

# Parametri električkih filtara

---

**Kruljac, Luka**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:576294>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-11**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**PARAMETRI ELEKTRIČKIH FILTERA**

**Završni rad**

**Luka Kruljac**

**Osijek, 2018.**

# Sadržaj

<b>1. Uvod.....</b>	<b>1</b>
1.1 Zadatak završnog rada .....	1
<b>2. Teorija o filtrima .....</b>	<b>2</b>
2.1 Općenito o filtrima.....	2
2.2 Parametri filtera .....	3
2.2.1 Prijenosna funkcija $H(j\omega)$ .....	4
2.2.2 Amplitudno - frekvencijska karakteristika .....	6
2.2.3 Maksimalno pojačanje.....	7
2.2.4 Fazni pomak .....	9
2.2.5 Fazno – frekvencijska karakteristika .....	12
2.2.6 Granična frekvencija .....	13
2.2.7 Širina pojasa .....	19
2.3 Podjele filtera .....	20
2.3.1 Prema propusnosti .....	20
2.3.2 Prema aktivnosti komponenti od kojih je sastavljen .....	24
2.3.3 Prema kontinuiranosti .....	24
2.3.4 Prema vrsti signala kojeg filtriraju .....	24
2.3.5 Prema linearnosti.....	24
2.4 Primjena filtera.....	25
2.4.1 Radio-tehnika .....	25
2.4.2 Audio-tehnika.....	25
2.4.3 Automobilska industrija .....	25
<b>3. Filter u automobilskoj industriji, modeliranje i izrada.....</b>	<b>26</b>
3.1 Problem.....	26
3.2 Parametri .....	28
3.3 Modeliranje .....	29
<b>4. Simulacija, mjerenje i analiza parametara .....</b>	<b>31</b>

4.1	Mjerenja .....	31
4.2	Simulacija .....	34
<b>5.</b>	<b>Zaključak .....</b>	<b>38</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>.....</b>	<b>39</b>
<b>Sažetak.....</b>	<b>.....</b>	<b>40</b>
	Ključne riječi.....	40
<b>Abstract.....</b>	<b>.....</b>	<b>41</b>
	Key words .....	41
<b>Životopis.....</b>	<b>.....</b>	<b>42</b>
<b>Prilozi.....</b>	<b>.....</b>	<b>43</b>

## 1. Uvod

Gotovo je nemoguće pronaći imalo složenije sklopovlje unutar kojeg se ne pojavljuje neki oblik električkog filtra. Ovaj rad će pokušati objasniti što su to filtri i koji su njegovi parametri. Iako postoje razne izvedbe filtara, u ovom radu naglasak je na jednostavnim pasivnim filtrima s isključivo linearnim komponentama. Osim raznih izvedbi, filtri se nalaze i u raznim primjenama, a ovaj rad će opisati jednu konkretnu primjenu unutar automobilske industrije.

Drugo poglavlje „Općenito o filtrima“ donosi teorijsku podlogu o najjednostavnijim tipovima filtara. Objasnjava pojedine parametre teorijom, matematičkim izrazima i grafovima, osnovne podjele filtara te primjenu filtara.

U poglavlju broj 3 predstavlja se konkretan problem, odnosno zadatak kojim se iduća 2 poglavlja bave. Predstavljeni su zahtjevi za filter kojim se rješava spomenuti problem te se isti filter modelira odnosno izrađuje.

Posljednje poglavlje, poglavlje 4 donosi rezultate simulacije i mjerenja filtra iz poglavlja 3 te analizu koliko izrađeni/modelirani filter svojim parametrima zadovoljava zahtjeve.

### 1.1 Zadatak završnog rada

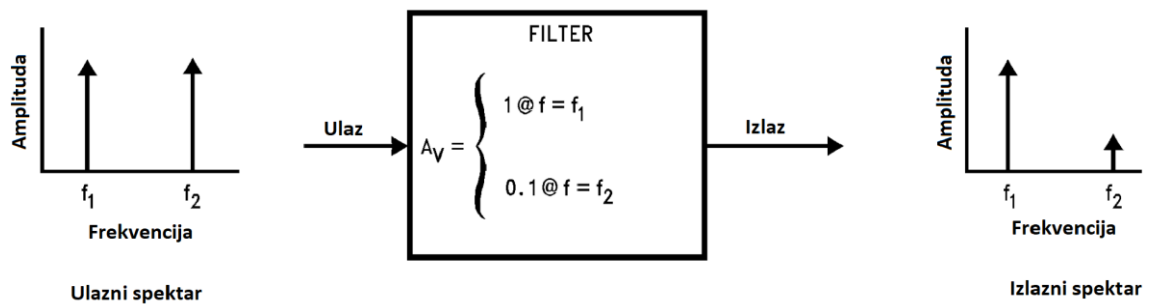
Zadatak ovog završnog rada je opisati osnovne vrste električkih filtara s obzirom na njihovu propusnost te izvesti izraze za njihove parametre u ovisnosti o vrijednostima komponenti odnosno modela od kojih su sastavljeni. Osim teorijskog opisa u sklopu završnog rada provest će se:

- Modeliranje filtra za unaprijed određenu svrhu
- Simulacija modela pomoću MATLAB Simulink alata
- Izrada stvarnih filtara
- Električka mjerenja na izrađenim filtrima
- Usporedba rezultata mjerenja i simulacije
- Analiza rezultata odnosno dobivenog rješenja

## 2. Teorija o filtrima

### 2.1 Općenito o filtrima

Filtar je sustav odnosno sklop koji signal doveden na ulazne stezaljke obrađuje tako da određene frekvencije dovedenog signala pojačava ili prigušuje te tako obrađeni, odnosno filtriran signal emitira na izlaznim stezaljkama. Jednostavnije, filter je pojačalo čije pojačanje ovisi o frekvenciji. Ako se govori o električkim filtrima onda se pod pojmom signala misli na struju ili napon. Slika 2.1 slikovito prikazuje ulogu filtra, dok je na slici 2.2 vidljiva konkretna izvedba filtra.



Slika 2.1<sup>1</sup> Filtar kao sustav koji djeluje na spektar ulaznog signala



Slika 2.2 Filtar u konkretnoj izvedbi

<sup>1</sup> <http://www.ti.com/lit/an/snoa224a/snoa224a.pdf>

## 2.2 Parametri filtara

Postoji više parametara električkih filtara te često proizlaze jedni iz drugih. Mogu se opisati matematičkim izrazima ili crtežima u obliku grafova. Najčešće korišteni parametri pri modeliranju, izradi i općenito korištenjem filtara jesu:

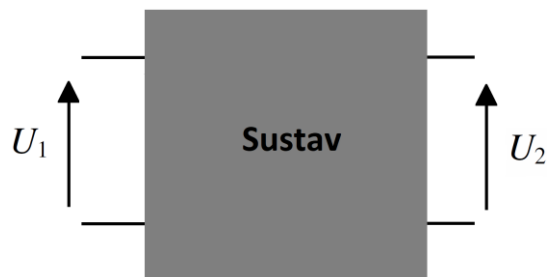
- Prijenosna funkcija (eng. Transfer function)
- Amplitudno – frekvencijska karakteristika (eng. Amplitude - frequency graph)
- Fazno – frekvencijska karakteristika (eng. Phase - frequency graph)
- Granična frekvencija (eng. Cutoff frequency)
- Širina pojasa (eng. Bandwitht)
- Maksimalno pojačanje (eng. Maximum gain)
- Fazni pomak (eng. Phase shift)

Osim gore navedenih parametra važno je spomenuti i „fizikalne“ parametre poput:

- Granični napon
- Granična struja
- Temperaturni interval

## 2.2.1 Prijenosna funkcija $H(j\omega)$

Prijenosna funkcija se definira kao omjer fazora izlaznog i fazora ulaznog napona. Fazori ulaznog i izlaznog napona su funkcije ovisne o frekvenciji pa je i sama prijenosna funkcija ovisna o frekvenciji stoga se i označava s  $H(j\omega)$ . Budući je definirana putem fazora, treba uočiti da se može primjenjivati samo nad monoharmonijskim funkcijama, odnosno za primjenu nad višeharmonijskim funkcijama nužno je proračunavati svaki harmonik zasebno. Ukoliko su poznate sve konstante prijenosne funkcije, funkcija se može promatrati i kao kompleksni broj koji će množenjem s fazorom poticaja dati fazor odziva. Općenito se koristi za opis nekog sustava pa se tako može primijeniti i za opis filtra.

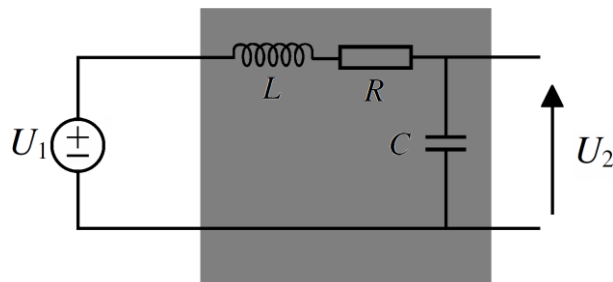


**Slika 2.3** Blokovski prikaz dvoprilaznog sustava

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \quad (2-1)$$

Određivanjem fazora izlaznog napona te dovođenjem u omjer s ulaznim dobije se prijenosna funkcija.

Za primjer uzeti sustav kao sa slike 2.4. Ukoliko su  $R, L$  i  $C$  konstante, a  $U_1$  vremenska funkcija napna  $U_1(t)$ , lako se može dobiti izraz za  $U_2$ , odnosno  $U_2(t)$ . Budući da se svaka funkcija može rastaviti u sumu sinusnih funkcija, a svaka se sinusna funkcija može prikazati pomoću fazora, za određivanje prijenosne funkcije koristit će se fazorski račun.



**Slika 2.4** Primjer jednostavnog sustava



Budući je  $\dot{U}_1$  zadan, prema definiciji prijenosne funkcije potrebno je još odrediti samo izlazni napon  $\dot{U}_2$ . Promatrajući sustav, izlazni napon  $\dot{U}_2$  jednak je naponu na kapacitetu C, odnosno naponu  $\dot{U}_C$ .

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_C \quad (2-2)$$

Zatim promatrajući jednostavnu petlju, budući su svi elementi spojeni u seriju (stezaljke izlaznog napona su u prekidu) kroz elemente L, R i C teče ista struja  $\dot{I}$ . Ako se reaktancije induktiviteta L i kapaciteta C predstavimo s  $X_L$  i  $X_C$  te se primijeni Ohmov zakon dobije se idući izraz za struju.

$$X_L = \omega L \quad (2-3)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (2-4)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_1}{Z} = \frac{\dot{U}_1}{jX_L + R - jX_C} = \frac{\dot{U}_1}{j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (2-5)$$

Ponovnom primjenom Ohmovog zakona na kapacitetu dobijemo izraz za napon na tom elementu, odnosno izraz za izlazni napon.

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_C = \dot{I} * X_C = \frac{\dot{U}_1}{j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C}} * X_C = \frac{\dot{U}_1 * \frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (2-6)$$

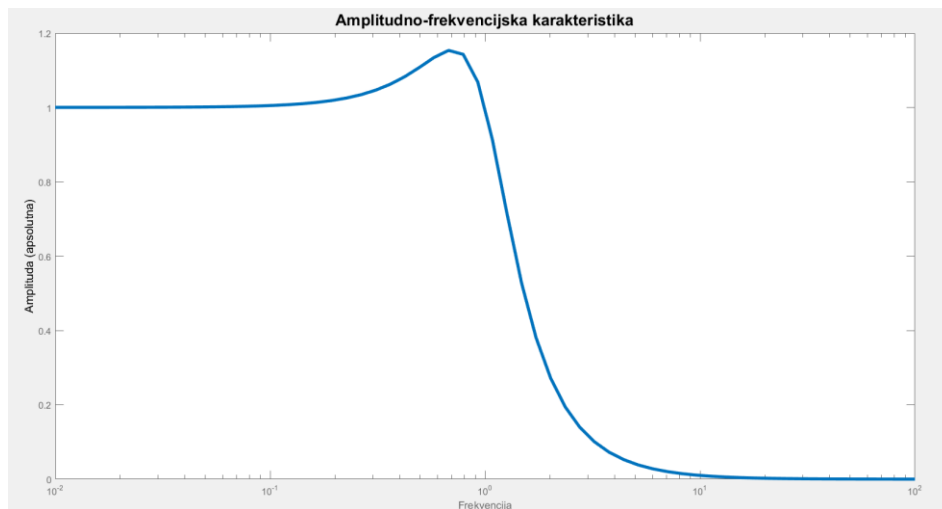
Sada kad postoji izraz za izlazni napon  $\dot{U}_2$  može se odrediti prijenosna funkcija.

