

## Treći domaći zadatak iz Osnova elektronike

Luka Simić, 19/0368

## 1 Postavka

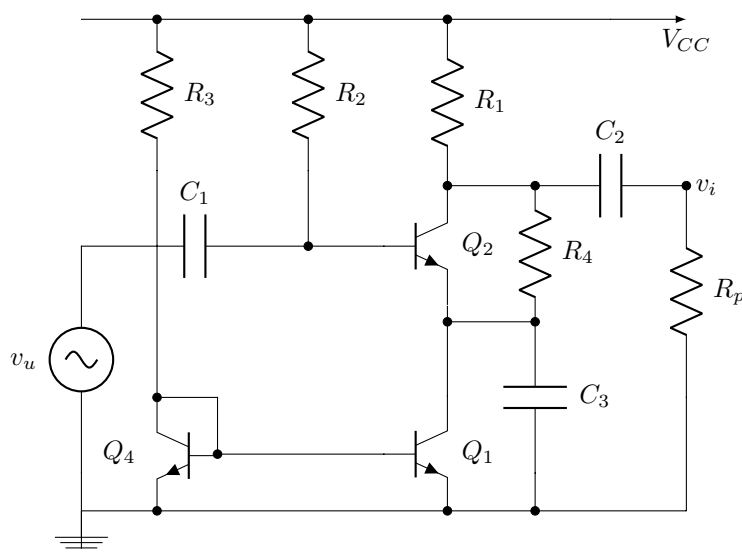
1. Na slici 1, prikazan je pojačavač sa zajedničkim emitorom sa strujnim izvorom za podešavanje mirne radne tačke.

a) Odrediti vrednosti svih otpornika tako da jednosmerni napon kolektora tranzistora  $Q_2$  bude 8V, jednosmerni napon emitora tranzistora  $Q_2$  bude 4V, a jednosmerna struja  $I_{C_2}$  bude 1mA. Rezultat verifikovati simulacijom, a jednosmerne potencijale čvorova i struje tranzistora prikazati slikom dobijenom nakon simulacionog određivanja mirne radne tačke.

b) Odrediti parametre za mali signal  $g_m$  i  $r_\pi$ . Verifikovati rezultat uvidom u izlazni fajl simulatora čiji relevantni deo treba ubaciti u izveštaj.

c) Odrediti vrednosti svih kondenzatora u kolu tako da moduo njihove impedanse na učestanosti od značaja bude bar 100 puta manji od otpornosti u kolu.

d) Odrediti pojačanje za mali signal, ulaznu i izlaznu otpornost. Rezultat verifikovati simulacijom, a relevantne grafike koji dokazuju rezultate ubaciti u izveštaj.

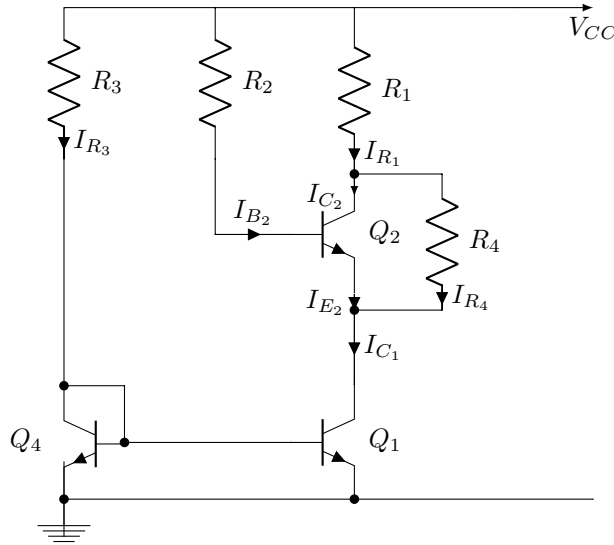


Slika 1: Pojačavač sa zajedničkim emitorom sa strujnim izvorom za podešavanje mirne radne tačke

## 2 Rešenje

### 2.1 Prvi deo

Pošto u prva tri dela zadatka možemo raditi samo u DC režimu, možemo raditi sa ekvivalentnim kolom za DC režim sa slike 2.



