

## PRIMJER OPTIČKOG PRIJEMNIKA SA PROMJENLJIVOM TRANSIMPEDANSOM NA BAZI PREKIDAČKIH TEHNIKA

### Zadatak 1

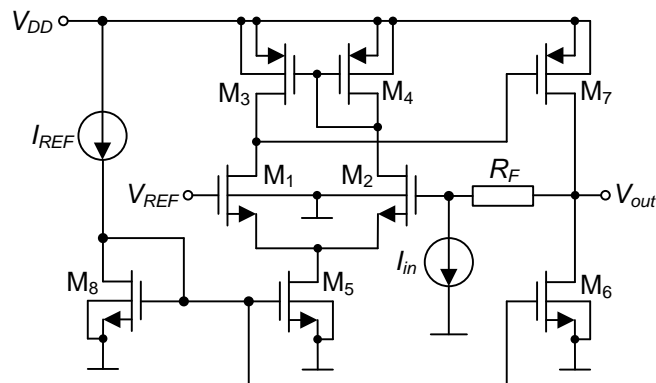
Za transimpedansni pojačavač prikazan na slici 1.1 odrediti:

- Zavisnost izlaznog napona  $V_{OUT}$  od ulazne struje  $I_{IN}$ , za opseg ulazne struje  $0 < I_{IN} < 1 \mu\text{A}$ . Koja je maksimalna vrijednost transimpedanse kola?
- Open-loop* transimpedansu, *closed-loop* transimpedansu, *open-loop* ulaznu i izlaznu otpornost, *closed-loop* ulaznu i izlaznu otpornost.

Poznato je: napon napajanja kola  $V_{DD} = 3 \text{ V}$ , referentna polarizaciona struja  $I_{REF} = 70 \mu\text{A}$ , referentni napon  $V_{REF} = 2 \text{ V}$ , napon praga n-kanalnog MOSFET-a  $V_{tn} = 550 \text{ mV}$ , napon praga p-kanalnog MOSFET-a  $V_{tp} = -660 \text{ mV}$ , transkonduktanski parametar n-kanalnog MOSFET-a  $k'_n = 137.5 \mu\text{A/V}^2$ , transkonduktanski parametar p-kanalnog MOSFET-a  $k'_p = 51 \mu\text{A/V}^2$ , parametar  $V'_{An} = 11 \text{ V} / \mu\text{m}$ , parametar  $V'_{Ap} = 5.1 \text{ V} / \mu\text{m}$ . Dimenzije MOSFET-ova su date u tabeli 1.1.

**Tabela 1.1** - Dimenzije MOSFET-ova

MOSFET	$L$ [ $\mu\text{m}$ ]	$W$ [ $\mu\text{m}$ ]
M <sub>1</sub>	0.7	100
M <sub>2</sub>	0.7	100
M <sub>3</sub>	1	50
M <sub>4</sub>	1	50
M <sub>5</sub>	0.7	35
M <sub>6</sub>	0.7	35
M <sub>7</sub>	1	100
M <sub>8</sub>	0.7	35

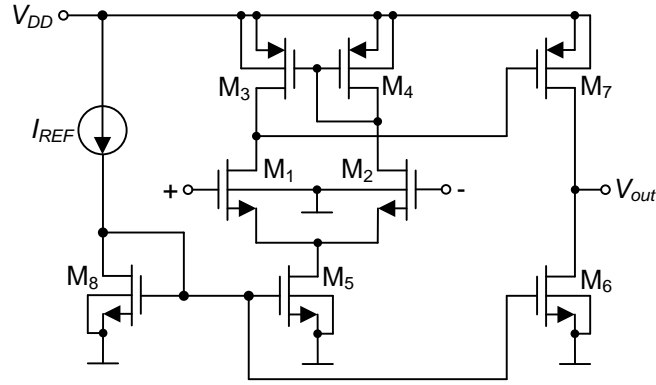


slika 1.1

### Rješenje 1

Transimpedansni pojačavač je realizovan upotrebom dvostepenog operacionog pojačavača. Ulazni diferencijalni par operacionog pojačavača čine MOSFET-ovi M<sub>1</sub> i M<sub>2</sub>, sa aktivnim opterećenjem (MOSFET-ovi M<sub>3</sub> i M<sub>4</sub>). Izlazni stepen je u formi pojačavača sa zajedničkim sorsom (MOSFET M<sub>7</sub>) sa aktivnim opterećenjem (MOSFET M<sub>6</sub>). Strujno ogledalo koga čine MOSFET-ovi M<sub>5</sub> i M<sub>8</sub> daje polarizacionu struju za ulazni diferencijalni par.

Dvostepeni operacioni pojačavač u sklopu transimpedansnog pojačavača prikazan je na slici 1.2.



slika 1.2

Kako su MOSFET-ovi M5 i M8 identičnih karakteristika i njihovi naponi gejt-sors su jednaki, struja drejna MOSFET-a M5 je:

$$I_{D5} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_5}{\left(\frac{W}{L}\right)_8} I_{D8} = I_{REF} = 70 \mu\text{A} \quad (1.1)$$

Struje ostalih MOSFET-ova su:

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_{REF}}{2} = 35 \mu\text{A} \quad (1.2)$$

$$I_{D3} = I_{D1} = \frac{I_{REF}}{2} = 35 \mu\text{A} \quad (1.3)$$

$$I_{D4} = I_{D2} = \frac{I_{REF}}{2} = 35 \mu\text{A} \quad (1.4)$$

Kako su MOSFET-ovi M5 i M6 identičnih karakteristika i njihovi naponi gejt-sors su jednaki, struja drejna MOSFET-a M6 je:

$$I_{D6} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_6}{\left(\frac{W}{L}\right)_5} I_{D5} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_6}{\left(\frac{W}{L}\right)_5} I_{REF} = 70 \mu\text{A} \quad (1.5)$$

Struja MOSFET-a M7 jednaka je struji MOSFET-a M6:

$$I_{D7} = I_{D6} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_6}{\left(\frac{W}{L}\right)_5} I_{REF} = 70 \mu\text{A} \quad (1.6)$$

