

# INTEGRISANA KOLA ZA KOMUNIKACIONE SISTEME PROJEKAT ZA 2023/24. GODINU

## OPIS PROBLEMA

Projektovati širokopojasni pojačavač snage za opseg učestanosti od 3 do 6 GHz u 130 nm CMOS procesu. Napajanje pojačavača snage može biti 1.2 ili 2.5 V u zavisnosti od izabrane topologije. Cilj je napraviti pojačavač snage sa što većim  $P_{\text{ldB}}$  u zadatom frekvencijskom opsegu, uzimajući u obzir pretpostavljena ograničenja. U okviru prve faze projekta razmatraju se širokopojasne mreže za prilagođenje, dok se u drugoj fazi projekta one koriste za projektovanje pojačavača snage.

## PRVA FAZA PROJEKTA

U prvoj fazi projekta se razmatraju mreže za prilagođenje koje se koriste u pojačavačima snage iz druge faze projekta. Mreže za prilagođenje se realizuju kao filtri trećeg reda koji transformišu opterećenje od  $50 \Omega$  u optimalnu impedansu  $Z_{\text{opt}}$ . Pojačavači su predviđeni za rad u opsegu učestanosti od 3 do 6 GHz, i stoga se filtri projektuju za centralnu učestanost  $\omega_0$  i relativni propusni opseg  $\Delta$ :

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_L \omega_H} = 2\pi 10^9 \sqrt{3 \cdot 6} = 6\sqrt{2}\pi 10^9 \text{ rad/s}$$

$$\Delta = \frac{\omega_H - \omega_L}{\omega_0} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

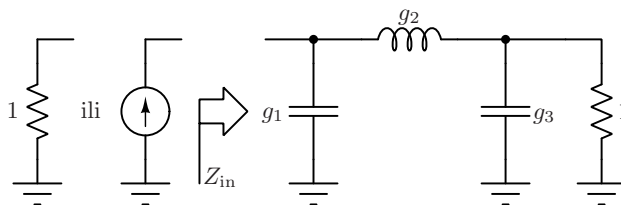
U prvoj fazi projekta je potrebno uraditi:

- [5] Na slici 1 je prikazan prototipni filter trećeg reda. Odrediti vrednosti elemenata prototipnog filtra  $g_1$ ,  $g_2$  i  $g_3$  kada je:
  - Filtar sa Čebiševljevom karakteristikom tipa I pobuđen generatorom unutrašnje otpornosti  $1 \Omega$  u zavisnosti od parametra talasnosti  $\gamma$ .
  - Filtar pobuđen strujnim izvorom korišćenjem Fano metoda projektovanja u zavisnosti od parametra  $x$ .

Odrediti talasnost frekvencijske karakteristike oba filtra u propusnom opsegu

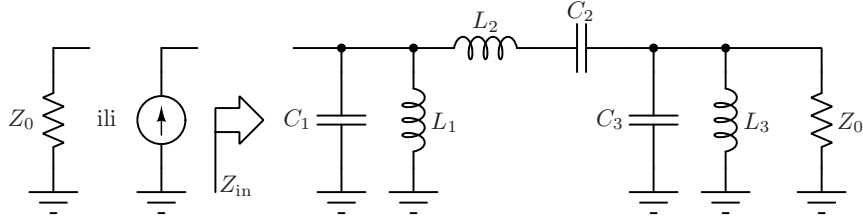
$$\delta = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{min}}}$$

za vrednost parametara  $\gamma = 1$ , odnosno  $x = 1$ .



Slika 1: Prototipni filter.

- [5] Izračunati vrednosti elemenata denormalizovanog filtra propusnika opsega učestanosti sa slike 2 u zavisnosti od impedanse  $Z_0$ , centralne učestanosti  $\omega_0$ , relativnog propusnog opsega  $\Delta$ , i vrednosti elemenata prototipnog filtra  $g_1$ ,  $g_2$  i  $g_3$ .