Slika 2: Ekvivalentno kolo za DC režim

Po propozicijama zadatka imamo napon kolektora i emitora tranzistora  $Q_2$ , kao i struju kolektora tog tranzistora.

$$V_{C_2} = 8V \quad (1)$$

$$V_{E_2} = 4V \quad (2)$$

$$I_{C_2} = 1mA \quad (3)$$

Na osnovu (1) i (2) možemo izraziti struju kroz otpornike  $R_4$  i  $R_1$ .

$$I_{R_4} = \frac{V_{C_2} - V_{E_2}}{R_4} = \frac{8V - 4V}{4k\Omega} = 1mA \quad (4)$$

$$I_{R_1} = \frac{V_{CC} - V_{C_2}}{R_1} \quad (5)$$

Pošto imamo  $V_{BE} = 0.7V$  kao parametar tehnologije možemo izračunati i napon baze  $Q_2$ .

$$V_{B_2} = V_{E_2} + V_{BE} = 4.7V \quad (6)$$

Pa iz (6) možemo izraziti i struju baze  $Q_2$ .

$$I_{B_2} = \frac{V_{CC} - V_{B_2}}{R_2} \quad (7)$$

Možemo takođe primetiti da se tranzistori  $Q_1$  i  $Q_4$  nalaze u strujnom ogledalu i stoga su im sve struje iste.

$$I_{C_1} = I_{C_4} \quad (8)$$

$$I_{B_1} = I_{B_4} \quad (9)$$

Takođe, možemo primetiti da je napon baza  $Q_1$  i  $Q_4$ , kao i napon kolektora  $Q_4$ , jednak naponu između emitora i baze tranzistora  $Q_4$ , jer je emitor  $Q_4$  uzemljen.

$$V_{B_1} = V_{B_4} = V_{C_4} = V_{BE} \quad (10)$$

Iz (10) možemo izraziti struju kroz otpornik  $R_3$ .

$$I_{R_3} = \frac{V_{CC} - V_{C_4}}{R_3} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_3} \quad (11)$$

Dalje, iz jednačina za struje tranzistora  $Q_2$  možemo dobiti vrednosti struja  $I_{B_2}$  i  $I_{E_2}$ .

$$I_{B_2} = \frac{I_{C_2}}{\beta} = \frac{1mA}{100} = 10\mu A \quad (12)$$

$$I_{E_2} = (\beta + 1)I_{B_2} = \frac{101}{100}1mA = 1.01mA \quad (13)$$

Takođe, iz jednačina za struje tranzistora  $Q_4$ , (9) i (8) možemo izraziti struje baza tranzistora  $Q_1$  i  $Q_4$ .

$$I_{B_1} = I_{B_4} = \frac{I_{C_4}}{\beta} = \frac{I_{C_1}}{100} \quad (14)$$

Iz (3), (4) i Kirhofovog zakona za struje u čvoru iznad kolektora  $Q_2$  dobijamo vrednost struje  $I_{R_1}$ .

$$I_{R_1} = I_{C_2} + I_{R_4} = 2mA \quad (15)$$

Iz (13), (4) i Kirhofovog zakona za struje u čvoru ispod emitera  $Q_2$  dobijamo vrednost struje  $I_{C_1}$ .

$$I_{C_1} = I_{E_2} + I_{R_4} = 1.01mA + 1mA = 2.01mA \quad (16)$$

Iz (8), (16), (14) i Kirhofovog zakona za struje u čvoru iznad kolektora  $Q_4$  dobijamo vrednost struje  $I_{R_3}$ .

$$I_{R_3} = I_{B_1} + I_{B_4} + I_{C_4} = I_{C_1} + \frac{I_{C_1}}{100} + \frac{I_{C_1}}{100} = \frac{102}{100}2.01mA = 2.0502mA \quad (17)$$

Iz (1), (5) i (15) dobijamo otpornost otpornika  $R_1$ .

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_{C_2}}{I_{R_1}} = \frac{12V - 8V}{2mA} = \frac{4V}{2mA}$$

$$\boxed{R_1 = 2k\Omega}$$

Iz (6), (7) i (12) dobijamo otpornost otpornika  $R_2$ .

$$R_2 = \frac{V_{CC} - V_{B_2}}{I_{B_2}} = \frac{12V - 4.7V}{10\mu A} = \frac{7.3V}{10\mu A}$$