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\frac{\dot{U}_1 * \frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C}}}{\dot{U}_1} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (2-7)$$

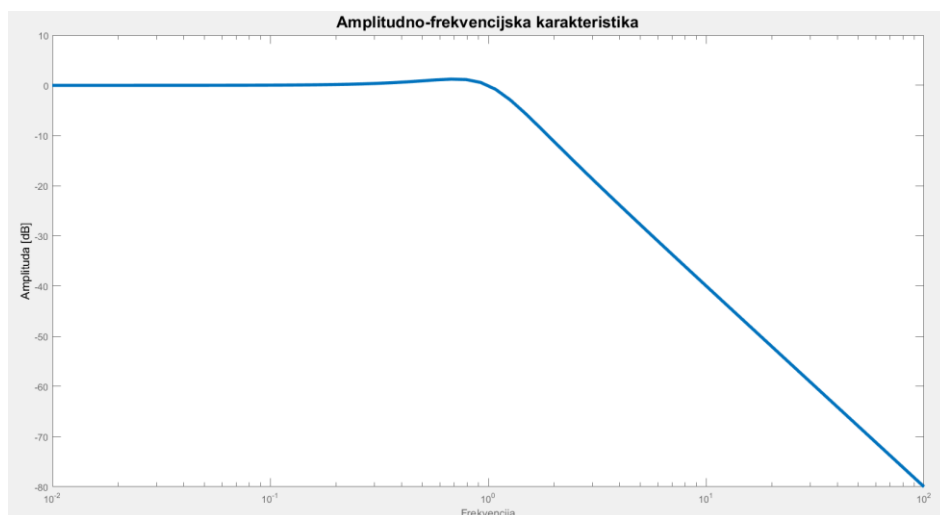
Ovako dobiveni izraz je prijenosna funkcija sustava sa slike 2.4. Iz ovog izraza kasnije se mogu odrediti još neki parametri kao što su amplitudno-frekvencijska karakteristika, fazno-frekvencijska karakteristika, maksimalno pojačanje, granična frekvencija, širina pojasa, fazni pomak (određene frekvencije).

## 2.2.2 Amplitudno - frekvencijska karakteristika

Amplitudno-frekvencijska karakteristika dobiva se iz prijenosne funkcije  $H(j\omega)$  i ona je ništa drugo nego grafički prikaz apsolutne vrijednosti, odnosno modula prijenosne funkcije  $|H(j\omega)|$  ovisno o frekvenciji  $\omega$ . Pogodna je za grafičko određivanje graničnih frekvencija, širine pojasa, maksimalnog pojačanja. Pogledom na karakteristiku jasno se uočava tip propusnosti filtra. Najčešće se prikazuje na Bodeovom dijagramu zajedno s fazno-frekvencijskom karakteristikom. Slike 2.5 i 2.6 prikazuju amplitudno frekvencijski dijagram s apsolutnom i logaritamskom osi.



Slika 2.5 Amplitudno-frekvencijska karakteristika s apsolutnom osi sustava sa slike 2.4



Slika 2.6 Amplitudno-frekvencijska karakteristika s logaritamskom osi sustava sa slike

2.4

### 2.2.3 Maksimalno pojačanje

Faktor koji nam govori koje je najveće pojačanje filtra, odnosno najveći omjer amplituda izlaznog i ulaznog napona. Može se pojaviti na jednoj i li više frekvencija, a odradit se može na 2 načina, grafički ili analitički

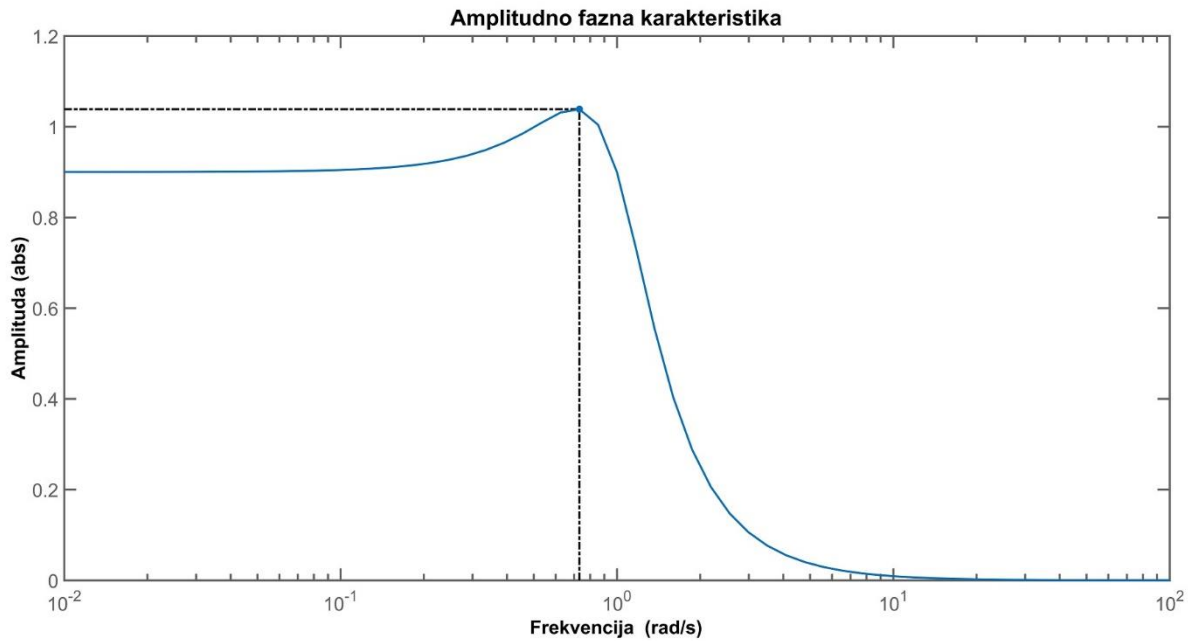
#### ➤ Analitički

Traženjem globalnog maksimuma funkcije  $|H(j\omega)|$ . Algoritam za analitičko određivanje je tipično traženje ekstrema, odnosno

1. Odrediti prvu derivaciju funkcije  $|H(j\omega)|$ ,  $f'(\omega) = \frac{d|H(j\omega)|}{d\omega}$
2. Odrediti za koje frekvencije  $\omega$  vrijedi izraz,  $f'(\omega) = 0$
3. Ukoliko postoje frekvencije  $\omega$  koje zadovoljavaju izraz
4. Odrediti drugu derivaciju funkcije  $|H(j\omega)|$ ,  $f''(\omega) = \frac{d^2|H(j\omega)|}{d\omega^2}$
5. Tražiti iznos druge derivacije za svaku frekvenciju koje ja zadovoljila izraz iz drugog koraka
6. Ukoliko postoje frekvencije  $\omega$  za koje vrijedi ,  $f''(\omega) < 0$ , na frekvenciji,  $\omega$  se nalazi lokalni ekstrem – ne znači da je maksimalno pojačanje, potrebno je odrediti globalni maksimum.
7. Uvrstiti sve frekvencije  $\omega$  koje su ispunile 2. i 6. uvjet u funkciju  $|H(j\omega)|$ , njaveći dobiveni iznos je maksimalno pojačanje.
8. Pojačanje se događa na frekvenciji  $\omega$  na koja je u 7. koraku dala najveći  $|H(j\omega)|$ .

## ➤ Grafički

Postavimo horizontalnim kursor na najvišu točku grafa, presjecište kursora s amplitudnom osi nam govori iznos pojačanja, a točke presjek grafa i kursora govore na kojoj frekvenciji se nalazi maksimalno pojačanje. Grafički je način intuitivniji te je očitije postoji li maksimalno pojačanje na jednoj frekvenciji, više njih ili na čitavom pojasu frekvencija, primjer grafičkog očitavanja nalazi se na slici 2.7.



**Slika 2.7** Grafički prikaz maksimalnog pojačanja primjera sa slike 2.4

## 2.2.4 Fazni pomak

Budući da se filter ne sastoji samo od disipativnih komponenata već se ondje nalaze i reaktivne komponente, odnosno budući da je njegova funkcija kompleksna i ovisna o frekvenciji znači da postoji odmak u kutu između ulaznog i izlaznog signala koji je također ovisan o frekvenciji. Dakle, ako je poznata prijenosna funkcija filtra te je poznat ulazni signal, može se odrediti fazni pomak između ulaznog i izlaznog signala.

Prema definiciji prijenosne funkcije te primjenom polarnog zapisa za fazore, kompleksne brojeve odnosno funkcije mogu se zapisati idući izrazi:

❖ *Više o ovim izrazima u poglavlju 2.2.5.*

$$\dot{U}_1 = |\dot{U}_1|^{\angle\varphi_1} \quad (2-8)$$

$$\dot{U}_2 = |\dot{U}_2|^{\angle\varphi_2} \quad (2-9)$$

$$H(j\omega) = |H(j\omega)|^{\angle\varphi_H(\omega)} \quad (2-10)$$

Gdje je  $|H(j\omega)|$  modul prijenosne funkcije pri frekvenciji  $\omega$ , a  $\varphi_H(\omega)$  kut pri istoj frekvenciji  $\omega$ . Kombiniranjem izraza slijedi:

$$H(j\omega) = |H(j\omega)|^{\angle\varphi_H(\omega)} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{|\dot{U}_2|^{\angle\varphi_2}}{|\dot{U}_1|^{\angle\varphi_1}} = \left(\frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|}\right)^{\angle\varphi_2 - \varphi_1} \quad (2-11)$$

$$(|H(j\omega)|)^{\angle\varphi_H(\omega)} = \left(\frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|}\right)^{\angle\varphi_2 - \varphi_1} \quad (2-12)$$

Daljnjom primjenom matematike slijedi:

$$\varphi_H(\omega) = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (2-13)$$

$$\varphi_2 = \varphi_H(\omega) + \varphi_1 \quad (2-14)$$

Za krajnje povezivanje faznog pomaka s prijenosnom funkcijom potrebno je izvesti izraz za  $\varphi_H(\omega)$ .

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\varphi_H(\omega)} \quad (2-15)$$

Ako se prijenosna funkcija zapiše pomoću općih brojeva slijedi:

$$H(j\omega) = A + jB \quad (2-16)$$

$$A = \operatorname{Re}\{H(j\omega)\} \quad (2-17)$$

$$B = \operatorname{Im}\{H(j\omega)\} \quad (2-18)$$

$$\varphi_H(\omega) = \operatorname{arctg}\left(\frac{B}{A}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im}\{H(j\omega)\}}{\operatorname{Re}\{H(j\omega)\}}\right) \quad (2-19)$$

Dakle, izraz za fazni pomak uz poznatu prijenosnu funkciju glasi:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im}\{H(j\omega)\}}{\operatorname{Re}\{H(j\omega)\}}\right) \quad (2-20)$$

### **Primjer**

Radi jednostavnosti, zamisliti primjer:

$$H(j\omega) = 1 + j\sqrt{3} * \omega \quad (2-21)$$

$$\dot{U}_1 = 5 * \sin(\omega * t + 0) = 5 \angle 0 \quad (2-22)$$

$$\omega = 1 \text{ rad/s} \quad (2-23)$$

Odrediti fazni pomak između ulaznog signala  $\dot{U}_1$  i izlaznog  $\dot{U}_2$

$$\varphi_H(\omega) = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im}\{H(j\omega)\}}{\operatorname{Re}\{H(j\omega)\}}\right) = \operatorname{arctg}\frac{\sqrt{3} * \omega}{1} = \frac{1}{3} * \pi = 60^\circ \quad (2-24)$$

$$\varphi_2 = \varphi_H(\omega) + \varphi_1 = \frac{1}{3} * \pi = 60^\circ \quad (2-25)$$