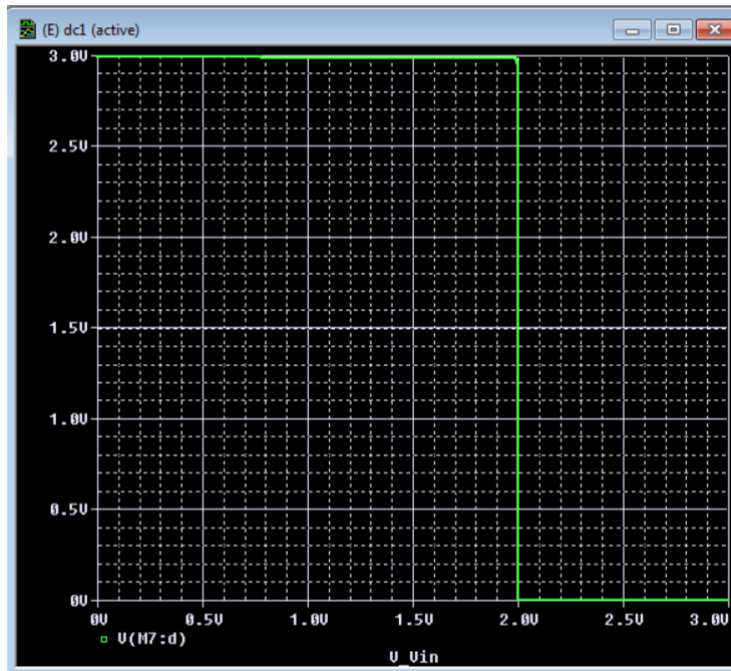
U cilju analize sistematskog *offset*-a, posmatra se situacija kada su ulazni terminali uzemljeni. Ukoliko je ulazni stepen savršeno uparen, naponi na drejnu MOSFET-ova M3 i M4 će biti jednaki. To znači da će napon gejt-sors MOSFET-a M7 biti jednak naponu gejt-sors MOSFET-a M3. To dalje znači da će struja MOSFET-a M7 biti:

$$I_{D7} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_7}{\left(\frac{W}{L}\right)_3} I_{D3} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_7}{\left(\frac{W}{L}\right)_3} \frac{I_{REF}}{2} = 70 \mu\text{A} \quad (1.7)$$

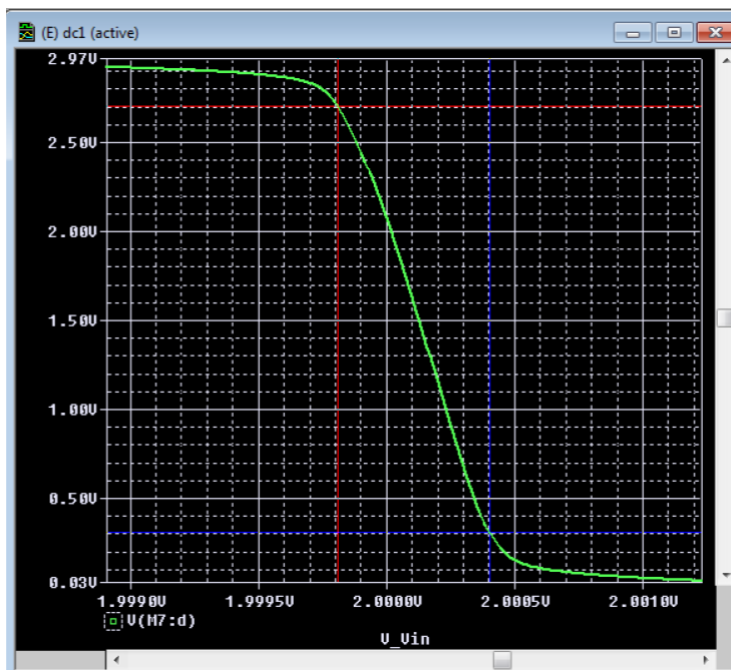
Dakle, u cilju eliminacije sistematskog *offset*-a, potrebno je da bude ispunjen sljedeći uslov:

$$\frac{\left(\frac{W}{L}\right)_7}{\left(\frac{W}{L}\right)_3} = 2 \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_6}{\left(\frac{W}{L}\right)_5} \quad (1.8)$$

Prenosna *open-loop* karakteristika operacionog pojačavača (pri čemu je za pozitivni ulaz vezan referentni napon  $V_{REF} = 2$  V, dok se napon na pozitivnom ulazu mijenja od 0 do 3 V) prikazana je na slici 1.3, dok je na slici 1.4 prikazan dio prenosne karakteristike za ulazni napon u okolini  $V_{REF} = 2$  V.



slika 1.3



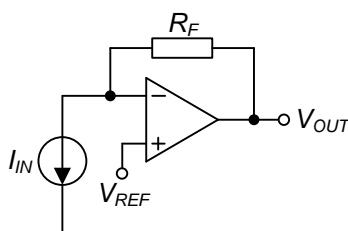
slika 1.4

Može se uočiti da je opseg izlaznog napona, za koji je prenosna karakteristika linearna, od 300 mV do 2.7 V. Prema rezultatima simulacije, *open-loop* DC pojačanje operacionog pojačavača iznosi - 4137.

Transimpedansni pojačavač je realizovan tako što je na pozitivni (+) ulaz operacionog pojačavača doveden je referentni napon  $V_{REF}$ , dok je za negativni (-) ulaz povezan strujni izvor  $I_{IN}$ . Preko otpornika  $R_F$  uspostavljena je negativna povratna sprega.