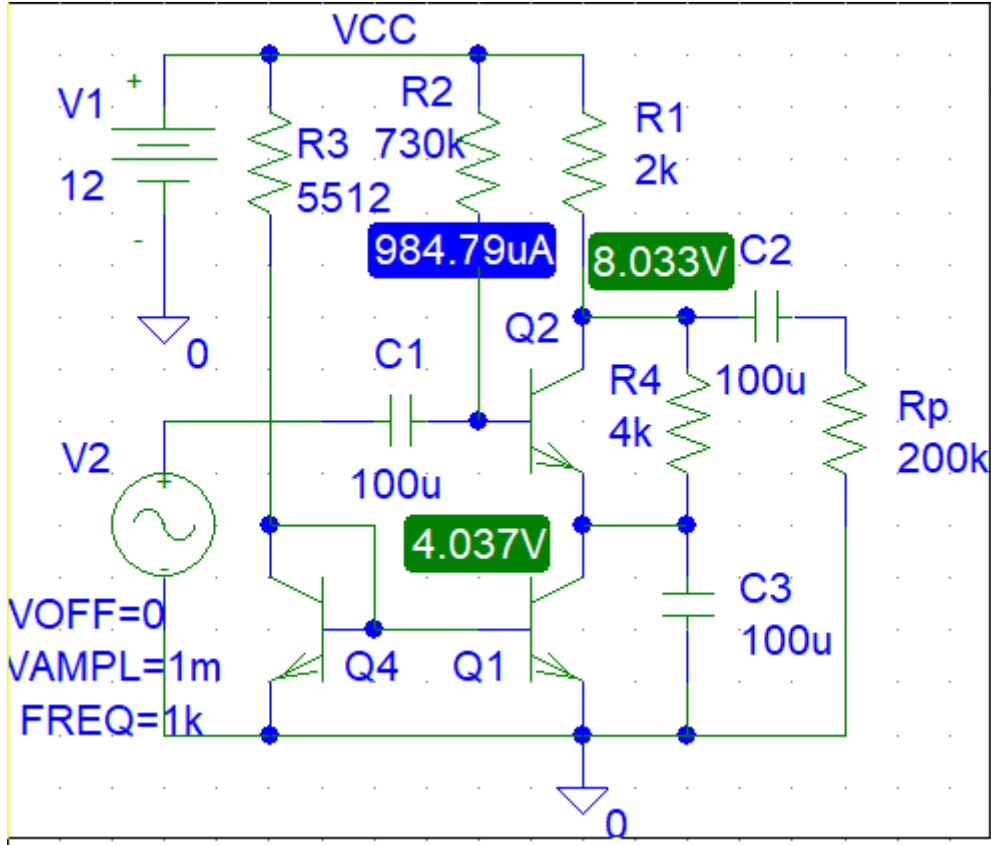
$$\boxed{R_2 = 730k\Omega}$$

Iz (11), (17) dobijamo otpornost otpornika  $R_3$ .

$$R_3 = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_{R_3}} = \frac{12V - 0.7V}{2.0502mA} = \frac{11.3V}{2.0502mA}$$

$$\boxed{R_3 \approx 5.512k\Omega}$$

Simulacijom u *PSpice*-u sa izračunatim otpornostima dobijamo vrednosti DC napona i struja kao sa slike 3 koji su približno jednaki vrednostima u postavci zadatka (sa greškom manjom od 1%).



Slika 3: Rezultat simulacije kola u *PSpice*-u za prvi deo zadatka. Prikazani su naponi  $V_{C_2}$ ,  $V_{E_2}$  i struja  $I_{C_2}$

## 2.2 Drugi deo

Iz (8) i (16) dobijamo parametre za mali signal tranzistora  $Q_1$  i  $Q_4$ .

$$g_{m_1} = g_{m_4} = \frac{I_{C_1}}{V_T} = \frac{2.01mA}{25mV}$$

$$g_{m_1} = g_{m_4} = 80.4mS$$

$$r_{\pi_1} = r_{\pi_4} = \frac{\beta}{g_{m_1}} = \frac{100}{80.4mS}$$

$$r_{\pi_1} = r_{\pi_4} = 1.24378k\Omega$$

Iz (3) dobijamo parametre za mali signal tranzistora  $Q_2$ .

$$g_{m_2} = \frac{I_{C_2}}{V_T} = \frac{1mA}{25mV}$$

$$g_{m_2} = 40mS$$

$$r_{\pi_2} = \frac{\beta}{g_{m_2}} = \frac{100}{40mS}$$

$$r_{\pi_2} = 2.5k\Omega$$

Možemo videti da se i *PSpice* simulacijom dobijaju slične vrednosti za parametre za mali signal na figuri 4.

#### \*\*\*\* BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS

NAME	Q_Q1	Q_Q2	Q_Q4
MODEL	QbreakN	QbreakN	QbreakN
IB	1.99E-05	9.85E-06	1.99E-05
IC	1.99E-03	9.85E-04	1.99E-03
VBE	7.92E-01	7.74E-01	7.92E-01
VBC	-3.25E+00	-3.22E+00	0.00E+00
VCE	4.04E+00	4.00E+00	7.92E-01
BETADC	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
GM	7.71E-02	3.81E-02	7.71E-02
RPI	1.30E+03	2.63E+03	1.30E+03
RX	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
RO	1.00E+12	1.00E+12	9.96E+11
CBE	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CBC	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CJS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
BETAAC	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
CBX/CBX2	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
FT/FT2	1.23E+18	6.06E+17	1.23E+18

Slika 4: Parametri tranzistora za mali signal iz ispisa *PSpice* simulacije. Crvenom bojom označene su relevantne linije koje dokazuju izračunate rezultate.