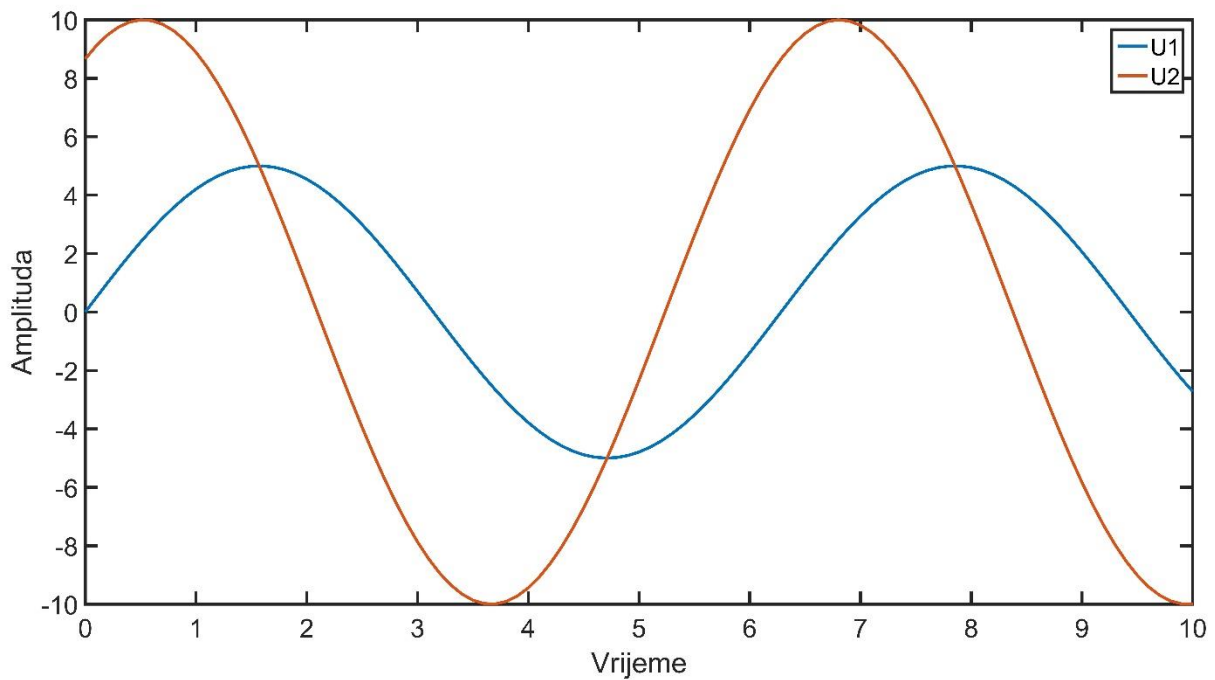
Za slikovitiji prikaz, odrediti izlazni napon

$$|H(j\omega)| = \sqrt{(\operatorname{Re}\{H(j\omega)\})^2 + (\operatorname{Im}\{H(j\omega)\})^2} = \sqrt{1^2 + \sqrt{3}^2} = 2 \quad (2-26)$$

$$H(j\omega) = 2^{\angle 60} \quad (2-27)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 * H(j\omega) = 5^{\angle 0} * 2^{\angle 60} = 10^{\angle 60} \quad (2-28)$$

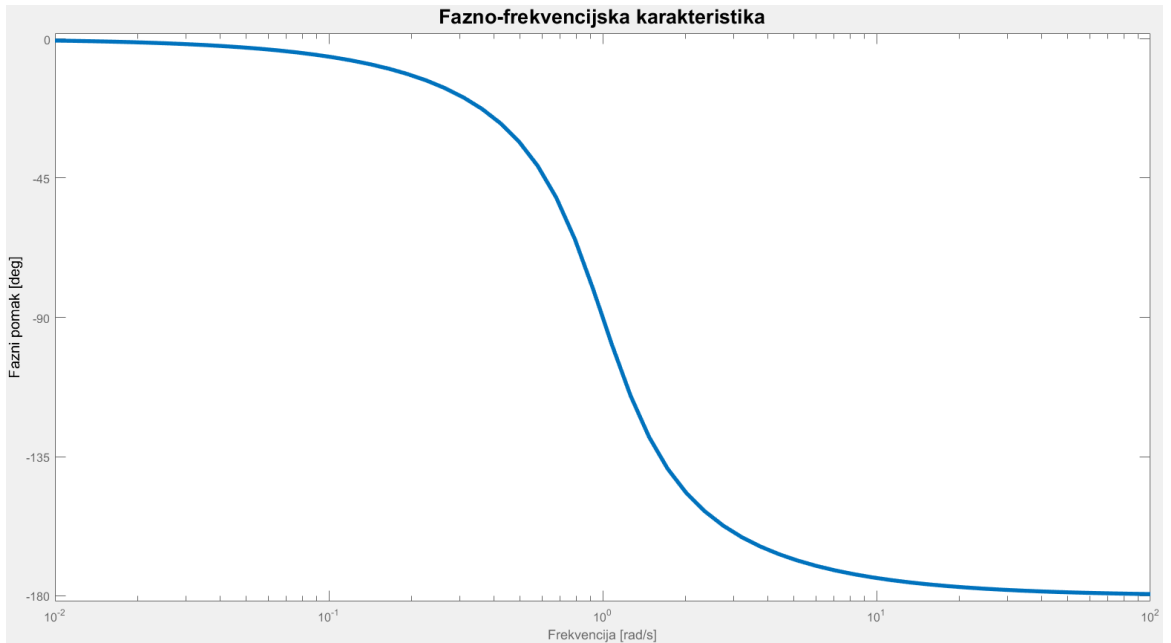
Na slici 2.8 vidljiv je fazni pomak između 2 signala.



**Slika 2.8** Prikaz ulaznog i izlaznog signala s očitim faznim pomakom

## 2.2.5 Fazno – frekvencijska karakteristika

Grafički prikaz svih faznih pomaka može se vidjeti unutar fazno-frekvencijske karakteristike. Fazno-frekvencijska karakteristika također je dio Bode-ovog dijagrama. Primjer fazno frekvencijske karakteristike može se vidjeti na slici 2.9.



**Slika 2.9** *Fazno-frekvencijska karakteristika sustava sa slike 2.4*



## 2.2.6 Granična frekvencija

Kako bi se definirala propusnost električkog filtra uveden je pojam granične frekvencije. To je frekvencija na kojoj se nalazi granica između propusnog i nepropusnog dijela spektra. Neki filter može imati i više graničnih frekvencija, ovisno koje je propusnosti i koliko pojasa propusnosti ima.

Da bi se mogla odrediti granična frekvencija, a kasnije i širina pojasa bitno je razlikovati propusni i nepropusni dio spektra. Izlazna snaga pri propusnoj frekvenciji mora biti barem 50% ulazne snage da bi tu frekvenciju smatrali propusnom, odnosno pojačanje snage na toj frekvenciji ne smije biti manje od 0.5. Iz toga slijedi da je propusni dio spektra skup frekvencija za koje vrijedi izraz  $P_2 \geq 50\% * P_1$ , odnosno  $A \geq 0.5$ , gdje je  $P_1$  ulazna snaga,  $P_2$  izlazna snaga, a  $A$  pojačanje.

Ako pojačanje snage ne smije biti manje od 0.5 slijedi da izlazni napon ili struja ne smiju biti manji od  $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.70711 \approx 70.711\%$  ulaznog napona ili struje, što dokazuje idući postupak.

$$P = U * I = I^2 * R = \frac{U^2}{R} \quad (2-29)$$

$$P_2 \geq 50\% * P_1$$

$$\left. \begin{array}{l} I_2^2 * R \geq \frac{50}{100} * I_1^2 * R \\ I_2^2 \geq \frac{1}{2} * I_1^2 \\ I_2 \geq \frac{1}{\sqrt{2}} * I_1 \end{array} \right| \begin{array}{l} \frac{U_1^2}{R} \geq \frac{50}{100} * \frac{U_1^2}{R} \\ U_2^2 \geq \frac{1}{2} * U_1^2 \\ U_2 \geq \frac{1}{\sqrt{2}} * U_1 \end{array} \quad (2-30)$$

Budući da se pojačanja  $A$  često opisuju u decibelima [dB] što je 10 logaritama baze 10 od omjera snaga, slijedi da pojačanje snage izraženo u decibelima za propusni pojas ne smije biti manje od -3dB.

$$A[dB] = 10 * \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right) = 10 * \log_{10} \left( \frac{\frac{1}{2} * P_1}{P_1} \right) = 10 * \log_{10} \left( \frac{1}{2} \right) \approx -3dB \quad (2-31)$$

Prethodni izraz za pojačanje  $A[dB]$  može se računati i pomoću izvedenog izraza u kojem se u omjer stavljaju naponi ili struje, odnosno pojačanje se predstavlja kao funkcija napona ili struje.

$$A[dB] = 10 * \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right) = 10 * \log_{10} \left( \frac{I_2^2 * R}{I_1^2 * R} \right) = 10 * \log_{10} \left( \frac{I_2^2}{I_1^2} \right) = 20 * \log_{10} \left( \frac{I_2}{I_1} \right) \quad (2-32)$$

$$A[dB] = 10 * \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right) = 10 * \log_{10} \left( \frac{\frac{U_2^2}{R}}{\frac{U_1^2}{R}} \right) = 10 * \log_{10} \left( \frac{U_2^2}{U_1^2} \right) = 20 * \log_{10} \left( \frac{U_2}{U_1} \right) \quad (2-33)$$

Ako je propusni pojas skup frekvencija na kojima je pojačanje  $A > 0.5$ , odnosno  $A[dB] > -3dB$ , a nepropusni pojas skup frekvencija na kojima je pojačanje  $A < 0.5$ , odnosno  $A[dB] < -3dB$  slijedi da je granična frekvencija ona frekvencija na kojoj je pojačanje  $A = 0.5$ , odnosno  $A[dB] = -3dB$ .

Graničnu frekvenciju možemo računati iz prijenosne funkcije ili amplitudno-frekvencijske karakteristike.

#### ➤ Pomoću poznate prijenosne funkcije (Analitički)

Prijenosna funkcija  $H(j\omega)$  je funkcija fazora izlaznog napona  $\dot{U}_2$  i fazor ulaznog napona  $\dot{U}_1$ , a pojačanje  $A$  je funkcija apsolutne vrijednosti izlaznog napona  $|\dot{U}_2|$  i apsolutne vrijednosti ulaznog napona  $|\dot{U}_1|$  iz toga slijedi da se pojačanje  $A$  može zapisati kao funkcija apsolutne vrijednosti prijenosne funkcije  $|H(j\omega)|$ .<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Vrijedi i za struje, ako se promatraju kao ulazne/izlazne veličine

### Izvod izraza:

Fazore napona može se zapisati pomoću općih kompleksnih brojeva pa tako izlazni i ulazni naponi poprimaju iduće izraze:

$$\text{Izlazni: } \dot{U}_2 = A + jB \quad \text{Ulazni: } \dot{U}_1 = C + jD$$

Uvrštavanjem tako zapisanih izraza u definiciju prijenosne funkcije dobije se idući izraz:

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{A + jB}{C + jD} = \frac{(AC + BD) - j(AD - BC)}{C^2 + D^2} \quad (2-34)$$

Iz čeg slijedi izraz za modul prijenosne funkcije:

$$\begin{aligned} |H(j\omega)| &= \frac{1}{C^2 + D^2} * \sqrt{A^2C^2 + 2ABCD + B^2D^2 + A^2D^2 - 2ABCD + B^2C^2} \\ &= \frac{1}{C^2 + D^2} * \sqrt{(A^2 + B^2)(C^2 + D^2)} = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{\sqrt{C^2 + D^2}} = \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|} \end{aligned} \quad (2-35)$$

Ukoliko fazore zapišemo pomoću polarnih koordinata, tada izraz za ulazni i napon izgleda ovako:

$$\text{Izlazni: } \dot{U}_2 = |\dot{U}_2|^{\angle\varphi_2} \quad \text{Ulazni: } \dot{U}_1 = |\dot{U}_1|^{\angle\varphi_1}$$

Uvrštavanjem tako zapisanih izraza u definiciju prijenosne funkcije dobije se idući izraz:

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{|\dot{U}_2|^{\angle\varphi_2}}{|\dot{U}_1|^{\angle\varphi_1}} = \left( \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|} \right)^{\angle\varphi_2 - \varphi_1} \quad (2-36)$$

Iz čeg slijedi izraz za modul prijenosne funkcije:

$$|H(j\omega)| = \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|} \quad (2-37)$$

Oba ova izvoda pokazala su da je omjer modula fazora izlaznog i ulaznog napona jednak modulu prijenosne funkcije pa se izrazi za pojačanje  $A$ , odnosno za pojačanja na određenoj frekvenciji  $A(\omega)$  mogu zapisati na idući način:

$$A(\omega) = |H(j\omega)| \quad (2-38)$$

$$A(\omega)[dB] = 20 * \log_{10}(|H(j\omega)|) [dB] \quad (2-39)$$

### Primjer

Potrebno je odrediti granične frekvencije sustava sa slike 2.4, prijenosna funkcija sustava je poznata.