Na osnovu kola prikazanog na slici 1.5, sledi da je izlazni napon  $V_{OUT}$  dat izrazom:

$$V_{OUT} = V_{REF} + R_F I_{IN} \quad (1.9)$$



slika 1.5

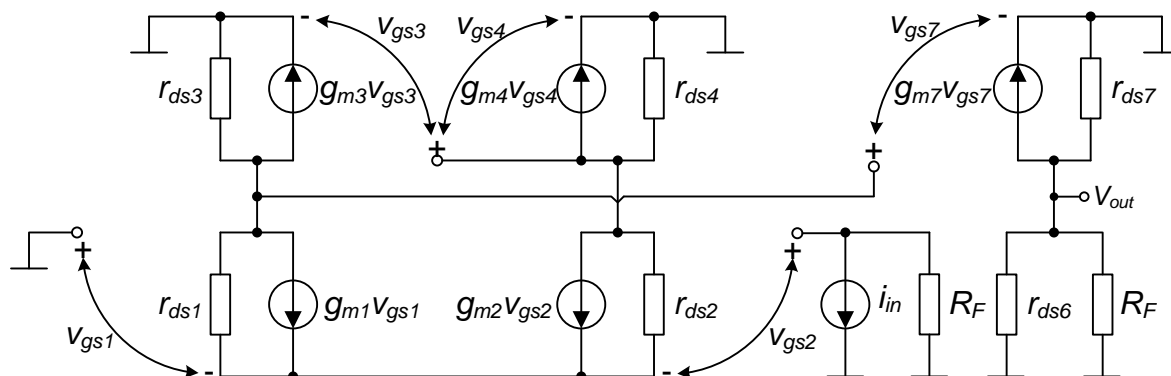
Izlazni napon mora biti u okviru radnog opseg operacionog pojačavača, što znači da:

$$R_F I_{IN} < 0.7 \text{ V} \quad (1.10)$$

Kako je opseg ulazne struje od 0 do 1  $\mu\text{A}$ , otpornost  $R_F$  mora ispunjavati sljedeći uslov:

$$R_F < 700 \text{ k}\Omega \quad (1.11)$$

b) Model za male signale za izračunavanje *open-loop* transimpedanse prikazan je na slici 1.6. Polarizacioni strujni izvor je u ovoj analizi smatran idealnim.



slika 1.6

Na osnovu modela prikazanog na slici 1.6 važe sljedeće relacije:

$$g_{m1} v_{gs1} + \frac{v_{gs7} + v_{gs1}}{r_{ds1}} + g_{m3} v_{gs3} + \frac{v_{gs7}}{r_{ds3}} = 0 \quad (1.12)$$

$$g_{m1} v_{gs1} + g_{m3} v_{gs3} + v_{gs7} \left( \frac{1}{r_{ds1}} + \frac{1}{r_{ds3}} \right) = 0 \quad (1.13)$$

$$g_{m2}v_{gs2} + \frac{v_{gs2} + v_{gs4} + R_F i_{in}}{r_{ds2}} + g_{m4}v_{gs4} + \frac{v_{gs4}}{r_{ds4}} = 0 \quad (1.14)$$

$$v_{gs4} = v_{gs3} \quad (1.15)$$

Na osnovu prethodne dvije relacije, uz odgovarajuće aproksimacije, dobija se:

$$g_{m2}v_{gs2} + g_{m4}v_{gs3} + \frac{R_F i_{in}}{r_{ds2}} = 0 \quad (1.16)$$

Dalje je:

$$v_{gs1} - v_{gs2} - R_F i_{in} = 0 \quad (1.17)$$

Na osnovu dvije prethodne relacije, slijedi:

$$g_{m2}(v_{gs1} - R_F i_{in}) + g_{m4}v_{gs3} + \frac{R_F i_{in}}{r_{ds2}} = 0 \quad (1.18)$$

Slijedi da je napon  $v_{gs3}$ :

$$v_{gs3} = -\frac{g_{m2}}{g_{m4}}(v_{gs1} - R_F i_{in}) - \frac{R_F i_{in}}{g_{m4}r_{ds2}} \quad (1.19)$$

Na osnovu relacija (1.13) i (1.19), dobija se sljedeći izraz:

$$g_{m1}v_{gs1} - \frac{g_{m2}g_{m3}}{g_{m4}}(v_{gs1} - R_F i_{in}) - \frac{g_{m3}R_F i_{in}}{g_{m4}r_{ds2}} + v_{gs7} \left( \frac{1}{r_{ds1}} + \frac{1}{r_{ds3}} \right) = 0 \quad (1.20)$$

Kako je  $g_{m1} = g_{m2}$  i  $g_{m3} = g_{m4}$ , uz odgovarajuće aproksimacije, slijedi:

$$g_{m2}R_F i_{in} + v_{gs7} \left( \frac{1}{r_{ds1}} + \frac{1}{r_{ds3}} \right) = 0 \quad (1.21)$$

Izlazni napon  $v_{out}$  je:

$$v_{out} = -g_{m7}v_{gs7}(R_F \parallel r_{ds6} \parallel r_{ds7}) = g_{m2}g_{m7}R_F(r_{ds1} \parallel r_{ds3})(R_F \parallel r_{ds6} \parallel r_{ds7})i_{in} \quad (1.22)$$

Slijedi da je *open-loop* transimpedansa:

$$A_{open\_loop} = \frac{v_{out}}{i_{in}} = g_{m2}g_{m7}R_F(r_{ds1} \parallel r_{ds3})(R_F \parallel r_{ds6} \parallel r_{ds7}) \quad (1.23)$$

Transkonduktansa  $g_{m2}$  iznosi:

$$g_{m2} = \sqrt{2k'_n \left( \frac{W}{L} \right)_2 I_{D2}} = 1.17 \text{ mS} \quad (1.24)$$

Transkonduktansa  $g_{m7}$  iznosi:

$$g_{m7} = \sqrt{2k'_p \left( \frac{W}{L} \right)_7 I_{D7}} = 0.84 \text{ mS} \quad (1.25)$$

Izlazna otpornost MOSFET-a  $M_1$  iznosi:

$$r_{ds1} = \frac{V'_{An}L_1}{I_{D1}} = 220 \text{ k}\Omega \quad (1.26)$$

Izlazna otpornost MOSFET-a  $M_3$  iznosi:

$$r_{ds3} = \frac{V'_{Ap} L_3}{I_{D3}} = 145.71 \text{ k}\Omega \quad (1.27)$$

Izlazna otpornost MOSFET-a  $M_6$  iznosi:

$$r_{ds6} = \frac{V'_{An} L_6}{I_{D6}} = 110 \text{ k}\Omega \quad (1.28)$$

Izlazna otpornost MOSFET-a  $M_7$  iznosi:

$$r_{ds7} = \frac{V'_{Ap} L_7}{I_{D7}} = 72.85 \text{ k}\Omega \quad (1.29)$$

Treba napomenuti da *open-loop* DC naponsko pojačanje samog operacionog pojačavača  $A_{v0}$  iznosi:

$$A_{v0} = -g_{m2}g_{m7}(r_{ds1} \parallel r_{ds3})(r_{ds6} \parallel r_{ds7}) \approx -3752 \quad (1.30)$$

što je približno vrijednosti pojačanja, koja je dobijena simulacijama.