### 2.3 Treći deo

Učestanost generatora  $v_u$  se može izračunati na osnovu njene frekvencije.

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 1kHz = 6283.18530 \frac{rad}{s} \quad (18)$$

Pošto nam je najmanji otpornik u kolu  $R_{min} = R_1 = 2k\Omega$  dobijamo kapacitivnost kondenzatora modula impedanse 100 puta manjeg od najmanje otpornosti.

$$\frac{R_{min}}{100} = \left| \frac{-j}{\omega C} \right| = \frac{1}{\omega C}$$

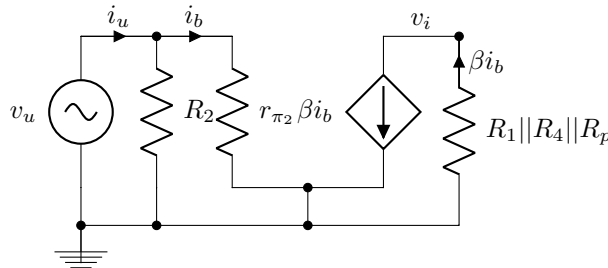
$$C = \frac{100}{\omega R_{min}} = \frac{100}{6283.18530 \frac{rad}{s} \cdot 2k\Omega}$$

$C = 7.9577\mu F$

U daljim simulacijama biće usvojena aproksimacija  $C \approx 100\mu F$ .

### 2.4 Četvrti deo

Kako bismo računski dobili rezultat možemo raditi sa ekvivalentnim kolom za male signale kao na slici 5. Kako se strujno ogledalo može ekvivalentirati nezavisnim strujnim generatorom u DC režimu, može se u potpunosti isključiti iz kola za male signale.



Slika 5: Ekvivalentno kolo za male signale

Struja baze jednaka je struji kroz otpornik  $r_{\pi_2}$ .

$$i_b = \frac{v_u}{r_{\pi_2}} \quad (19)$$

Izlazni napon  $v_i$  je stoga jednak padu napona na paralelnoj vezi otpornika  $R_1$ ,  $R_4$  i  $R_p$ , pa zavisnost  $v_u$  od  $v_i$  možemo da dobijemo iz (19).

$$v_i = -\beta i_b (R_1 || R_4 || R_p) = -\beta \frac{v_u}{r_{\pi_2}} (R_1 || R_4 || R_p) \quad (20)$$

Iz (20) dobijamo da nam je naponsko pojačanje za male signale:

$$A_v = -\beta \frac{R_1 || R_4 || R_p}{r_{\pi_2}} = -100 \frac{2k\Omega || 4k\Omega || 200k\Omega}{2.5k\Omega}$$

$$\boxed{A_v = -52.9801}$$

Ulaznu struju možemo izračunati kao struju kroz paralelnu vezu otpornika  $R_2$  i  $r_{\pi_2}$  do uzemljenja.

$$i_u = \frac{v_u}{R_2 || r_{\pi_2}} \quad (21)$$

Izlaznu struju možemo izračunati kao struju kroz otpornik  $R_p$  do uzemljenja.