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= \frac{\frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C}} * \frac{j\omega C}{j\omega C} = \\ &= \frac{1}{- \omega^2 LC + j\omega RC + 1} = \frac{(1 - \omega^2 LC) - j\omega RC}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2} = \\ &= \frac{1}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2} * ((1 - \omega^2 LC) - j\omega RC) \end{aligned} \quad (2-40)$$

Izračun modula

$$\begin{aligned} |H(j\omega)| &= \frac{1}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2} * \sqrt{(1 - \omega^2 LC)^2 - (j\omega RC)^2} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2}} \end{aligned} \quad (2-41)$$

Granična frekvencija je točno ona frekvencija na kojoj je pojačanje snage  $A(\omega) = 0.5$ , odnosno pojačanje napona snage  $A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}}$  pa iz izraza  $A(\omega) = |H(j\omega)|$  slijedi da tražimo sve frekvencije  $\omega$  koje su rješenje iduće jedandžbe.

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2-42)$$

$$\frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2-43)$$

$$1 = \frac{1}{2} * ((1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2) \quad (2-44)$$

$$2 = (1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2 \quad (2-45)$$

$$\omega^4(L^2C^2) - \omega^2(2LC - R^2C^2) - 1 = 0 \quad (2-46)$$

Budući je jednačba četvrtog stupnja, uvodimo supstituciju gdje je  $t = \omega^2$ , odnosno  $\omega = \pm\sqrt{t}$ .

$$t^2(L^2C^2) - t(2LC - R^2C^2) - 1 = 0 \quad (2-47)$$

$$t_{1,2} = \frac{(2LC - R^2C^2)}{2} \pm \sqrt{\frac{(2LC - R^2C^2)^2}{4} + 1} \quad (2-48)$$

Vraćanjem supstituiranih varijabli dobivamo izraze za 4 granične frekvencije sustava sa slike 2.4.

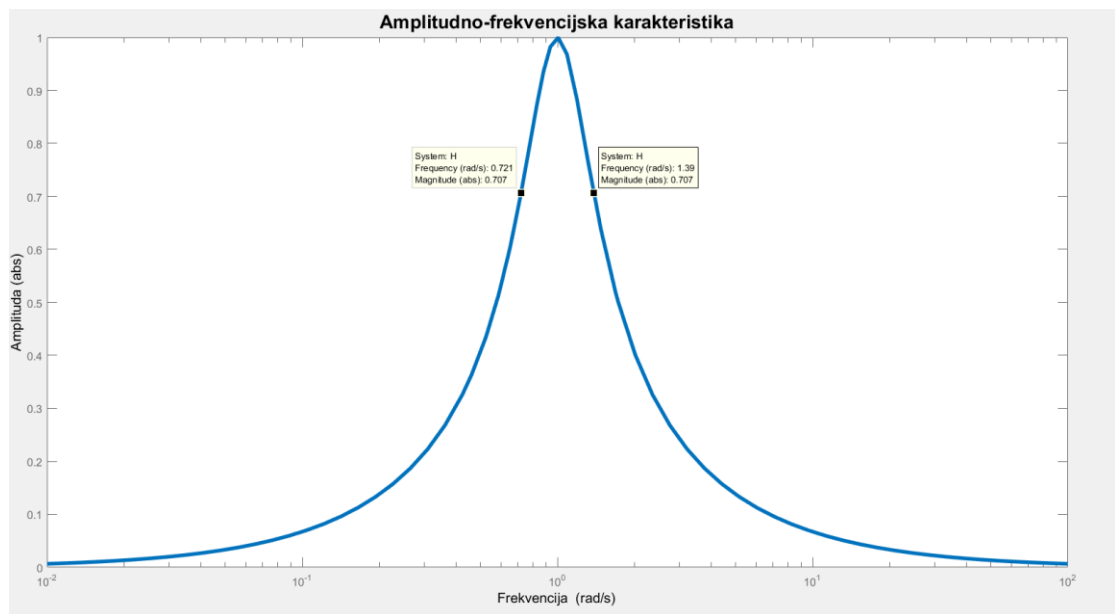
$$\omega_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{(2LC - R^2C^2)}{2} + \sqrt{\frac{(2LC - R^2C^2)^2}{4} + 1}} \quad (2-49)$$

$$\omega_{3,4} = \pm \sqrt{\frac{(2LC - R^2C^2)}{2} - \sqrt{\frac{(2LC - R^2C^2)^2}{4} + 1}} \quad (2-50)$$

Stupanj jednačbe ne govori koliko graničnih frekvencija sustav ima budući da neka od rješenja jednačbi nisu realna ili nisu pozitivna, a da bi se neko rješenje jednačbe smatralo graničnom frekvencijom sustava ono mora biti realno i pozitivno jer je granična frekvencija uvijek realan i pozitivan broj.

➤ **Pomoću poznate amplitudno-frekvencijske karakteristike (Grafički)**

Jednostavniji način određivanja granične frekvencije je ukoliko postoji amplitudno-frekvencijska karakteristika. Potrebno je povući horizontalni pravac koji prolazi kroz apsolutno pojačanje od  $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.7071$  ukupnog pojačanja ukoliko je zadana apsolutna karakteristika, odnosno pravac koji prolazi kroz pojačanje od -3dB ukoliko je zadano logaritamsko pojačanje. Tako povučeni pravac siječe karakteristiku u točkama koje se nalaze na graničnim frekvencijama. Prikazano na slici 2.10.



**Slika 2.10** Prikaz graničnih frekvencija na primjeru

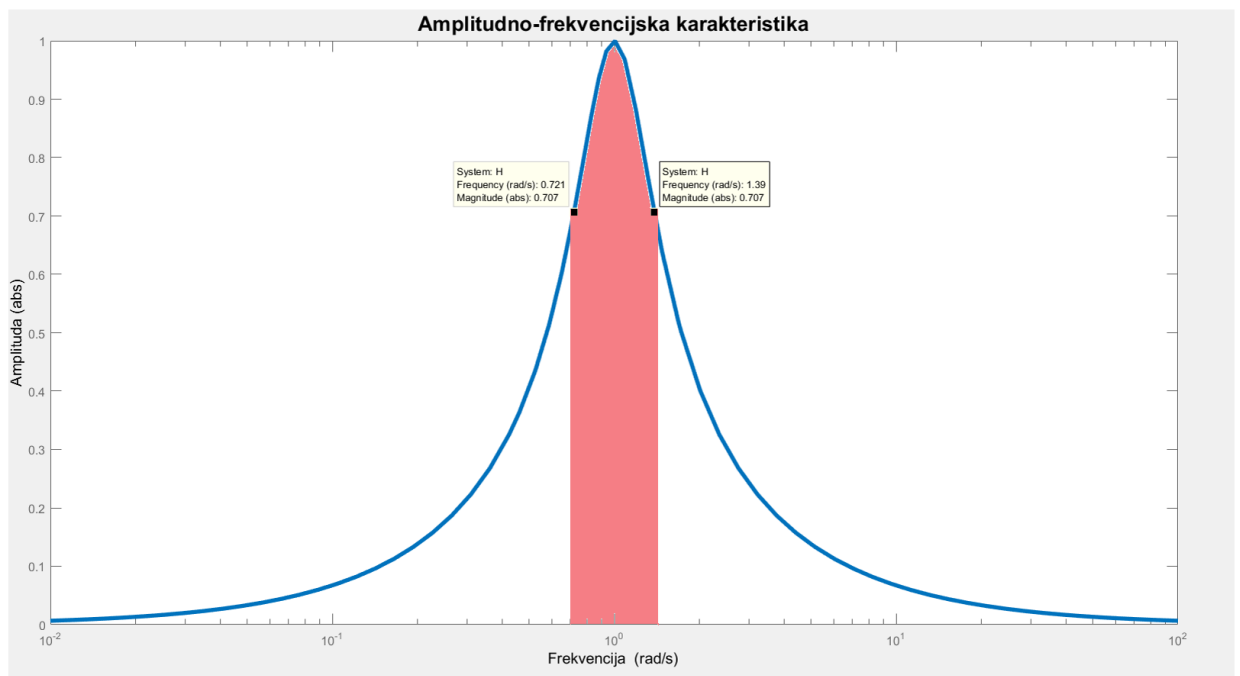
## 2.2.7 Širina pojasa

Širina pojasa ili *Bandwith* je raspon frekvencija za koje je filter propustan odnosno udaljenost između dvije granične frekvencije. Najlakše se određuje iz amplitudno-frekvencijske karakteristike. Izražava se u rad/s ili Hz s pomoću udaljenosti dvije granične frekvencije.

$$B = \omega_{gg} - \omega_{dg} \quad (2-51)$$

$\omega_{gg}$  – gornja granična frekvencija

$\omega_{dg}$  – donja granična frekvencija



Slika 2.11 Grafički prikaz širine pojasa

## 2.3 Podjele filtara

Osim što filtre opisuje više parametara, postoji i više podjela filtara, a one najučestalije su:

### 2.3.1 Prema propusnosti

Podjela se odnosi na selektivan tip filtra.

Pri dizajniranju pasivnih filtra sa specifičnom propusnosti važno je poznavati kako se komponente od kojih se filter sastoji ponašaju na određenim frekvencijama.

Iz konstitutivnih relacija za napone kapaciteta i induktiviteta slijedi:

$$U_C \sim \frac{1}{\omega} \quad (2-52)$$

$$U_L \sim \omega \quad (2-53)$$

- ❖ Direktna proporcionalnost vrijedi samo kada se govori o monoharmoniskoj funkciji, dakle, vrijedi za pojedine harmonike signala rastavljenog u Fourierov red

Također vrijedi i:

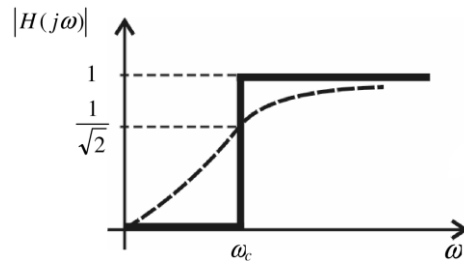
$$U_R \neq f(\omega) \quad (2-54)$$



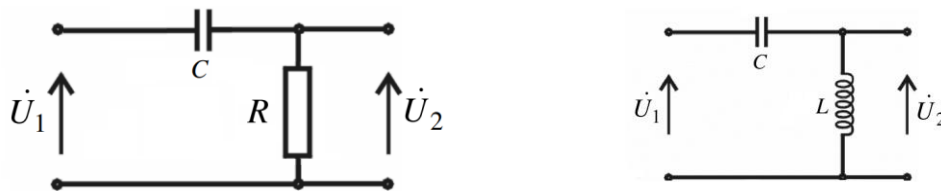
➤ **Visoko propusni**

Prijenosna funkcija za visoko propusni CR filter

$$H(j\omega) = \frac{j\omega RC}{j\omega RC + 1} \quad (2-55)$$



**Slika 2.12** Karakteristika visoko propusnog filtra, realna(- - -) i idealna(---)

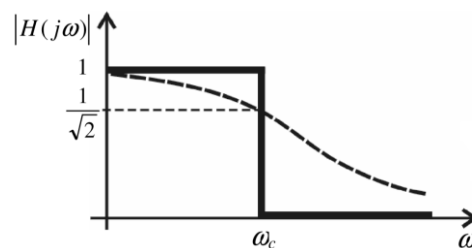


**Slika 2.13** Opći primjeri visoko propusnog filtra

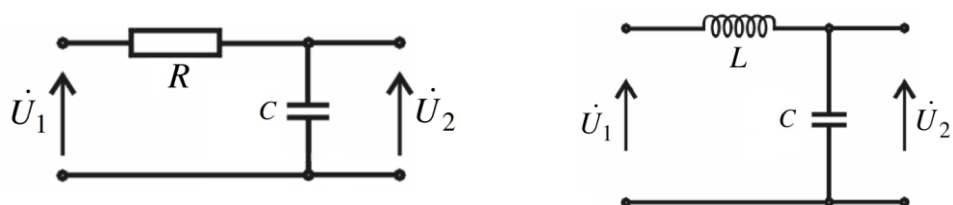
➤ **Nisko propusni**

Prijenosna funkcija nisko propusnog RC filtra

$$H(j\omega) = \frac{1}{j\omega RC + 1} \quad (2-56)$$



**Slika 2.14** Karakteristika nisko propusnog filtra, realna(- - -) i idealna(---)

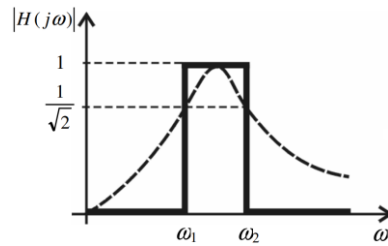


**Slika 2.15** Opći primjeri niskopropusnog filtra

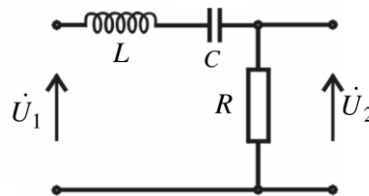
➤ **Pojasno propusni**

Prijenosna funkcija

$$H(j\omega) = \frac{-j\omega RC}{\omega^2 CL - j\omega RC - 1} \quad (2-57)$$



**Slika 2.16** Karakteristika pojasno propusnog filtra, realna(- - -) i idealna(---)

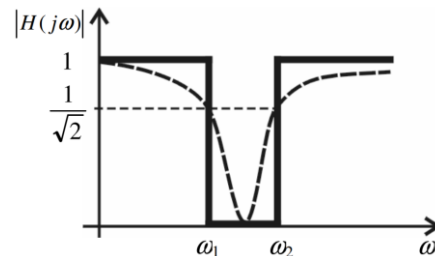


**Slika 2.17** Opći primjer pojasno propusnog filtra

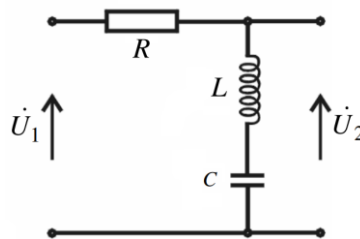
➤ **Pojasne barijere (pojasno nepropusni)**

Prijenosna funkcija

$$H(j\omega) = \frac{\omega^2 LC - 1}{-j\omega RC} \quad (2-58)$$



**Slika 2.18** Karakteristika visoko propusnog filtra, realna(- - -) i idealna(---)

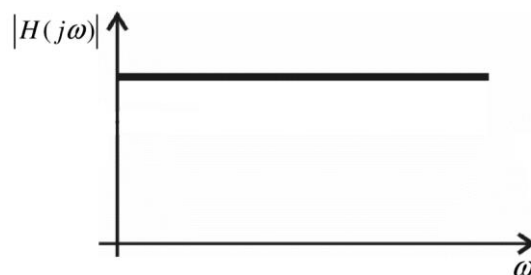


**Slika 2.19** Opći primjer filtra propusne barijere

➤ **Fazni korektori (Phase Shift)**

Za razliku od gore navedenih filtara, ovo nije selektivni filter, naime fazni korektori su najčešće izvedeni s pomoću sve propusnih (*allpass*) filtara, odnosno amplitudno-frekvencijska karakteristika im je konstanta, što znači da su sve frekvencijske komponente prenesene ali su fazno pomaknute prema definiranim specifikacijama pa je za filtre ovog tipa puno važnija funkcija  $\varphi_H(\omega)$  nego  $|H(j\omega)|$ .

Prijenosna funkcija



**Slika 2.20** Idealna amplitudna karakteristika faznog korektora

### 2.3.2 Prema aktivnosti komponenti od kojih je sastavljen

#### ➤ Aktivni

Aktivni filtri sastavljeni su kombiniranjem pasivnih i aktivnih komponenti i potrebnog izvora napajanja. Često se izvode s pomoću operacijskih pojačala.

#### ➤ Pasivni

Filtri sastavljeni od isključivo pasivnih komponenti, bez pojačivačkih komponenti i dodatnih izvora napajanja.

### 2.3.3 Prema kontinuiranosti

#### ➤ Diskretni

Filtar čija je vremenska os prebrojiv skup.

#### ➤ Kontinuirani

Filtar čija je vremenska os neprebrojiv skup.

### 2.3.4 Prema vrsti signala kojeg filtriraju

#### ➤ Digitalni

Obraduje digitalne signale te je izlazni signal također digitalan. Pod ovu vrstu filtra mogu se svrstati i algoritmi za obradu signala.

#### ➤ Analogni

Obraduju analogne signale

### 2.3.5 Prema linearnosti

#### ➤ Linearni

Ovakav filter ne generira nove frekvencije, odnosno signal dobiven na izlazu može imati samo one harmonike koji su se našli i na ulazu.

#### ➤ Nelinearni

Za razliku od linearnog, nelinearni filter generira nove frekvencije pa se na izlaznom signalu mogu pojaviti i neke druge frekvencije koje nisu bile dio ulaznog signala.

## **2.4 Primjena filtara**

Električki filtri imaju vrlo široku primjenu u svim područjima elektrotehnike. Uređaji i sustavi modernih komunikacija, sustavi automatizacije i industrijske elektronike, energetike, kućanski uređaji i sl. nezamislivi su bez električkih filtara.<sup>3</sup>

### **2.4.1 Radio-tehnika**

- Uklanjanje šuma
- Odabiranje kanala

### **2.4.2 Audio-tehnika**

- Uklanjanje šuma
- Pojačavanje određenih frekvencija - equalizer

### **2.4.3 Automobilska industrija**

Također filtar je pronašao svoje primjene i unutar automobilske industrije.

- Uklanjanje povratnog šuma prema baterijama kod DC-DC i DC-AC pretvorbe
- Filtriranje izlaza strujnih senzora

O konkretnoj ulozi jednog od njih može se vidjeti u idućem poglavlju.

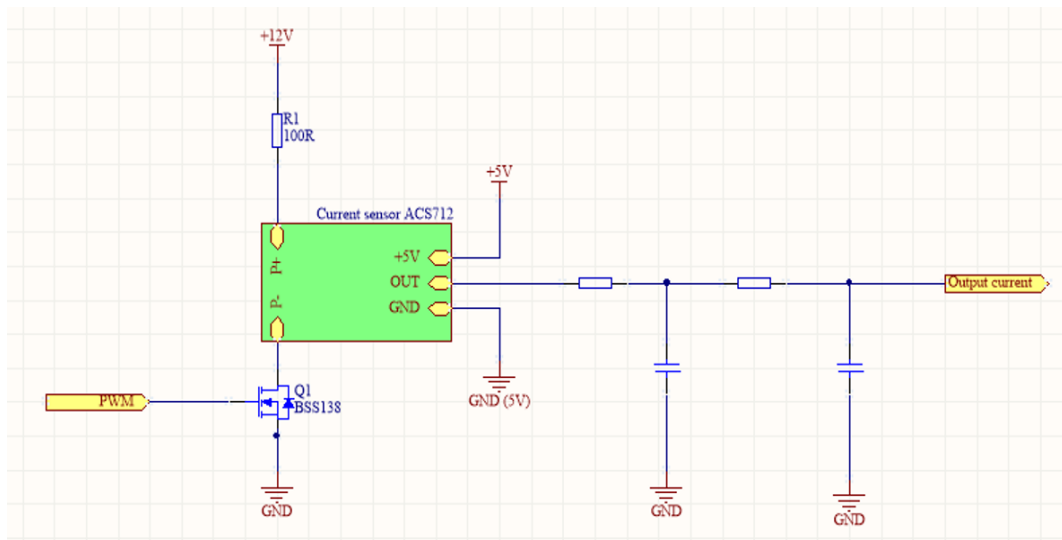
---

<sup>3</sup> <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=19634>

### 3. Filtar u automobilskoj industriji, modeliranje i izrada

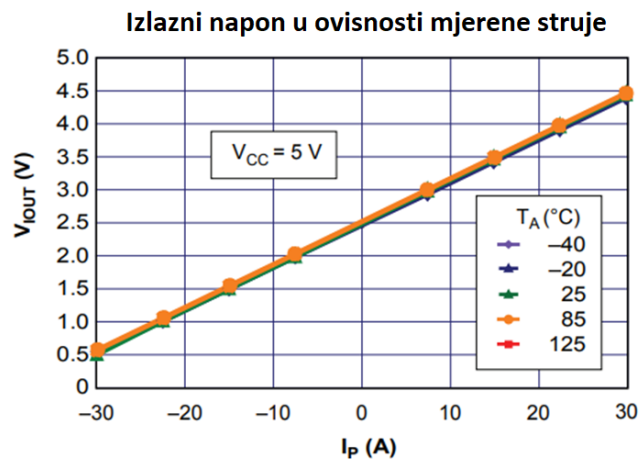
#### 3.1 Problem

U ovom poglavlju realizira se filtar s primjenom u autoindustriji. Osnovna zadaća ovog filtra je „peglanje“ izlaznog napona sa strujnih senzora ACS712, a što će se realizirati niskopropusnim filtrom.



Slika 3.1 Shematski prikaz kruga

ACS712 radi na principu hallovog efekta, što znači da je izlazni napon sa ACS712 direktno proporcionalan magnetnom polju kojeg stvara struja koju mjerimo, a kako je magnetno polje direktno proporcionalno struji slijedi da je i izlazni napon direktno proporcionalan mjerenoj struji. Dakle, izlazni napon i mjerena struja imat će jednak valni oblik.

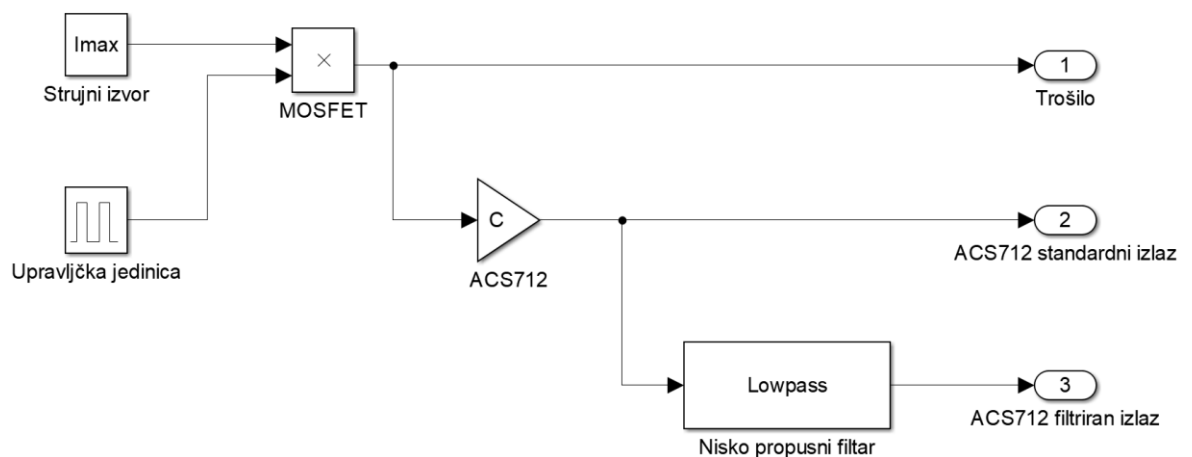


Slika 3.2 Ovisnost izlaznog napona o ulaznoj struji

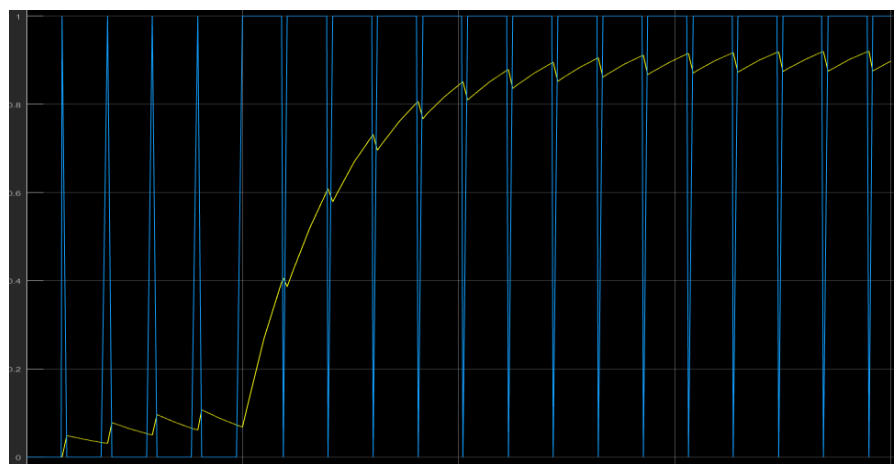
Trošila čija se struja kontrolira upravljaju se MOSFET-ima, odnosno struja kroz trošila regulira se promjenjivim faktorom vođenja (eng. Duty Cycle) na frekvenciji od 24kHz. Dakle, struja kroz trošilo je isključivo pravokutnog valnog oblika ali zbog visoke frekvencije efekt na trošilu je varijabilna struja iznosa srednje vrijednosti tog generiranog pravokutnog signala iz te periode, amplitudom 100 puta manja od amplitude napona jer je otpor trošila  $R=100 \Omega$ , sve to prema  $I = \frac{U}{R}$ .

