proizvesti za realne potrebe.

LITERATURA

- [1] „filtar, električni - Tehnički leksikon“. Pristupljeno: 12. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/filtar-elektricni>
- [2]„MATLAB“. Pristupljeno: 30. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [3]„QSPICE™ Simulator“. Pristupljeno: 30. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.qorvo.com/design-hub/design-tools/interactive/https://www.qorvo.com/design-hub/design-tools/interactive/qspice>
- [4]„KiCad EDA“. Pristupljeno: 30. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.kicad.org/>
- [5]Stojković N.; Mijat N., „Analogna obrada signala”, Rijeka: Sveučilište u Rijeci – Tehnički fakultet, 2004.
- [6]„elektronika_uredaji_5_sum.pdf“. Pristupljeno: 16. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektronika_uredaji_5_sum.pdf
- [7]Šverko, Z.; Stojković, N.; Stojković, M., „Analogna obrada signala”, Rijeka: Sveučilište u Rijeci – Tehnički fakultet, 2021.
- [8]„tl082-n.pdf“. Pristupljeno: 16. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl082-n.pdf>

SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U ovom diplomskom radu objašnjen je postupak analize, te realizacije visokopropusnog filtra 5. reda u kaskadnoj strukturi. Analiza i simulacije izvršene su u programima Matlab i QSPICE. Te će se izraditi fizička realizacija. Kojoj će se realizacija ispitati s osciloskopom i mrežnim analizatorom. Potvrdom rezultata analize i fizičke izrade, može se doći do zaključka da filter radi ispravno prema zahtjevima. Nakon čega se može prijeći na dizajn tiskane pločice.

Ključne riječi:

- Visokopropusni filter 5. reda
- Chebysheva transformacija
- Frekvencijska karakteristika
- Spektralna gustoća šuma
- Schoefflerova osjetljivost

ABSTRACT AND KEYWORDS

In this thesis analysis procedure and realization of the 5th order high-pass filter in a cascade structure is explained. Analysis and simulations were performed in Matlab and QSPICE programs. Physical realization will be created. Which implementation will be tested with an oscilloscope and a network analyzer. By confirming the results of the analysis and physical realization, it can be concluded that the filter is working correctly according to the requirements. After that we can move on to the design of the printed circuit board.

Keywords:

- 5th order high-pass filter
- Chebyshev's approximation
- Frequency characteristics
- Spectral noise density
- Schoeffler's sensitivity

POPIS SLIKA I TABLICA

Slika 2.1. Prikaz sustava pobude i odziva.....	4
Slika 3.1. Raspored nula i polova.....	15
Slika 3.2. Prikaz amplitudno-frekvencijskih karakteristika.....	16
Slika 3.3. Normirana amplitudno-frekvencijska karakteristika u području propuštanja.....	17
Slika 3.4. Fazno frekvencijska karakteristika.....	18
Slika 3.5. Karakteristika grupnog kašnjenja.....	19
Slika 3.6. Prikaz impulsnog odziva filtra.....	20
Slika 3.7. Prikaz skokovnog odziva filtra.....	21
Slika 3.8. Aktivna sekcija 1. reda (lijevo), aktivna sekcija 2. reda (desno)[7].....	21
Slika 3.9. Shema VP filtra 5. reda s dodanim vrijednostima normiranih elemenata.....	24
Slika 4.1. Raspored polova i nula.....	26
Slika 4.2. Amplitudna karakteristika denormirane prijenosne funkcije.....	27
Slika 4.3. Denormirana amplitudno frekvencijska karakteristika u području propuštanja.....	28
Slika 4.4. Denormirana fazno frekvencijska karakteristika.....	29
Slika 4.5. Denormirana karakteristika grupnog kašnjenja.....	30
Slika 4.6. Denormirani impulсни odziv filtra.....	31
Slika 4.7. Skokovni odziv denormiranog filtra.....	32
Slika 4.8. Shema VP filtra 5. reda sa denormiranim elementima.....	33
Slika 5.1. Schoefflerova osjetljivost 1. sekcije.....	34
Slika 5.2. Schoefflerova osjetljivost 2. sekcije.....	35
Slika 5.3. Schoefflerova osjetljivost 3. sekcije.....	35
Slika 5.4. Schoefflerova osjetljivost filtra.....	36
Slika 6.1. Gustoća šuma 1. sekcije.....	37
Slika 6.2. Gustoća šuma 2. sekcije.....	38
Slika 6.3. Gustoća šuma 3. sekcije.....	38
Slika 6.4. Gustoća šuma sve tri sekcije i ukupan šum.....	39
Slika 7.1. Shema VP filtra 5. reda u programu QSPICE.....	40
Slika 7.2. Amplitudna karakteristika.....	40
Slika 7.3. Amplitudna karakteristika u propusnom području.....	41
Slika 7.4. Fazno frekvencijska karakteristika.....	41

Slika 7.5. Karakteristika grupnog kašnjenja.....	42
Slika 7.6. Skokovni odziv.....	42
Slika 7.7. Monte Carlo analiza, N=100.....	43
Slika 7.8. Histogram rasipa frekvencija.....	44
Slika 7.9. Shema spoja za mjerenje gustoće šuma.....	44
Slika 7.10. Gustoća napona šuma 1. sekcije.....	45
Slika 7.11. Gustoća napona šuma 2. sekcije.....	45
Slika 7.12. Gustoća napona šuma 3. sekcije.....	46
Slika 7.13. Gustoća šuma svake pojedine sekcije i ukupna gustoća šuma kaskade.....	47
Slika 8.1. Realizacija VP filtra 5. reda.....	48
Slika 8.2. Shema spajanja mrežnog analizatora.....	48
Slika 8.3. Amplituda mjerena analizatorom, IF BW = 10 Hz.....	50
Slika 8.4. Amplitudna karakteristika u propusnom području, IF BW = 10 Hz.....	50
Slika 8.5. Fazna karakteristika, IF BW = 2 Hz.....	51
Slika 8.6. Karakteristika grupnog kašnjenja, IF BW = 2 Hz.....	51
Slika 8.7. Spektralna gustoća šuma, RBW = 10 Hz, VBW = 1 Hz.....	52
Slika 8.8. Skokovni odziv filtra.....	52
Slika 9.1. Shema VP filtra 5. reda.....	53
Slika 9.2. Raspored komponenti.....	54
Slika 9.3. Raspored vodova sa gornja strane.....	54
Slika 9.4. Raspored vodova sa donje strane.....	54
Slika 9.5. 3D prikaz tiskane pločice.....	55
Tablica 2.1. Transformacije NP prototipa filtra.....	7
Tablica 3.1. Normirani parametri polova.....	23
Tablica 3.2. Izračunate normirane vrijednosti elemenata.....	24
Tablica 4.1. Parametri denormiranih polova.....	32
Tablica 4.2. Vrijednosti denormiranih elemenata.....	33
Tablica 5.1. Višeparameterska mjera Schoefflerove osjetljivosti.....	36
Tablica 6.1: Efektivna vrijednost šuma.....	39
Tablica 7.1. Efektivna vrijednost napona šuma.....	47