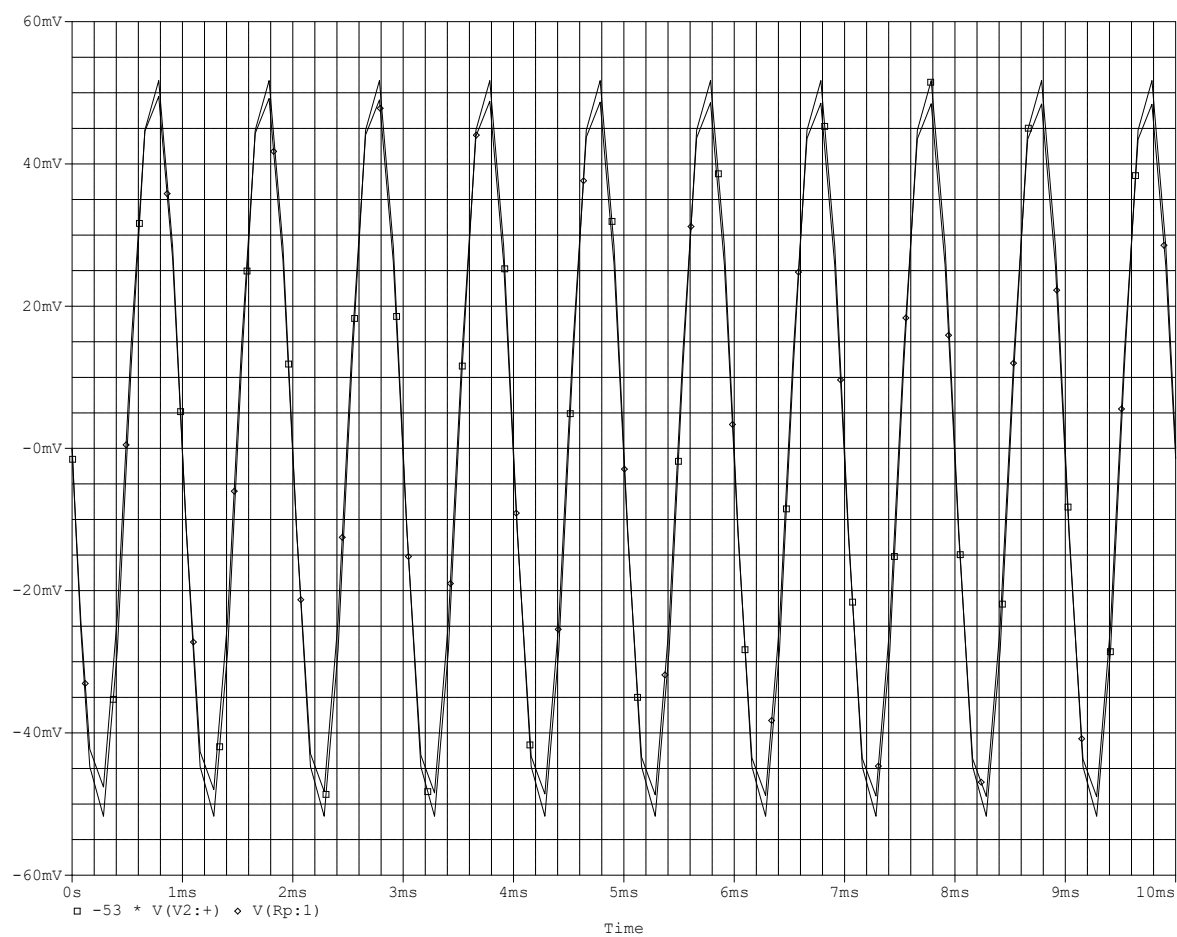
$$i_i = \frac{v_i}{R_p} \quad (22)$$

Iz (21) i (22) dobijamo da nam je strujno pojačanje za male signale:

$$A_i = \frac{i_i}{i_u} = \frac{\frac{v_i}{R_p}}{\frac{v_u}{R_2 || r_{\pi_2}}} = \frac{-52.9801 v_u (730k\Omega || 2.5k\Omega)}{v_u \cdot 200k\Omega}$$