Faktor povratne grane  $K$  je:

$$K = \frac{1}{R_F} \quad (1.31)$$

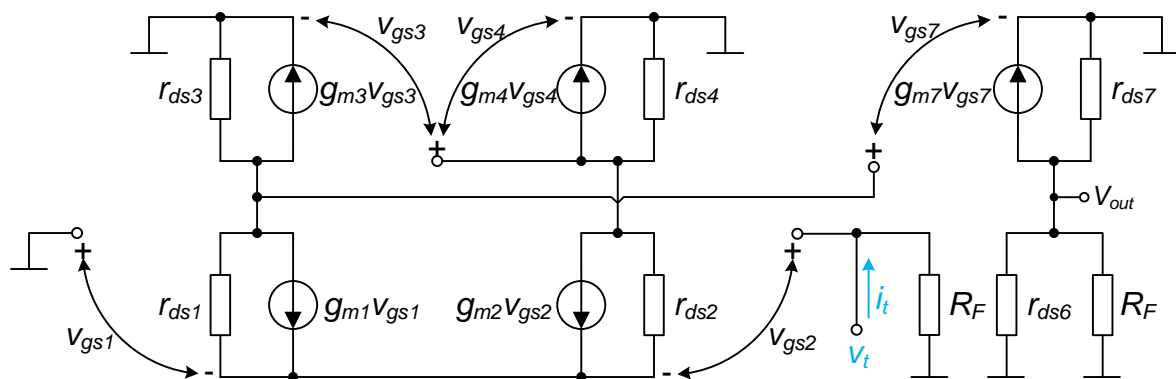
*Closed-loop* transimpedansa je data sljedećim izrazom:

$$A_{closed\_loop} = \frac{g_{m2}g_{m7}R_F(r_{ds1} \parallel r_{ds3})(R_F \parallel r_{ds6} \parallel r_{ds7})}{1 + g_{m2}g_{m7}(r_{ds1} \parallel r_{ds3})(R_F \parallel r_{ds6} \parallel r_{ds7})} \quad (1.32)$$

Za vrijednost otpornosti  $R_F$  reda stotinu kilooma, prethodni izraz se svodi na:

$$A_{closed\_loop} \approx R_F \quad (1.33)$$

Model za izračunavanje ulazne *open-loop* otpornosti je prikazan na slici 1.7.



slika 1.7

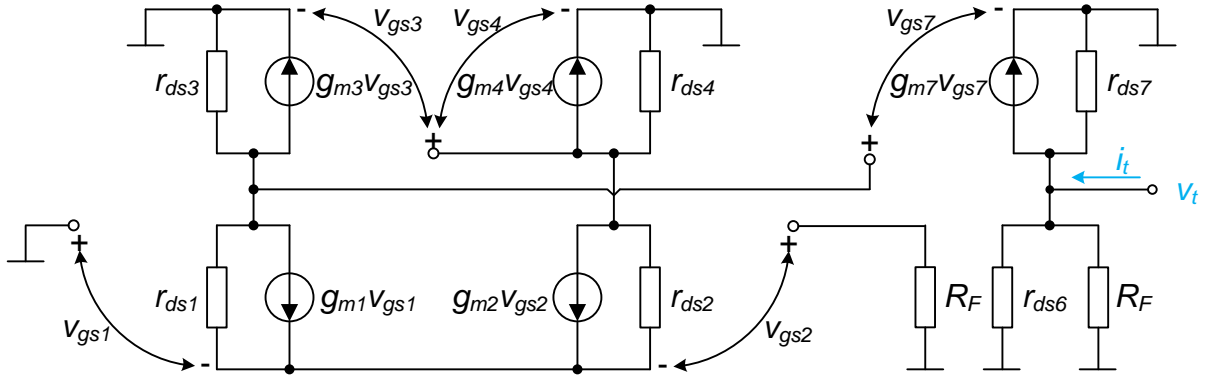
Na osnovu modela prikazanog na slici 1.7 jednostavno se dobija da je ulazna *open-loop* otpornost:

$$R_{in\_open\_loop} = R_F \quad (1.34)$$

Model za izračunavanje izlazne *open-loop* otpornosti je prikazan na slici 1.8.

Na osnovu modela prikazanog na slici 1.8 jednostavno se dobija da je izlazna *open-loop* otpornost:

$$R_{out\_open\_loop} = R_F \parallel r_{ds6} \parallel r_{ds7} \quad (1.35)$$



slika 1.8

Closed-loop ulazna otpornost je data sljedećim izrazom:

$$R_{in\_closed\_loop} = \frac{R_F}{1 + g_{m2}g_{m7}(r_{ds1} \parallel r_{ds3})(R_F \parallel r_{ds6} \parallel r_{ds7})} \quad (1.36)$$

$$\approx \frac{R_F}{g_{m2}g_{m7}(r_{ds1} \parallel r_{ds3})(R_F \parallel r_{ds6} \parallel r_{ds7})}$$

Closed-loop izlazna otpornost je data sljedećim izrazom:

$$R_{out\_closed\_loop} = \frac{R_F \parallel r_{ds6} \parallel r_{ds7}}{1 + g_{m2}g_{m7}(r_{ds1} \parallel r_{ds3})(R_F \parallel r_{ds6} \parallel r_{ds7})} \quad (1.37)$$

Za otpornosti  $R_F$  reda stotinu kilooma, izraz za *closed-loop* ulaznu otpornost se može aproksimirati na sljedeći način:

$$R_{out\_closed\_loop} \approx \frac{1}{g_{m2}g_{m7}(r_{ds1} \parallel r_{ds3})} \approx 12 \Omega \quad (1.38)$$

Može se primijetiti da *closed-loop* ulazna i izlazna otpornost imaju male vrijednosti, značajno manje nego u *open-loop* konfiguraciji, kako je i očekivano.