Kontroler koji se nalazi negdje u automobil zahtijeva točnu vrijednost struje trošila svakog trenutku ali ne može bit spojen s upravljačkom jedinicom jer u tom slučaju ne dobiva se stvarna vrijednost, odnosno za slučaj da nešto nakon MOSFET-a nije u ispravnom stanju ne može se detektirati na kontroleru.

Prema ovome treba isfiltrirati pravokutni signal frekvencije 24kHz s promjenjivim DC-om.



**Slika 3.3** Blokovski prikaz filtra u primjeru



**Slika 3.4** Primjer, pravokutni signal na frekvenciji od 24kHz prelazi s faktorom vođenja 10% na 90%(plavo), filtrirani signal(žuto)

## 3.2 Parametri

Signal s izlaza filtra se koristi na kontroleru te je iz tog razloga važno da:

- Filtrirani signal ima što veću dinamiku – očitavanje kontrolera treba biti što bliže stvarnom vremenu
- Što manju valovitost – oscilacije od srednje vrijednosti.

Prema tome, postoje dva važna parametara pa je za kvalitetnu realizaciju filtra potrebno provesti dvoparametarsku optimizaciju funkcije (filtra). Osim ova 2 parametara važno je i magnetno polje filtra. Ukoliko filter sastavimo od induktiviteta, pri visokim frekvencijama induktivitet će generirati osjetno magnetno polje koje može smetati ACS712 senzoru odnosno Hallovom elementu.



### 3.3 Modeliranje

Budući da je dvoparametarska optimizacija složen proces, uz to radi se za nepoznat ulazni signal (opći slučaj ulaznog signala) postupak se dodatno komplicira te prelazi okvire ovog rada pa će postupak modeliranja u ovom radu biti empirijski.

Kako se radi o „peglanju“ generiranju srednje vrijednosti signala modelirat ćemo niskopropusni filter. Srednja vrijednost je opisana prvim harmonikom dakle, niskim frekvencijama.

Da bi se izbjegao šum na hallovom elementu, niskopropusni filter modelirat ćemo s pomoću otpora i kapaciteta – bez induktiviteta.

Poznato je da je ulazni signal na frekvenciji  $f = 24 \text{ kHz}$  pa je prema tome kružna frekvencija signala  $\omega = 2 * \pi * f \approx 150.72 * 10^3 \text{ rad/s}$ . Da bi se realizirao filter koji generira srednju vrijednost, vremenska konstanta zadat će se tako da granična frekvencija filtra bude u okolini frekvencije signala.

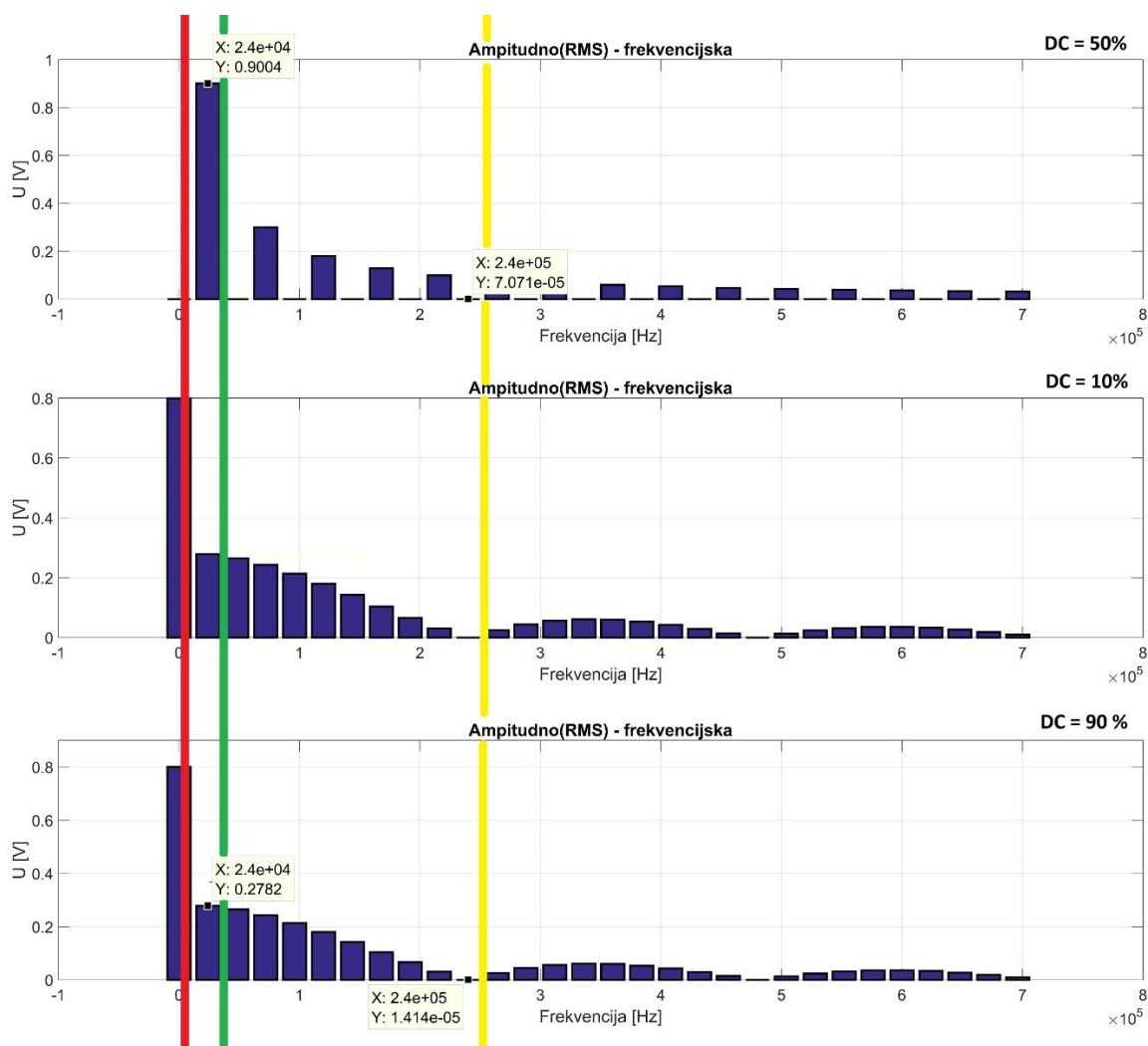
$$\omega_c = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC} \quad (3-1)$$

U tablici 3.3.1 nalaze se dimenzije filtera s graničnim frekvencijama u okolini frekvencije signala.

Oznaka filtra	$R [\Omega]$	$C [nF]$	$\tau [s]$	$\frac{\omega_c}{\omega}$
<i>A – crveno</i>	660	100	$150.7 * 10^2$	0.1
<i>B – zeleno</i>	66	100	$150.7 * 10^3$	1
<i>C – žuto</i>	66	10	$150.7 * 10^4$	10

**Tablica 3.1** Dimenzije promatranih filtera

Signali koji će se promatrati su signal niske vrijednosti struje, PWM signal s faktorom vođenja od 10%, signal srednje vrijednosti struje odnosno PWM signal s faktorom vođenja od 50% te signal visoke struje odnosno PWM signal s faktorom vođenja od 90%. Spektar signala nalazi se na slici 35.



**Slika 3.5** Spektar promatranih signala s označenim graničnim frekvencijama filtara

Prema slici 3.5 vidljivo je kako će filter A propušta ti samo osnovni harmonik, filter B propuštaće osnovni i prvi harmonik dok će filter C propuštati prvih 10 harmonika.

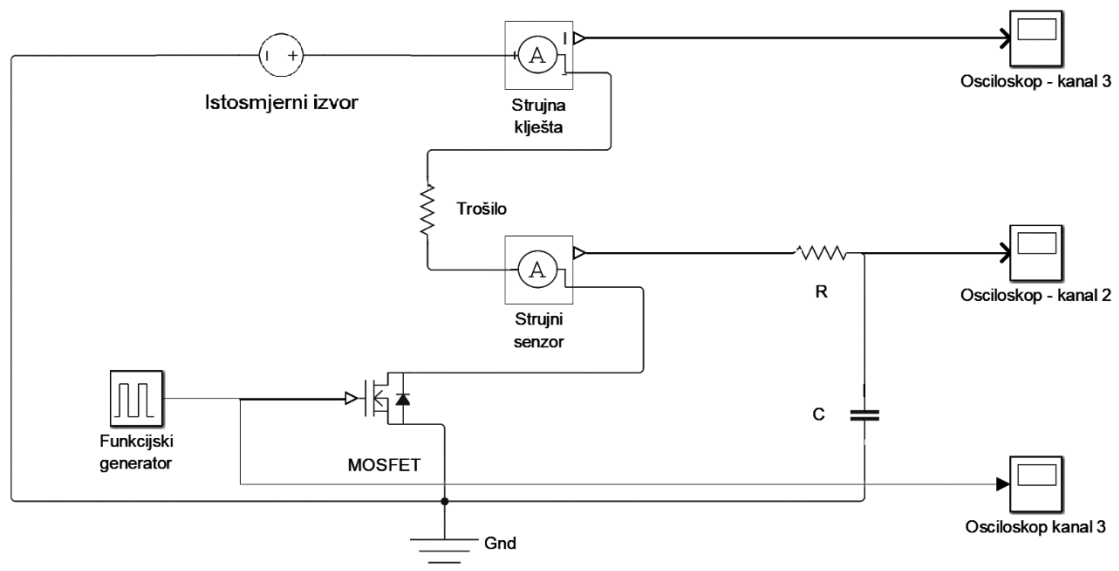
## 4. Simulacija, mjerenje i analiza parametara

S ciljem procjene zadovoljava li realizirani filter iz prethodnog poglavlja kriterije, potrebno je analizirati njegove parametre što možemo učiniti na 2 načina, mjerenjem na konkretnoj realizaciji filtra ili simuliranjem modela.

### 4.1 Mjerenja

S pomoću mjernog kruga sa slike 4.1 promatraju se 3 signala:

1. Signal funkcijskog generatora odnosno upravljača, PWM signal – kanal 1
2. Signal strujnih kliješta odnosno stvarna struja trošila – kanal 3
3. Filtrirani signal sa senzora – kanal 2



Slika 4.1 Prikaz mjernog kruga

Mjerna oprema:

- MOSFET NDPL070N10B
- Strujni senzor ACS712-05B-T
- Strujna kliješta Tektronix A622 (1000mV/A)
- Funkcijski generator
- Osciloskop
- Vodiči
- Kondenzatorska dekada x2
- Otpornička dekada x2
- Istosmjerni izvor

Fotografije rezultata mjerenja nalaze se u prilogu mjerenja.pdf.

### ➤ **Bez filtra**

U prilogu mjerenja pod poglavljem broj 1 nalaze se rezultati koji opisuju izlazni nefiltrirani signal strujnog senzora, odnosno filtriran s integriranim filtrom strujnog senzora ACS712. Prema rezultatima vidljivo je kako valni oblik izlaznog signala(kanal 2) prati stvarni signal na trošilu(kanal 3) međutim postoji određena količina šuma koja je nešto veća pri signalima s DC-om od 90% i 10%.

### ➤ **Filtar A**

U prilogu mjerenja pod poglavljem broj 2 nalaze se rezultati koji opisuju izlazni signal filtriran niskopropusnim filtrom čije su dimenzije  $R = 660 \Omega$  i  $C = 100\text{nF}$ . Filtar ovih dimenzija ima graničnu frekvenciju na 10% osnovne frekvencije signala pa je izlaz filtra dobar pokazatelj srednje vrijednosti signala uz prisutnu valovitost od cca 40mV za signal DC-a od 50% te nešto manju valovitost za signal DC-a od 90%. Vežanjem filtra u kaskadu smanjuje s valovitost, gotovo je i nema, međutim filtar postaje tromiji što je vidljivo uspoređujući slike 2.4 i 2.5 gdje je prikazan odziv na step.