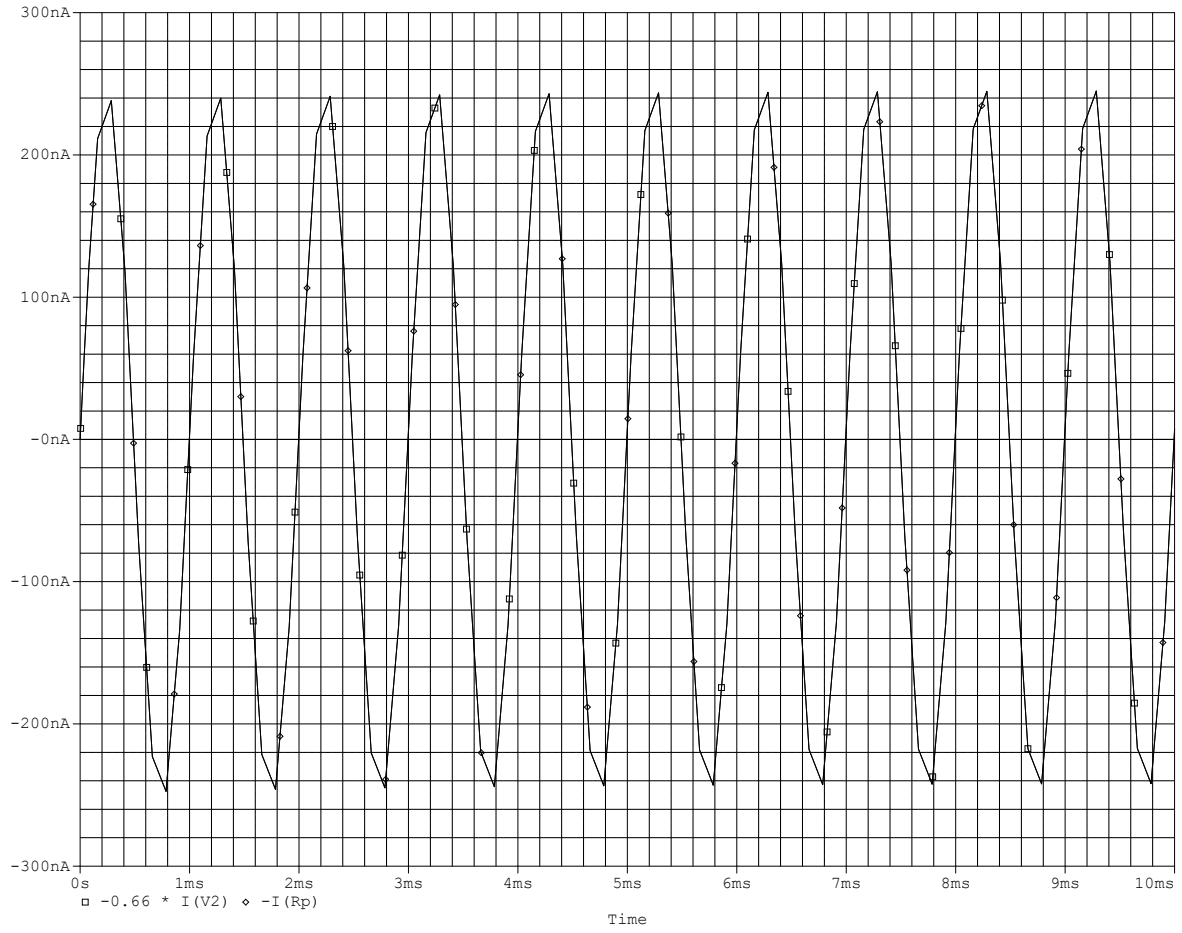
$$\boxed{A_i \approx -0.66}$$

Ove rezultate potvrđuje poklapanje grafika ulaznog i izlaznog napona (odnosno struje) *PSpice* simulacije na slikama 6 i 7 kada se ulazna strana pomnoži sa izračunatim pojačanjem.



Slika 6: Grafik za verifikaciju naponskog pojačanja





Slika 7: Grafik za verifikaciju strujnog pojačanja

Na osnovu (21) takođe dobijamo ulaznu otpornost.