## Zadatak 2

Transimpedansni pojačavač prikazan na slici 1.2 koristi se za realizaciju optičkog prijemnika. Odrediti *closed-loop* transimpedansu optičkog prijemnika uzimajući u obzir parazitnu kapacitivnost fotodiode  $C_{PD}$  i ulaznu kapacitivnost  $C_{IN}$  transimpedansnog pojačavača. Operacioni pojačavač modelovati prenosnom karakteristikom sa jednim dominantnim polom. Operacioni pojačavač je interno kompenzovan umetanjem redne veze otpornika  $R_c$  i kondenzatora  $C_c$ , između drejna i gjeta MOSFET-a M7. Odrediti prirodnu učestanost  $\omega_0$  i faktor  $Q$ .

## Rješenje 2

*Closed-loop* transimpedansa optičkog prijemnika je data izrazom (pogledati uvodno predavanje):

$$A_{closed\_loop} = \frac{A_{v0}\omega_b}{C_1} \frac{1}{s^2 + s \frac{1 + \omega_b R_F C_1}{R_F C_1} + \frac{(A_{v0} + 1)\omega_b}{R_F C_1}} \quad (1.39)$$

pri čemu je  $C_1 = C_{PD} + C_{IN}$ , dok je učestanost dominantnog pola  $\omega_b$ :

$$\omega_b = \frac{1}{g_{m7}(r_{ds1} \parallel r_{ds3})(r_{ds6} \parallel r_{ds7})C_c} \quad (1.40)$$

pri čemu je  $C_c$  kompenzaciona kapacitivnost samog operacionog pojačavača između gejta i drejna MOSFET-a  $M_7$ . Za kompenzacionu kapacitivnost od 3 pF, učestanost dominantnog pola je oko 15 kHz.

Slijedi da je prirodna učestanost  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(A_{v0} + 1)\omega_b}{R_F C_1}} \quad (1.41)$$

dok je faktor  $Q$ :

$$Q = \frac{\sqrt{(A_{v0} + 1)\omega_b R_F C_1}}{1 + \omega_b R_F C_1} \quad (1.42)$$

Može se uočiti da većim transimpedansama (otpornostima  $R_F$ ) odgovara manji frekventni opseg kao i manji faktor  $Q$ .

Za stabilan sistem, potrebno je da  $Q < 0.707$ , što znači da vremensku konstantu  $R_F C_1$  treba izabrati prema sljedećoj nejednakosti:

$$R_F C_1 > \frac{2A_{v0}}{\omega_b} \quad (1.43)$$

### Zadatak 3

Izvršiti frekvencijsku kompenzaciju optičkog prijemnika. Odrediti *closed-loop* transimpedansu, prirodnu učestanost  $\omega_0$  i faktor  $Q$ .

### Rješenje 3

Frekvencijska kompenzacija se vrši umetanjem kondenzatora  $C_F$  paralelno otporniku  $R_F$  u granu negativne povratne sprege. *Closed-loop* transimpedansa optičkog prijemnika je data izrazom (pogledati uvodno predavanje):

$$A_{closed\_loop} = \frac{A_{v0}\omega_b}{C_1} \frac{1}{\left(1 + \frac{C_F}{C_1}\right) \left(s^2 + s \frac{C_1}{C_1 + C_F} \left[\omega_b + \frac{1}{R_F C_1} + \frac{(A_{v0} + 1)\omega_b C_F}{C_1}\right] + \frac{(A_{v0} + 1)\omega_b}{R_F (C_1 + C_F)}\right)} \quad (1.44)$$

Slijedi da je prirodna učestanost  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(A_{v0} + 1)\omega_b}{R_F (C_1 + C_F)}} \approx \sqrt{\frac{A_{v0}\omega_b}{R_F C_1}} \quad (1.45)$$

dok je faktor  $Q$ :

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{A_{v0}\omega_b}{R_F (C_1 + C_F)}}}{\left(1 + \frac{C_F}{C_1}\right) \left[\omega_b + \frac{1}{R_F C_1} + \frac{(A_{v0} + 1)\omega_b C_F}{C_1}\right]} \approx \frac{\sqrt{\frac{R_F C_1}{A_{v0}\omega_b}}}{\frac{1}{A_{v0}\omega_b} + R_F \left(C_F + \frac{C_1}{A_{v0}}\right)} \quad (1.46)$$

ukoliko je  $(C_{PD} + C_{IN}) \gg C_F$ .

Za stabilan sistem, potrebno je da  $Q < 0.707$ , što znači da kompenzacionu kapacitivnost  $C_F$  treba izabrati prema sljedećoj nejednakosti:



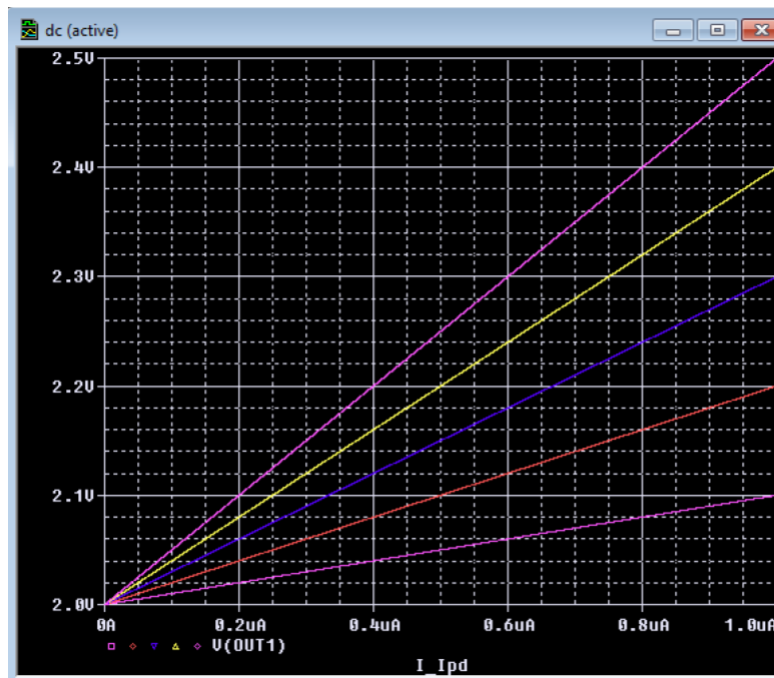
$$C_F > \sqrt{\frac{2C_1}{A_{v0}\omega_b R_F}} - \frac{C_1}{A_{v0}} - \frac{1}{A_{v0}\omega_b R_F} \quad (1.47)$$

Iz prethodnog izraza se može zaključiti da je za manju transimpedansu (otpornost  $R_F$ ) potrebno izabrati veću kompenzacionu kapacitivnost  $C_F$ . Dakle, stabilnost optičkog prijemnika se može ostvariti povoljnim odabirom kompenzacione kapacitivnosti  $C_F$ , čime se neće ugroziti frekventni opseg optičkog prijemnika (1.45), ukoliko je  $(C_{PD} + C_{IN}) \gg C_F$ .