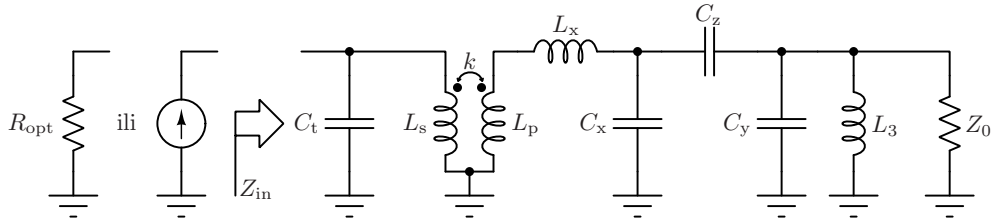


Slika 2: Denormalizovani filter propusnik opsega učestanosti.

3. [10] Filter sa slike 3 se dobija primenom kapacitivne Nortonove transformacije na kondenzatore  $C_2$  i  $C_3$  filtera propusnika opsega učestanosti sa slike 2, i transformacijom  $L_1$  i  $L_2$  u realni transformator induktivnosti primara  $L_p$ , sekundara  $L_s$ , faktora sprege  $k$  i rednog kalemova induktivnosti  $L_x$ , umetanjem idealnog transformatora  $1 : n_e$ , gde je

$$n_e = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{L_s}{L_p}}.$$

Pokazati postupak transformacije i izračunati vrednosti elemenata transformisanog filtera sa slike 3 u zavisnosti od  $Z_0$ , centralne učestanosti  $\omega_0$ , relativnog propusnog opsega  $\Delta$ , vrednosti elemenata prototipnog filtera  $g_i$ , faktora sprege kalemova  $k$ , odnosa induktivnosti sekundara i primara  $L_s/L_p$  i faktora kapacitivne transformacije  $n_c$ .

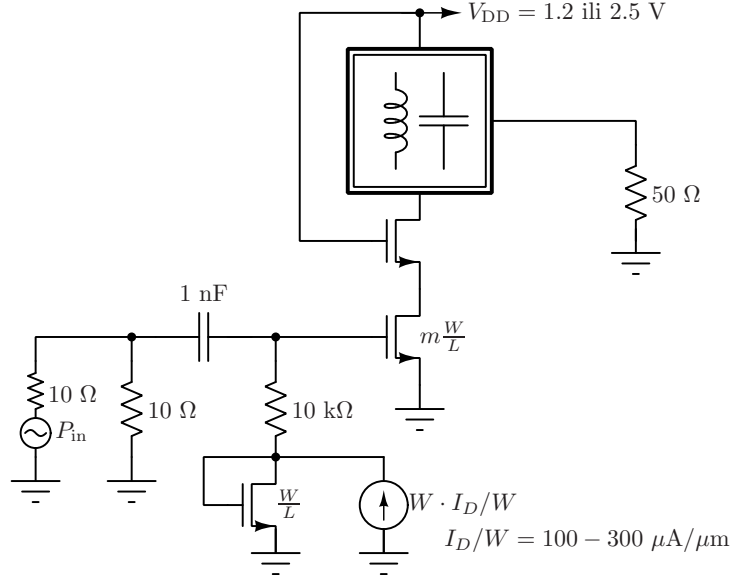


Slika 3: Filter posle primene transformacija.

4. [10] Odrediti faktor sprege  $k$  realnog transformatora za koji je  $L_x = 0$  u zavisnosti od elemenata prototipnog filtera  $g_i$  i relativnog propusnog opsega  $\Delta$ . Izračunati minimalnu vrednost  $k_{\min, \gamma}$  za koju je faktor talasnosti filtera sa Čebiševljevom karakteristikom  $\gamma \geq 1$ . Izračunati minimalnu vrednost  $k_{\min, x}$  za koju je parametar  $x$  filtera sa strujnom pobudom  $x \geq 1$ . Odrediti izraze  $\gamma = f(k, \Delta)$  i  $x = f(k, \Delta)$  pod uslovom  $L_x = 0$ .