$$r_u = R_2 || r_{\pi_2}$$

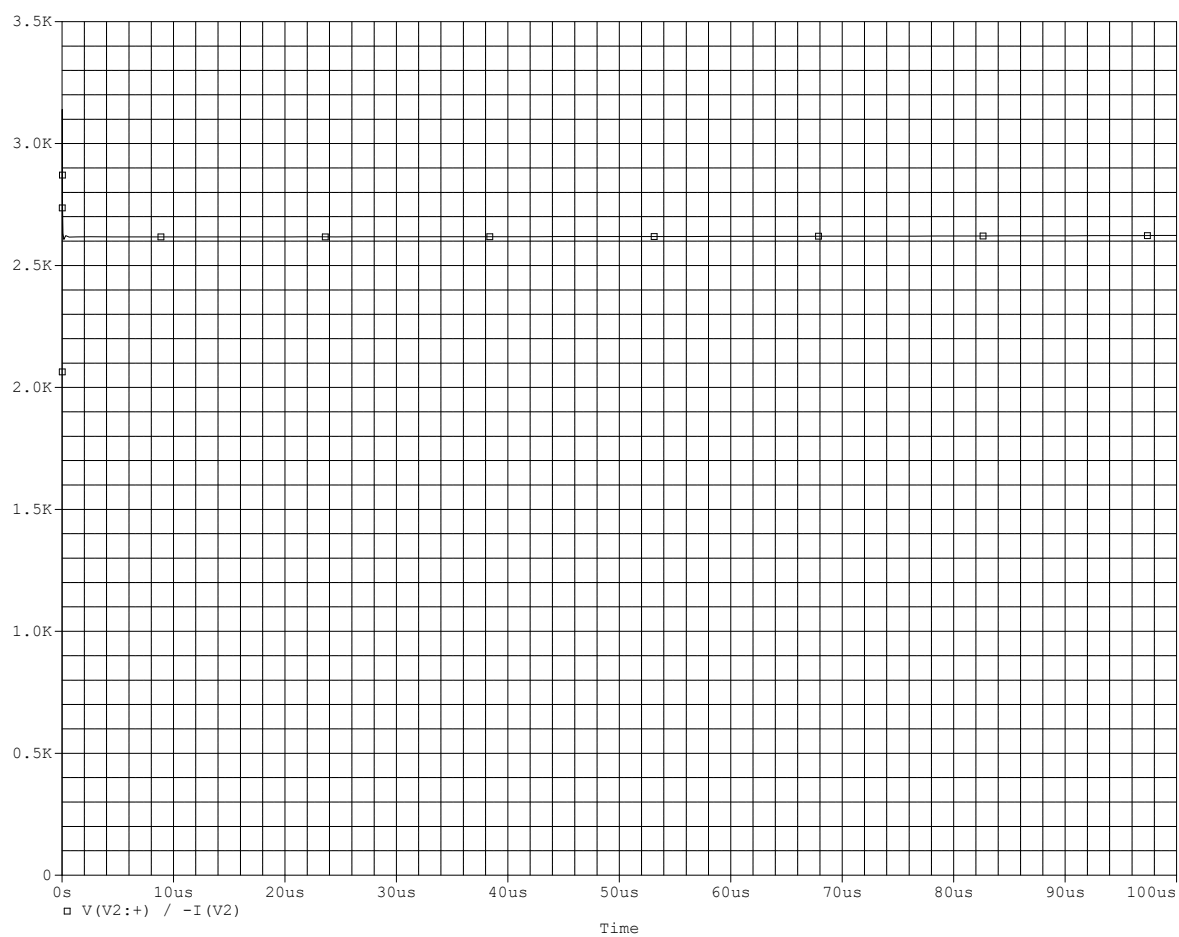
$$r_u \approx 2.5k\Omega$$

Kada otpornik  $R_p$  zamenimo naponskim generatorom i ukinemo generator  $v_u$ , zavisni strujni generator nam postaje otvorena veza, pa je izlazna otpornost jednaka:

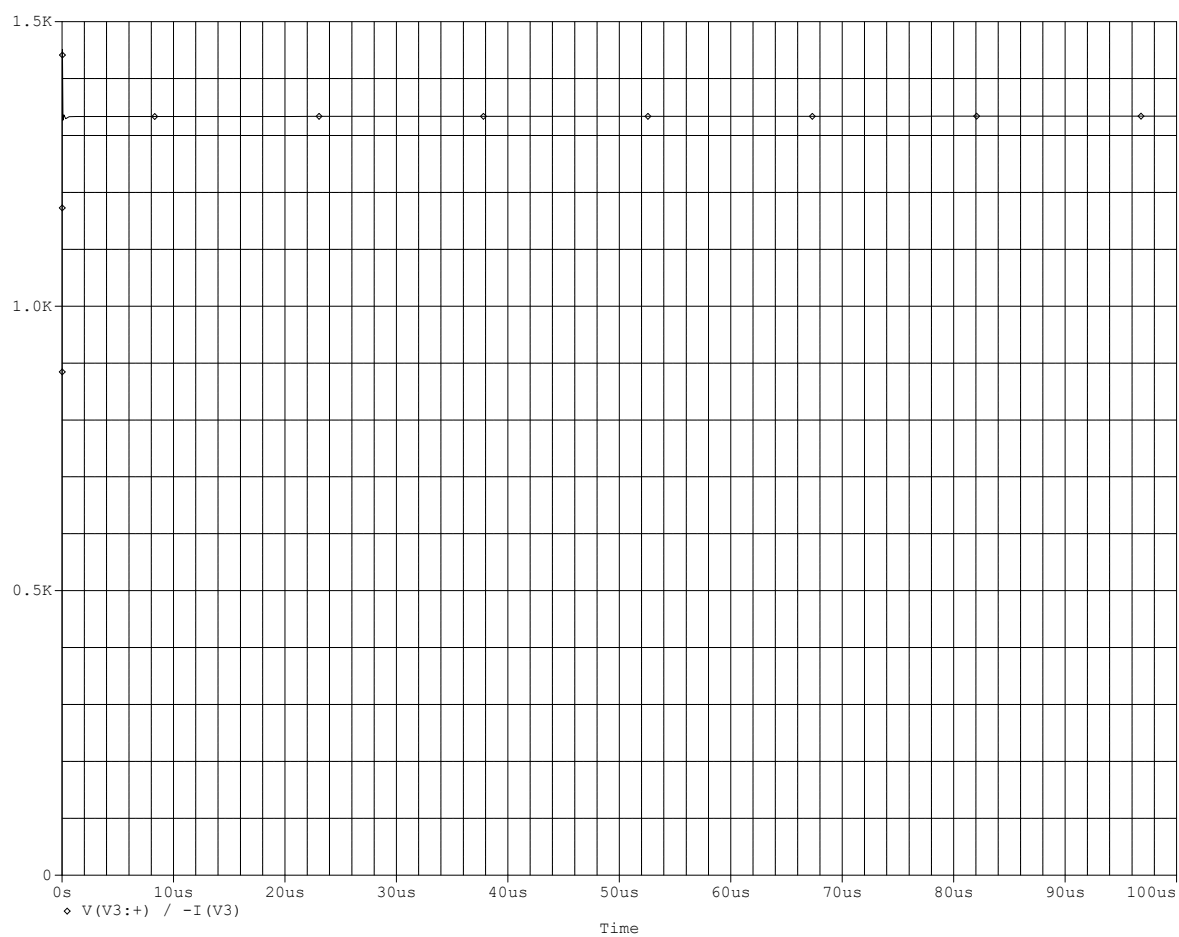
$$r_i = R_1 || R_4 = 2k\Omega || 4k\Omega$$