## VJEŽBE

- Za prethodno analizirano kolo, izvršiti parametarsku DC analizu za opseg ulazne struje  $0 \text{ A} \leq I_{PD} \leq 1 \text{ }\mu\text{A}$ , sa korakom  $\Delta I_{PD} = 100 \text{ pA}$ , pri čemu je parametar otpornost  $R_F = \{100 \text{ k}\Omega, 200 \text{ k}\Omega, 300 \text{ k}\Omega, 400 \text{ k}\Omega, 500 \text{ k}\Omega\}$ . Operacioni pojačavač je interno kompenzovan umetanjem redne veze otpornika  $R_c = 2.5 \text{ k}\Omega$  i kondenzatora  $C_c = 3 \text{ pF}$ , između drejna i gjeta MOSFET-a M7.

Na slici 1.1 su prikazani rezultati simulacije.

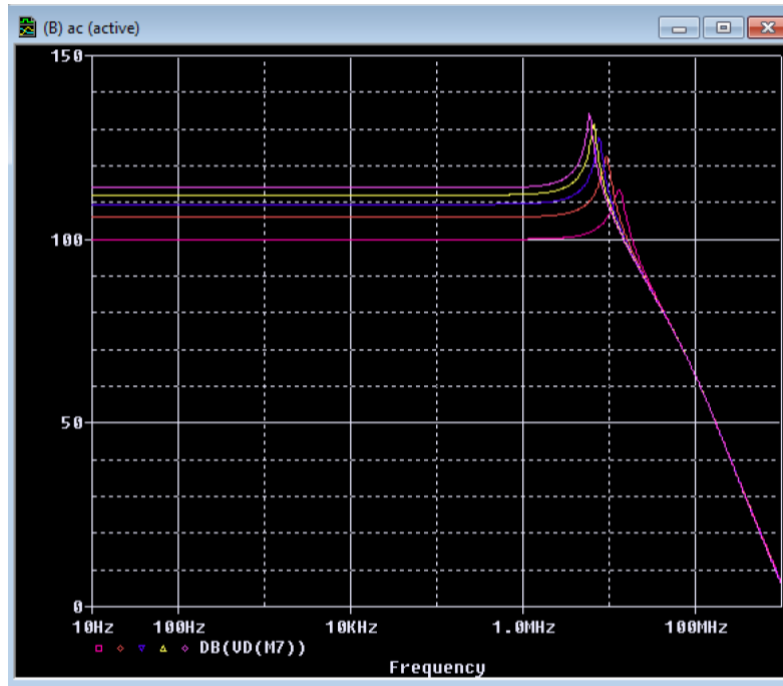


slika 1.1

**Uporediti rezultate simulacija sa onim dobijenim računskim putem. Grafički prikazati transimpedansu kola.**

- Za prethodno analizirano kolo, izvršiti parametarsku AC analizu za opseg frekvencija od 10 Hz do 1 GHz, pri čemu je parametar otpornost  $R_F = \{100 \text{ k}\Omega, 200 \text{ k}\Omega, 300 \text{ k}\Omega, 400 \text{ k}\Omega, 500 \text{ k}\Omega\}$ . Kapacitivnost fotodiode je 150 fF. Kapacitivno opterećenje na izlazu je 3 pF.

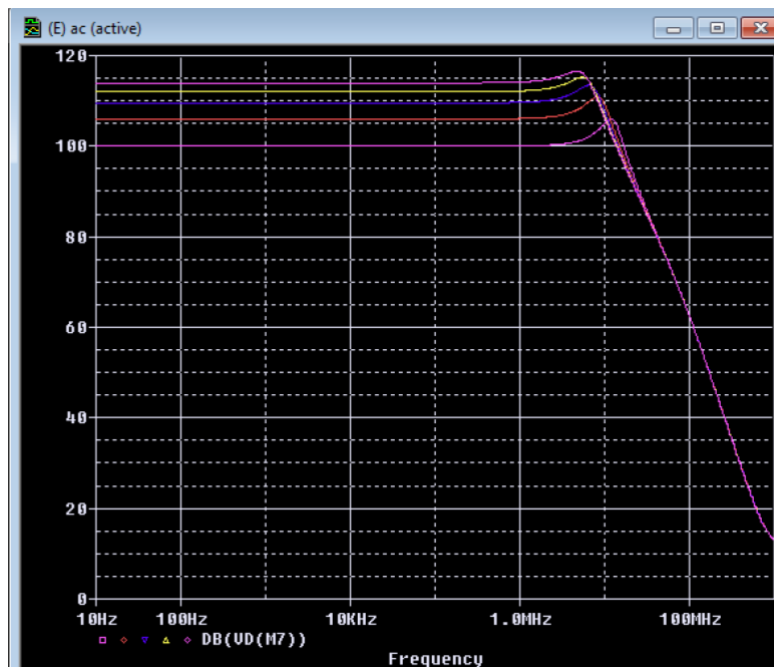
Na slici 1.2 su prikazani rezultati simulacije. Očigledno je frekventni opseg veći za manju vrijednost transimpedanse. Makimum karakteristike je veoma izražen za sve vrijednosti transimpedanse.



slika 1.2

Uporediti rezultate simulacija sa onim dobijenim računskim putem.

- Izvršiti frekventijsku kompenzaciju. Kapacitivnost kompenzacionog kondenzatora je  $C_F = 45 \text{ fF}$ . Ponoviti parametarsku AC analizu za opseg frekvencija od 10 Hz do 1 GHz, pri čemu je parametar otpornost  $R_F = \{100 \text{ k}\Omega, 200 \text{ k}\Omega, 300 \text{ k}\Omega, 400 \text{ k}\Omega, 500 \text{ k}\Omega\}$ .