## DRUGA FAZA PROJEKTA

Korišćenjem mreža za prilagođenje iz prve faze projekta projektovati integrisane pojačavače snage u 130 nm CMOS procesu. Blok dijagram pojačavača snage je dat na slici 4. Nije potrebno projektovati ulaznu mrežu za prilagođenje i za potrebe simulacije koristiti kolo sa slike 4.



Slika 4: Blok dijagram pojačavača snage.

- [10] Odrediti optimalnu impedansu  $Z_{\text{opt} \times 1}$  jediničnog tranzistora za maksimalnu izlaznu snagu:
  - Kaskodne konfiguracije sa napajanjem od 1.2 V, u kojoj su pojačavački i kaskodni tranzistor sa gejtom debljine  $t_{\text{ox}} \approx 2.6$  nm,
  - Kaskodne konfiguracije sa napajanjem od 2.5 V, u kojoj je pojačavački tranzistor sa gejtom debljine  $t_{\text{ox}} \approx 2.6$  nm, a kaskodni tranzistor sa debljinom gejta  $t_{\text{ox}} \approx 7$  nm.

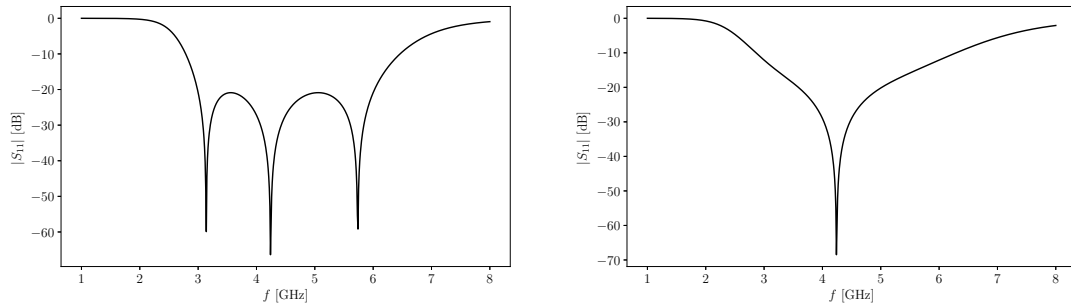
*Napomena:* U simulacijama koristiti  $m = 20$  puta veći tranzistor od jediničnog i preračunati optimalnu impedansu  $Z_{\text{opt} \times 1} = Z_{\text{opt} \times m} / m$ .
- [10] Izračunati kolika je maksimalna  $P_{\text{1dB}}$  snaga korišćenjem filtara iz prethodne faze projekta pod pretpostavkama  $L_s = L_p$  i  $L_x = 0$ . Usvojiti da je  $n_c = n_{c, \text{max}}$ , i koeficijent sprege transformatora u opsegu  $k = [k_{\text{min}, \gamma}, 0.8]$ , odnosno  $k = [k_{\text{min}, x}, 0.8]$ . Izračunati vrednosti elemenata filtara za sve četiri kombinacije pojačavača sa napajanjem od 1.2 i 2.5 V, i obe vrste filtara.
- [10] Simulacijom odrediti  $P_{\text{1dB}}$  u opsegu učestanosti od 1 do 10 GHz za sve četiri kombinacije pojačavača i filtara, i nacrtati grafike.
- (*Opciono*) Projektovati ulaznu mrežu za prilagođenje koja je pogonjena idealnim naponski kontrolisanim strujnim (VCCS) generatorom. Nacrtati naponsko pojačanje za mali signal u opsegu učestanosti od 2 do 8 GHz, pod pretpostavkom da je transkonduktansa VCCS  $g_m = 100$  mS.