$$r_i \approx 1.33k\Omega$$

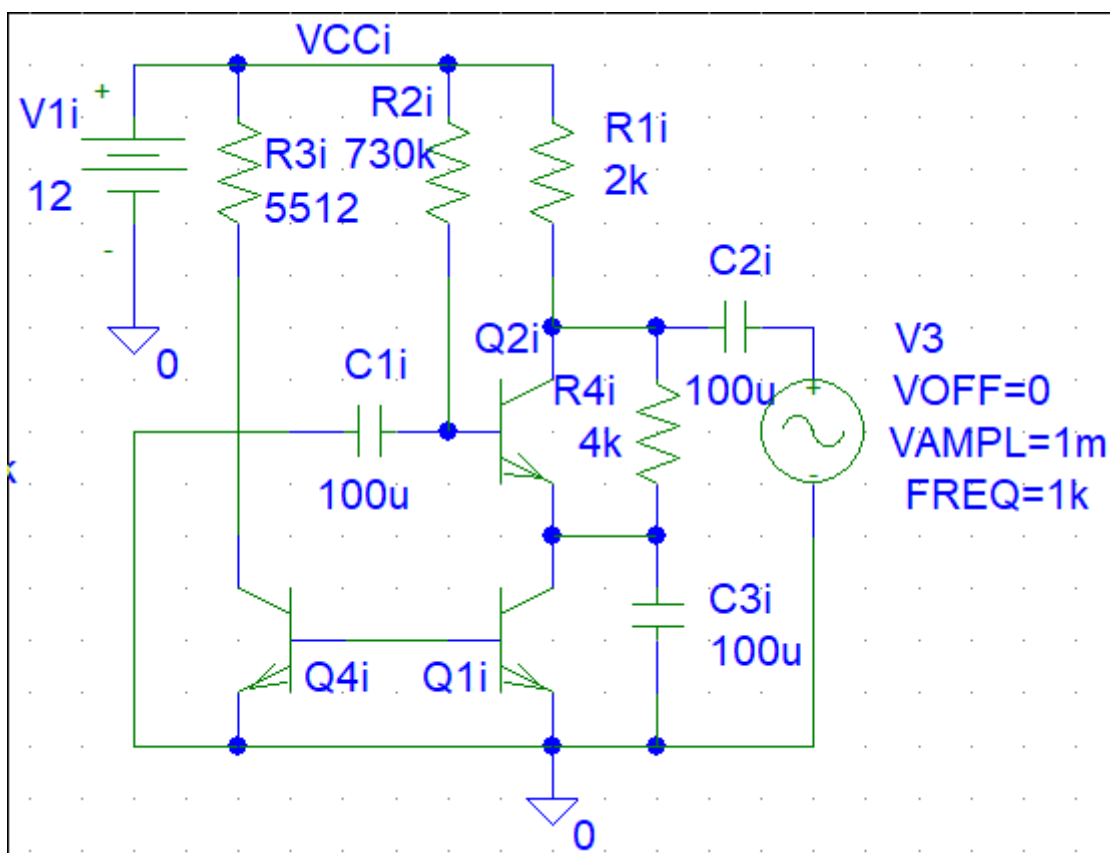
Ove rezultate potvrđuju grafici dobijeni *PSpice* simulacijom nad kolom sa slike 10 sa slika 9 i 8. Kako količnik napona i struje test generatora nema smisla kada je struja test generatora nula, simulacija nije rađena na dužem vremenu kako se ne bi poklopila sa takvim tačkama.



Slika 8: Grafik za verifikaciju ulazne otpornosti



Slika 9: Grafik za verifikaciju izlazne otpornosti



Slika 10: Kolo za verifikaciju izlazne otpornosti