### ➤ **Filtar B**

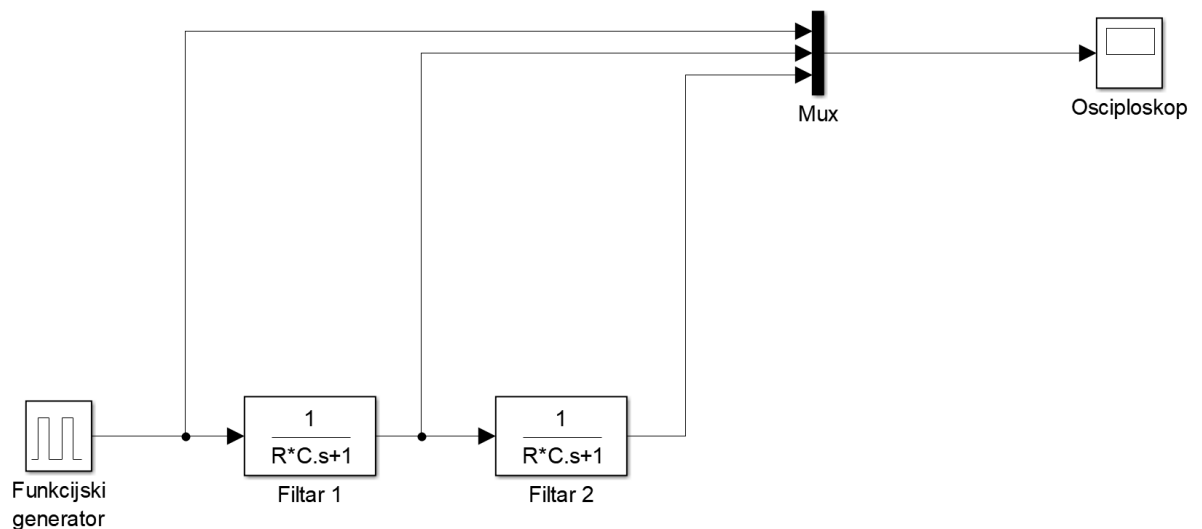
U prilogu mjerenja pod poglavljem broj 3 nalaze se rezultati koji opisuju izlazni signal filtriran niskopropusnim filtrom čije su dimenzije  $R = 66 \Omega$ ,  $C = 10\text{nF}$ . Filtar ovih dimenzija ima graničnu frekvenciju na osnovnoj frekvenciji signala. U slikama je vidljivo kako filtar propušta 1. harmonik što se najbolje vidi na fotografiji 3.2, što je također bilo za očekivati ako se pogleda slika 3.5 iz prethodnog poglavlja ovog rada. Prema tome valovitost je poprilično visoka cca 300mV. Za razliku od filtra A, vežanje u kaskadu ovog filtra dinamičnost se ne narušava tako intenzivno.

### ➤ Filtar C

U prilogu mjerenja pod poglavljem broj 4 nalaze se rezultati koji opisuju izlazni signal filtriran niskopropusnim filtrom čije su dimenzije  $R = 66 \Omega$ ,  $C = 100\text{nF}$ . Filtar ovih dimenzija ima graničnu frekvenciju 10 puta veću od osnovne frekvencije signala, što govori da će propuštati prvih 10 harmonika, vidljivo i na slici **3.5** iz prethodnog poglavlja ovog rada. Budući da propušta 10 harmonika ne filtrira srednju vrijednost već su valni oblici slični onima kada se promatra izlaz senzora bez filtra, međutim budući da filtrira više harmonike razina šuma u ovim rezultatima je nešto manja nego u slučaju bez filtra. Dinamika filtra nije značajno opala vezivanjem u kaskadu.

## 4.2 Simulacija

Filtar se može definirati kao funkcional koji na određen način obrađuje signale te se iz tog razloga može simulirati s pomoću Simulink bloka „transfer function“. Tom bloku zadaje se prijenosna funkcija jednaka onoj koju ima i filtar kojeg simuliramo. Na slici 4.2 prikazana je blok shema Simulink modela s 2 identična niskopropusna filtra koji su vezani u kaskadu, izvorom signala i grafičkim izlazom od 3 kanala.



**Slika 4.2** Blok shema simulacije

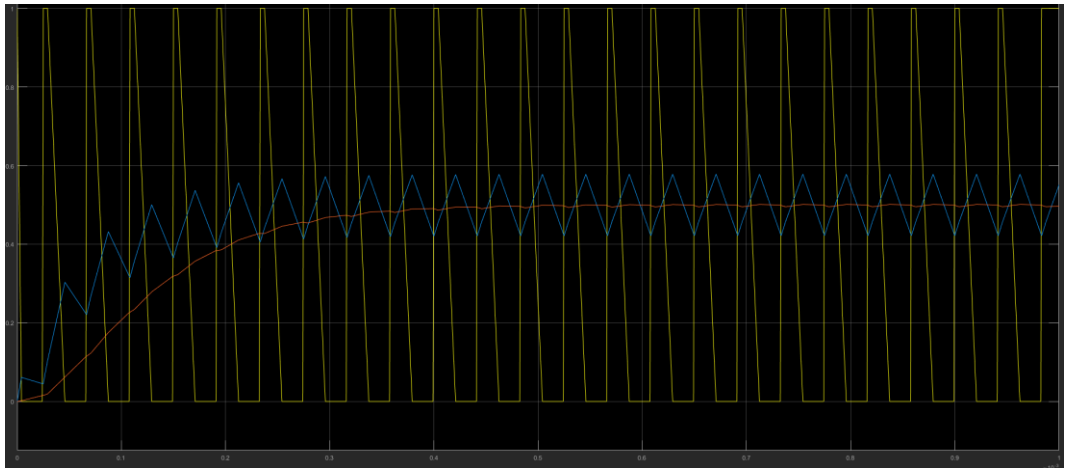
Na idućim slikama nalazi se prikaz s osciloskopa, 3 grafa predstavljaju:

1. Ulazni signal – Žuto
2. Izlazni signal filtra 1. reda – Plavo
3. Izlazni signal filtra 2. reda odnosno kaskade – Crveno

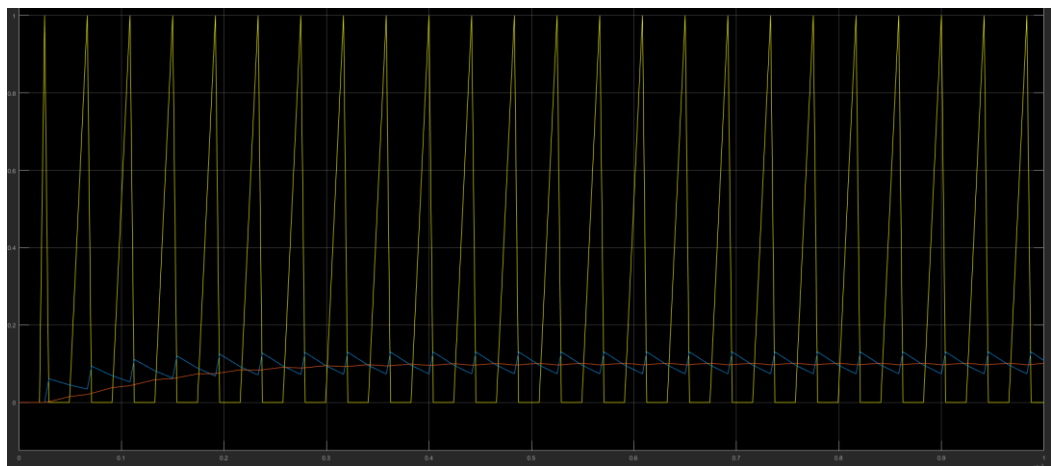
Slično kao i u rezultatima mjerenja među 3 analizirana filtra, filtar A pokazao je najbolje rezultate, odnosno najbolje opisuje srednju vrijednost. Filtar B je propustio prvi harmonik, dok je filtra C propustio 10 harmonika te time izlazni signal dobro prati ulazni. Uvođenjem kaskade smanjila se valovitost ali se također smanjila i dinamika filtra.

➤ **Filtar A**

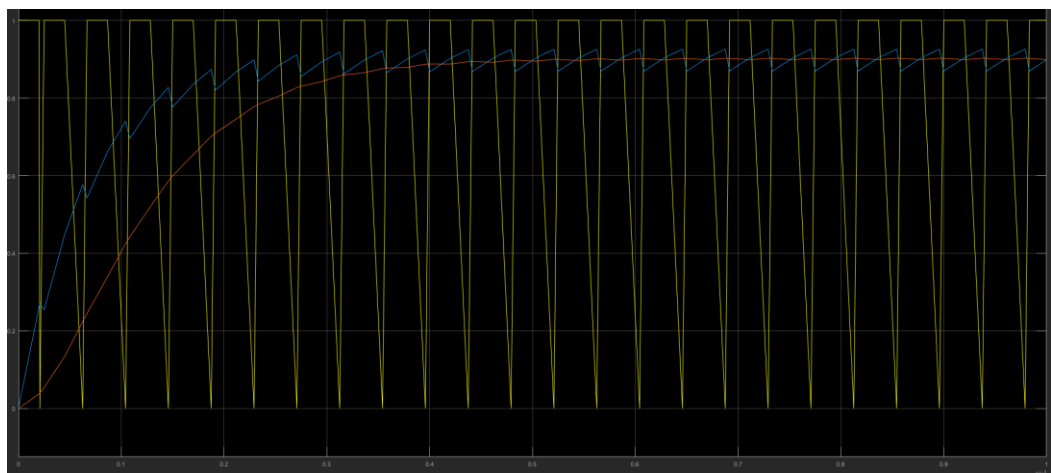
$R = 660 \Omega$ ,  $C = 100\text{nF}$



**Slika 4.3** Simulacija, izlaz filtara, prvog reda(plavo) i kaskada(crveno), DC 50%



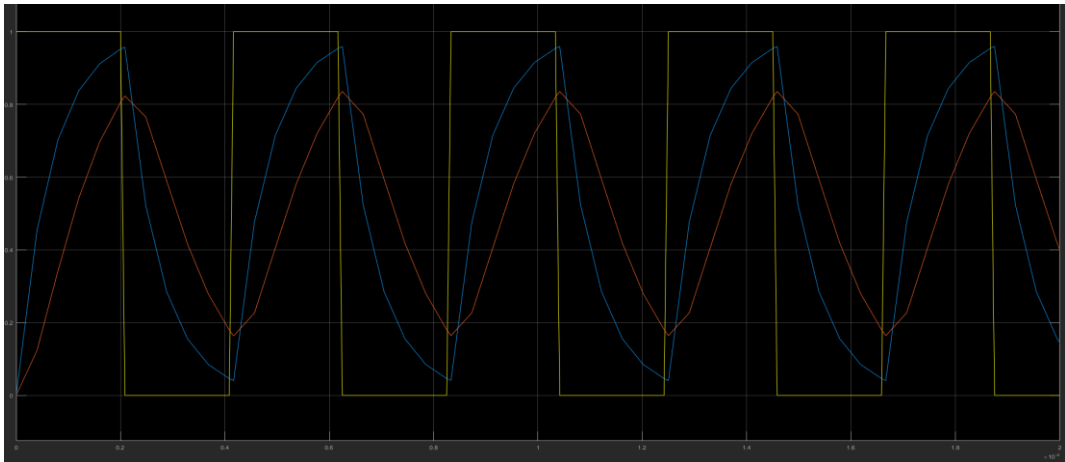
**Slika 4.4** Simulacija, izlaz filtara, prvog reda(plavo) i kaskada(crveno), DC 10%