Pri projektovanju pojačavača snage potrebno je obratiti pažnju na:

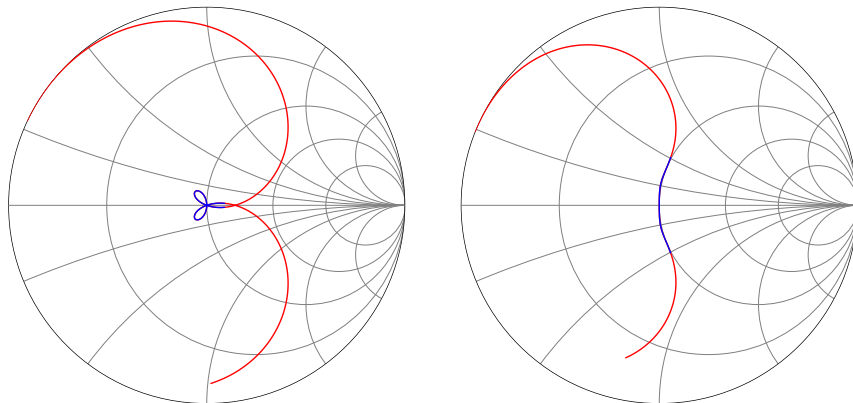
- Koristiti RF modele tranzistora sa širinom prsta  $W_{\text{finger}} \leq 5 \mu\text{m}$ ,
- Pojačavačke tranzistore polarisati gustinom struje po širini tranzistora  $100 \mu\text{A}/\mu\text{m} \leq I_{\text{D}}/W \leq 300 \mu\text{A}/\mu\text{m}$ ,
- Kaskodni tranzistori sa debljinom gejta od  $t_{\text{ox}} \approx 2.6 \text{ nm}$  bi trebalo da budu iste širine kao pojačavački tranzistori,
- Kaskodni tranzistori sa debljinom gejta od  $t_{\text{ox}} \approx 7 \text{ nm}$  bi trebalo da budu dva do tri puta širi od pojačavačkih tranzistora,
- Za skaliranje širine jediničnog tranzistora koristiti faktor  $m$ .

## NAPOMENE

- Provera ispravnosti izračunatih vrednosti elemenata se može izvršiti simulacijom  $S$  parametara filtera u svim fazama projektovanja, izborom odgovarajućih vrednosti unutrašnjih otpornosti generatora. Koefficienti refleksije ispravno projektovanih filtera su prikazani na slici 5, dok je ulazna impedansa filtera na Smitovom dijagramu prikazana na slici 6.



Slika 5: Koefficienti refleksije filtera: levo - filter sa Čebiševljevom karakteristikom, desno - filter poganjen strujnim izvorom projektovan Fano metodom.



Slika 6: Ulazne impedanse filtera: levo - filter sa Čebiševljevom karakteristikom, desno - filter poganjen strujnim izvorom projektovan Fano metodom. Crvenom bojom je nacrtana impedansa u opsegu učestanosti od 1 do 8 GHz, dok je plavom bojom nacrtana impedansa u opsegu učestanosti od 3 do 6 GHz.

- Izrazi za vrednosti elemenata mogu biti složeni i preporučuje se upotreba softvera za simboličku algebru, npr. SymPy, wxMaxima i sl. U direktorijumu `sympy` se nalazi Jupyter sveska sa

primerom korišćenja SymPy paketa. Primer pokazuje kako se može rešiti jednačina, izvršiti smena promenljivih i rezultat pretvoriti u  $\text{\LaTeX}$  format.

- Izveštaji o prvoj i drugoj fazi projekta se pišu u formi rada za časopis u [MS Word](#) ili  [\$\text{\LaTeX}\$  obrascu](#) za IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.
- Električne šeme se mogu nacrtati u programskom paketu [XCircuit](#) uz pomoć [biblioteke parametrizovanih simbola](#).
- Smitovi dijagrami se mogu nacrtati izmenom [Asymptote](#) skripti cheby3.asy i fano3.asy, koje se nalaze u direktorijumu `fig`. Skripte se izvršavaju komandom:

```
asy -f pdf cheby3.asy
```

- Grafici se mogu nacrtati pomoću Python skripte plotgraph.py, koja se nalazi u direktorijumu `fig`. Prvi argument pri izvršavanju skripte je ime fajla sa podacima, dok su na drugom i trećem mestu  $\text{\LaTeX}$  izrazi za oznake  $y$  i  $x$  osa, respektivno. Na primer:

```
python plotgraph.py cheby3_s11.csv "|S_{11}|~\mr{[dB]}" "f~\mr{[GHz]}"
```

- Izveštaji se predaju isključivo u PDF formatu.