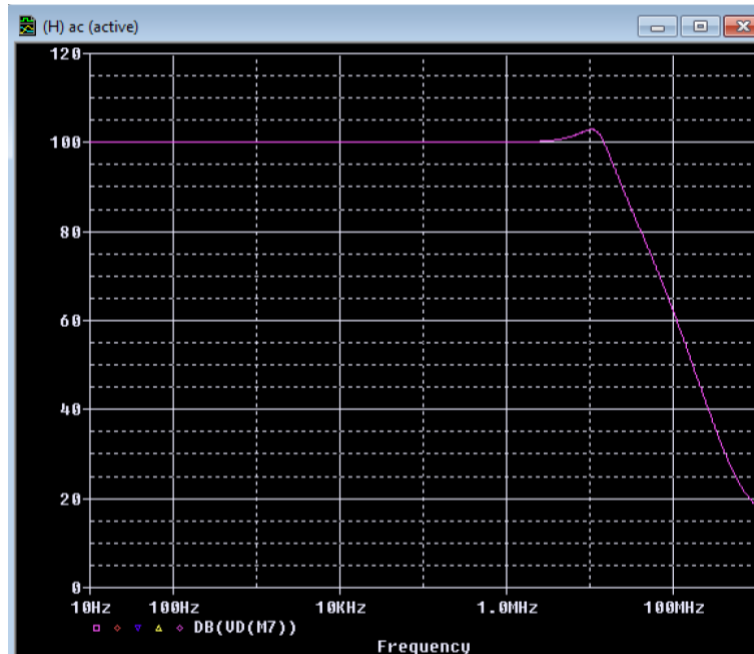


slika 1.3

Na slici 1.3 su prikazani rezultati simulacije. Može se uočiti da je za manju vrijednost transimpedanse potrebna veća vrijednost kompenzacione kapacitivnosti, što je u skladu sa relacijom (1.47).

- Izvršiti frekvencijsku kompenzaciju za vrijednost otpornosti  $R_F = 100 \text{ k}\Omega$ . Ponoviti AC analizu za opseg frekvencija od 10 Hz do 1 GHz. Kapacitivnost kompenzacionog kondenzatora izabrati tako da nivo maksimuma amplitudno-frekventne karakteristike u odnosu na jednosmjernu transimpedansu bude približan kao u slučaju  $R_F = 500 \text{ k}\Omega$ .

Rezultati simulacije za  $C_F = 75 \text{ fF}$  su prikazani na slici 1.4.



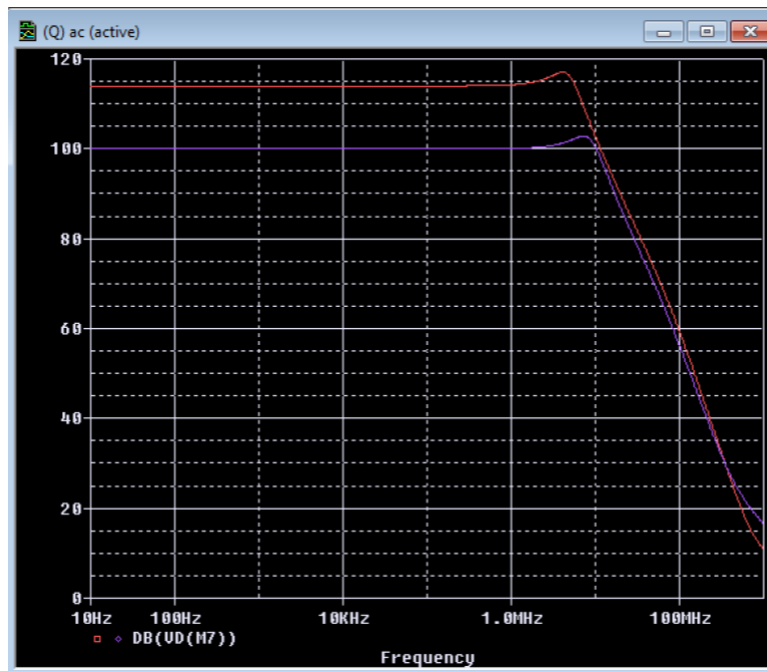
slika 1.4

- Uz pomoć bilateralnog CMOS prekidača obezbijediti promjenljivu transimpedansu optičkog prijemnika. Izvršiti AC analizu za „otvoren prekidač“ ( $R_F = 500 \text{ k}\Omega$ ) i za „zatvoren prekidač“ ( $R_F = 100 \text{ k}\Omega$ ). Dimenzije n-kanalnih MOSFET-ova u sklopu bilateralnog CMOS prekidača su  $(W/L)_n = (15 \text{ }\mu\text{m} / 0.7 \text{ }\mu\text{m})$ , dok su dimenzije p-kanalnih MOSFET-ova u sklopu bilateralnog CMOS prekidača su  $(W/L)_p = (45 \text{ }\mu\text{m} / 0.7 \text{ }\mu\text{m})$ . Voditi računa o pravilnom odabiru kompenzacionih kapacitivnosti.