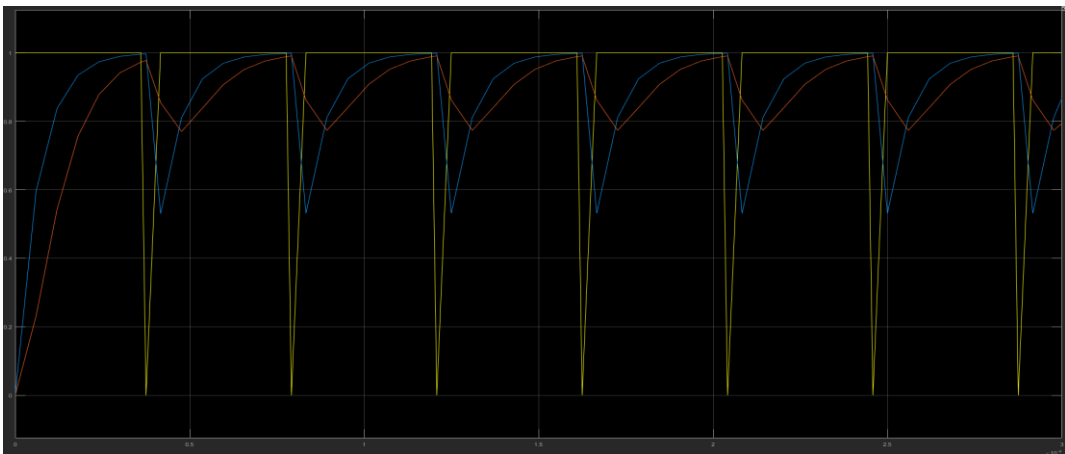
**Slika 4.5** Simulacija, izlaz filtara, prvog reda(plavo) i kaskada(crveno), DC 90%

➤ **Filtar B**

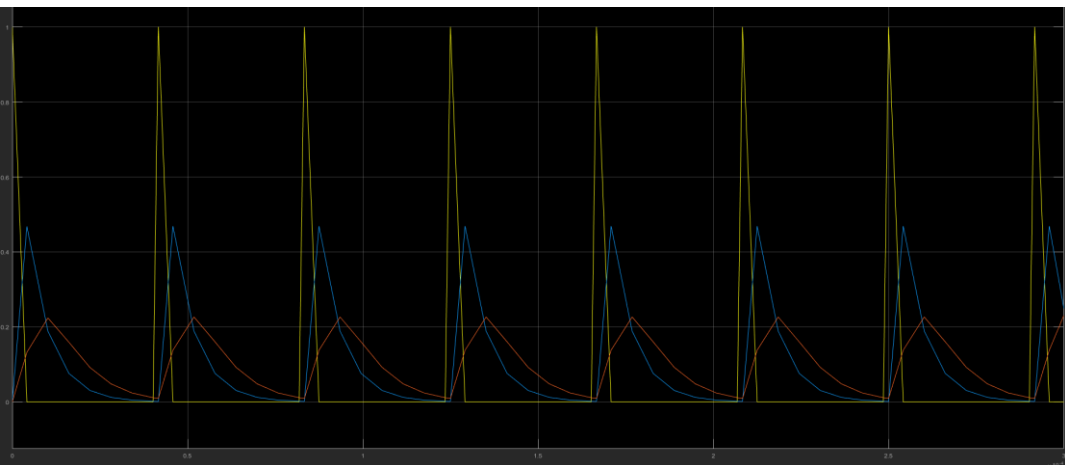
$R = 66 \Omega$ ,  $C = 10\text{nF}$



**Slika 4.6** Simulacija, izlaz filtara, prvog reda(plavo) i kaskada(crveno), DC 50%



**Slika 4.7** Simulacija, izlaz filtara, prvog reda(plavo) i kaskada(crveno), DC 90%

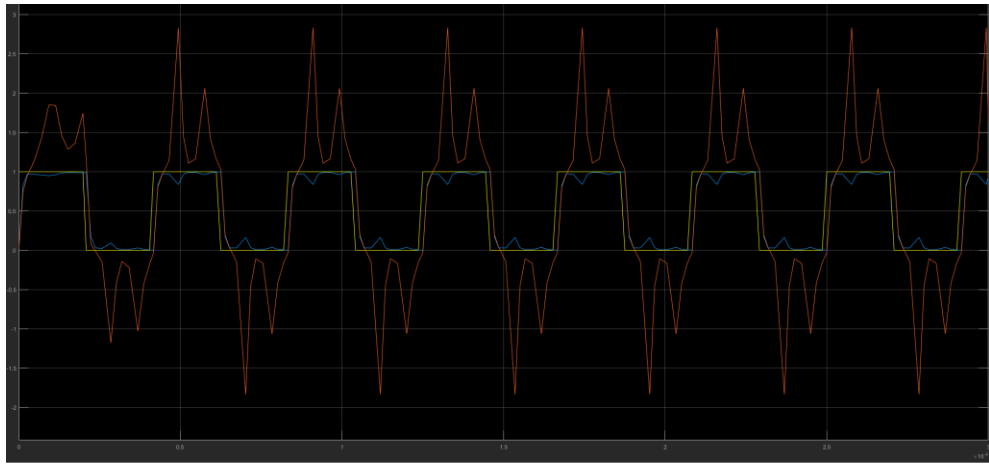


**Slika 4.8** Simulacija, izlaz filtara, prvog reda(plavo) i kaskada(crveno), DC 10%

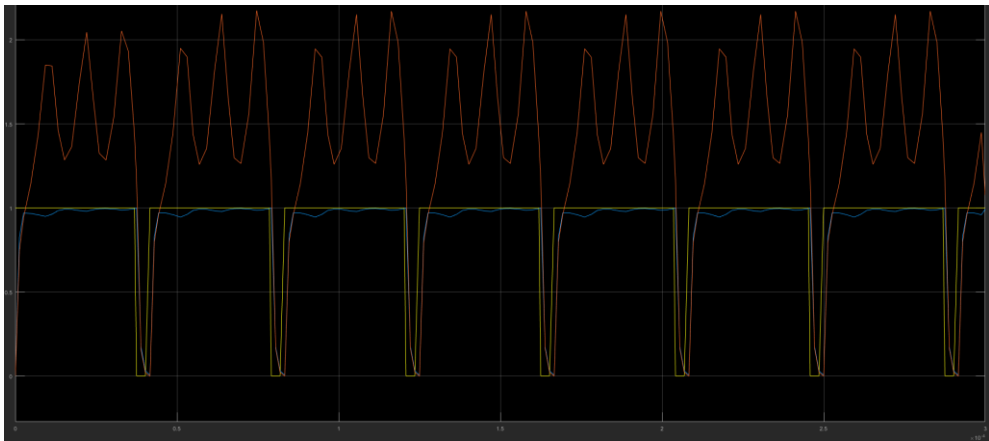


➤ **Filtar C**

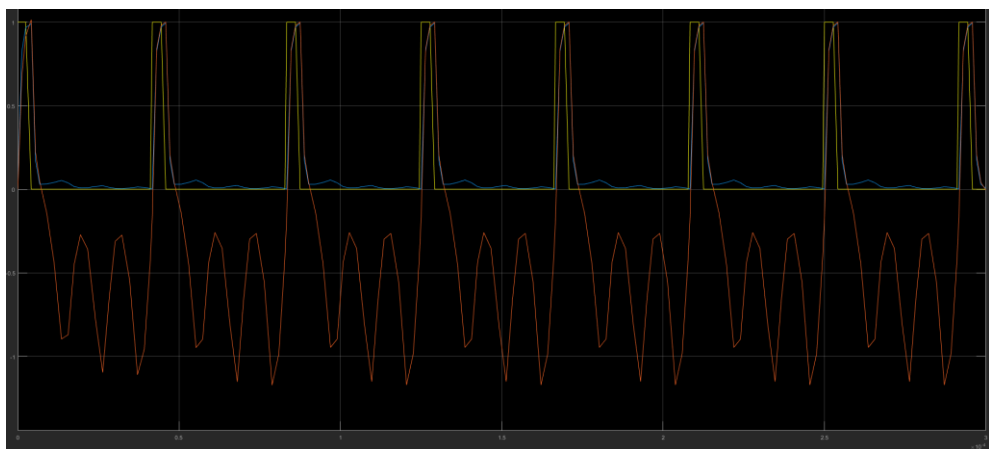
$R = 66 \Omega$ ,  $C = 10\text{nF}$



**Slika 4.9** Simulacija, izlaz filtera, prvog reda(plavo) i kaskada(crveno), DC 50%



**Slika 4.10** Simulacija, izlaz filtera, prvog reda(plavo) i kaskada(crveno), DC 90%



**Slika 4.11** Simulacija, izlaz filtera, prvog reda(plavo) i kaskada(crveno), DC 10%

## 5. Zaključak

Najopćenitije filter možemo opisati kao funkcional koji se definira prijenosnom funkcijom pa prema tome većina parametara električkog filtra se upravo i izvodi iz prijenosne funkcije te za nju možemo reći da je najvažniji parametar električkog filtra.

Prema rezultatima simulacije i mjerenja filtra za zadanu primjenu da se zaključiti kako filter čija je granična frekvencija na 10% osnovne frekvencije signala postiže najbolje rezultate za filtriranje srednje vrijednosti signala među ostalim promatranim filterima. Ovaj rezultat je i očekivani te se da matematički objasniti, naime srednja vrijednost signala nalazi se na nultom harmoniku čija je frekvencija 0 Hz odnosno puno je manja od osnovne frekvencije pa prema tome filter čija je granična frekvencija manja od osnovne frekvencije signala preciznije će filtrirati srednju vrijednost. Osim toga, nizanjem filtera u kaskadu postiže se manja valovitost, odnosno oscilacije od srednje vrijednosti su manje, međutim uvođenjem kaskade dinamika filtra opada.

## Literatura

1. Flegar, Ivan; „Teorija mreža : bilješke s predavanja“, Osijek, 2001.
2. Kuzmanović, Branislav; „Osnove Elektrotehnike“, Zagreb, 2008.
3. <https://www.slideshare.net/jebemte/elektricni-filtri-50362568> - [11.9.2018.]
4. <http://www.ti.com/lit/an/snoa224a/snoa224a.pdf> - [11.9.2018.]
5. <https://www.youtube.com/watch?v=7XIXOHnmOSo> - [11.9.2018.]
6. <https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/frequency-response.html> - [11.9.2018.]

## Sažetak

Završni rad donosi teorijski opis parametara s popratnim matematičkim izvodima i grafičkim prikazima. Bazira se na modeliranju niskopropusnog filtra za jedan tip primjene unutar automobilske industrije. Modeliranje je popraćeno mjerenjem i simulacijom filtra u primjeni za razne slučajeve ulaznog signala. Opisan je postupak mjerenja i simulacije, a rezultati su prikazani grafovima odnosno slikama osciloskopa koje su kasnije oslonac za analizu procjene uspješnosti modeliranog filtra.

## Ključne riječi

- Pasivni filtri
- Filtriranje ACS712 izlaza
- Parametri filtara
- Analogni niskopropusni filtri
- PWM filtriranje

## **Abstract**

This final paper introduces the theoretical description of parameters with accompanying mathematical expressions and graphs. It is based on a low-pass filter modeling for one type of application in the automotive industry. Modeling is accompanied by measurement and simulation of the filter in the application for various cases of the input signal. The measurement and simulation procedure are described, and the results are shown in graphs or oscilloscope images which are the basis for later evaluation of the efficiency of the modeled filter.

## **Key words**


- Passiv filters
- Filtering ACS712 output signal
- Filters parametars
- Analog lowpass filters
- PWM filtering

## Životopis

Luka Kruljac rođen je 25.3.1997. u Đakovu. Odrastao u Gašincima gdje je i pohađao Osnovnu školu J.A.Ćolnića od 1. do 4. razreda. Osnovnu školu od 5. do 8. razreda pohađa u istoimenoj školi u Satnici Đakovačkoj. Godine 2010. završava osnovnu školu te iste godine upisuje prirodoslovno-matematičku gimnaziju A.G.Matoš u Đakovu. Gimnaziju završava 2015. godine kada upisuje program vojnog kadeta, smjer Vojno inženjerstvo. Program kadeta napušta iz osobnih razloga te u listopadu iste godine upisuje sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultet Osijek. Za vrijeme studiranja 2016. i 2017. odrađuje praksu u tvrtki Siemens Convergence Creators, Osijek te 2018. u tvrtki Inchoo.

U Osijeku, 21.8.2018.

Luka Kruljac



---

## Prilozi

1. Matlab model za iscertavanje Bodeovog dijagrama bode.m
2. Matlab model upravljačkog i kontrolnog dijela automobilskeg trošila name.m
3. Fotografije svih rezultata mjerenja mjerjenja.pdf
4. Simulink model za simuliranje filtra s pomoću prijenosne funkcije tf\_filtar.sym
5. Matlab model za iscertavanje fft grafa promatranih signala Fourier\_valni\_oblik.m
6. ACS712 datasheet
7. NDPL070N10B datasheet
8. Knjižica instrumenta Tektronix A622