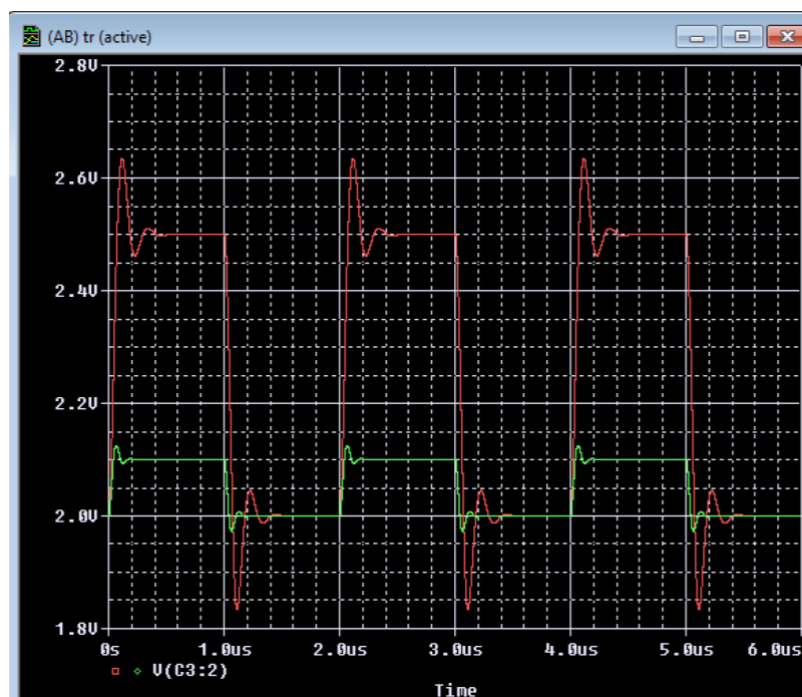
Rezultati simulacije prikazani su na slici 1.5. Može se uočiti da je maksimum amplitudno-frekventne karakteristike za slučaj manje transimpedanse („zatvoren prekidač“) više izražen. Naime, bilateralni CMOS prekidač unosi svoju parazitnu kapacitivnost, pa je potrebno dodatno korigovati kompenzacionu kapacitivnost. Ispostavlja se da ukupna kompenzaciona kapacitivnost za slučaj „zatvoren prekidač“ ( $R_F = 100 \text{ k}\Omega$ ), koja se prekidačem uključuje u kolo, treba da bude 120 fF, kako bi se zadržao isti nivo maksimuma amplitudno-frekventne karakteristike u odnosu na DC transimpedansu.

- Izvršiti parametarsku vremensku analizu za kapacitivno opterećenje na izlazu od 3 pF, pri čemu je parametar kontrolni napon bilateralnog CMOS prekidača  $V_C$  koji ima vrijednosti 0 V i  $V_{DD}$ . Na ulazu kola dovesti kvadratni talasni oblik *peak-to-peak* vrijednosti 1  $\mu\text{A}$  i frekvencije 0.5 MHz.

Na slici 1.6 je prikazan rezultat simulacije. **Povećati 5 puta frekvenciju kvadratnog talasnog oblika na ulazu kola. Objasniti. Uporediti brzinu optičkog prijemnika sa onim analiziranim u okviru prethodnog predavanja.**



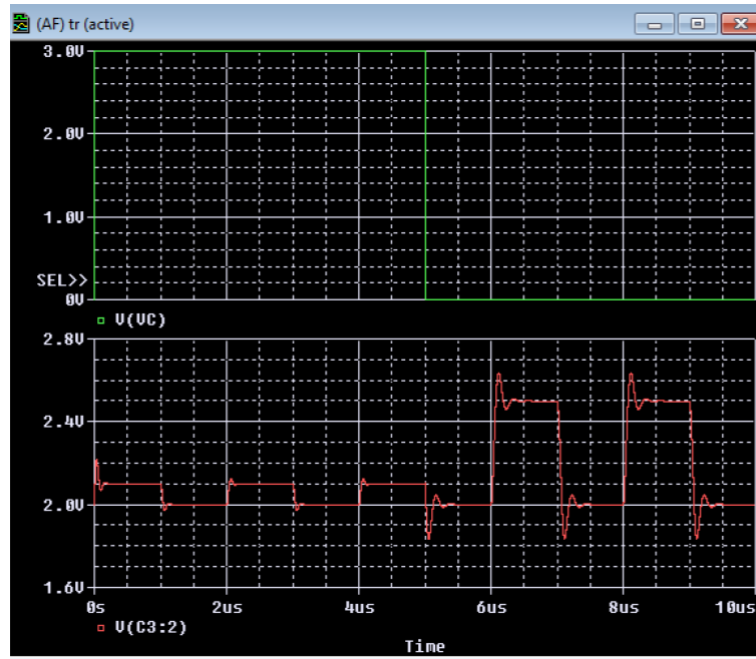
slika 1.5



slika 1.6

- Ponoviti prethodnu analizu u vremenskom domenu, pri čemu je kontrolni napon bilateralnog CMOS prekidača  $V_c$  kvadratni talasni oblik frekvencije 0.1 MHz.

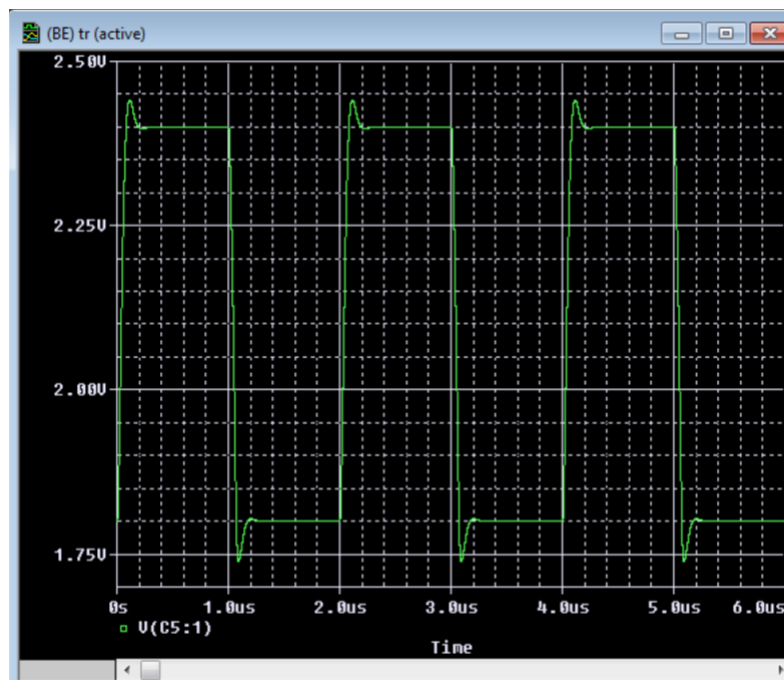
Na slici 1.7 je prikazan rezultat simulacije.



slika 1.7

#### Domaći zadatak (5 poena)

- Modifikovati kolo tako da se za ulaznu struju od 0 do  $1.5 \mu\text{A}$  na izlazu dobija napon približno kao što je prikazano na slici 1.8. Objasniti. Prikazati odgovarajuće simulacione dijagrame u skladu sa prethodnim primjerom.



slika 1.8

- Odgovoriti na pitanja postavljena u okviru nastavnog materijala.