



**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET U BEOGRADU**  
**KATEDRA ZA ELEKTRONIKU**

**OSNOVI ANALOGNE ELEKTRONIKE ZA IR**  
**LABORATORIJSKE VEŽBE**

***VEŽBA BROJ 5***  
***DIFERENCIJALNI POJAČAVAČ***  
*Autor: Radivoje Đurić*

	<b>IME I PREZIME</b>	<b>BR. INDEKSA</b>	<b>GRUPA</b>	<b>OCENA</b>
<b>1.</b>				
<b>2.</b>				

**DATUM** \_\_\_\_\_

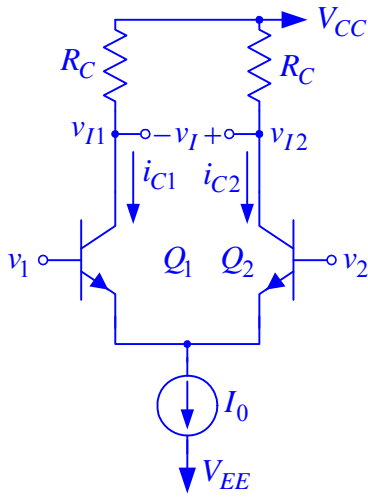
**VREME** \_\_\_\_\_

**DEŽURNI U LABORATORIJI** \_\_\_\_\_

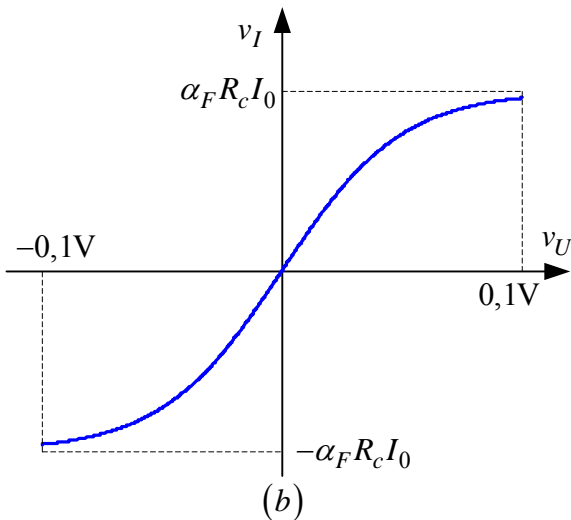
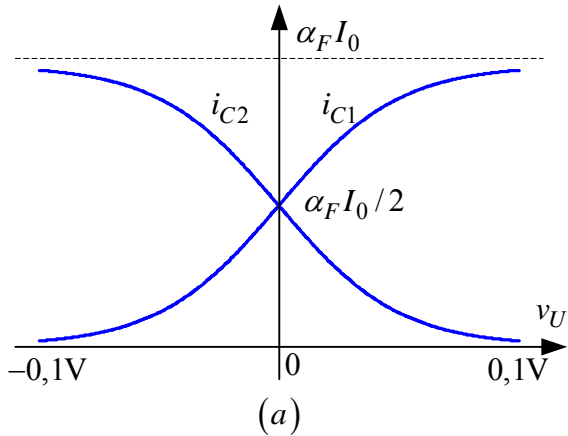
## DIFERENCIJALNI POJAČAVAČ

### DIFERENCIJALNI POJAČAVAČ SA BIPOLARNIM TRANZISTORIMA

#### 1. TEORIJSKA OSNOVA



Slika 5.1 Diferencijalni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima.



Slika 5.2 (a) Zavisnost kolektorskih struja i (b) izlaznog napona od razlike ulaznih napona.

Na slici 5.1 prikazan je diferencijalni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima. Smatra se da su tranzistori uparenih karakteristika ( $I_{S1} = I_{S2} = I_S, \alpha_{F1} = \alpha_{F2} = \alpha_F$ ). Tranzistori rade u direktnom aktivnom režimu, pa je:

$$i_{C1} = I_{S1} e^{v_{BE1}/V_T} = I_S e^{v_{BE1}/V_T} \Rightarrow i_{E1} = \frac{i_{C1}}{\alpha_F} = \frac{I_S}{\alpha_F} e^{v_{BE1}/V_T},$$

$$i_{C2} = I_{S2} e^{v_{BE2}/V_T} = I_S e^{v_{BE2}/V_T} \Rightarrow i_{E2} = \frac{i_{C2}}{\alpha_F} = \frac{I_S}{\alpha_F} e^{v_{BE2}/V_T} \Rightarrow$$

$$\frac{i_{E1}}{i_{E2}} = e^{(v_{BE1} - v_{BE2})/V_T}, \quad V_T = kT/q.$$

Prema Kirhofovim zakonima je:

$$v_1 - v_2 = v_U = v_{BE1} - v_{BE2} \Rightarrow \frac{i_{E1}}{i_{E2}} = e^{v_U/V_T} \quad \text{i} \quad i_{E1} + i_{E2} = I_0 \Rightarrow$$

$$i_{E1} + i_{E1} e^{-v_U/V_T} = I_0 \quad \text{i} \quad i_{E2} e^{v_U/V_T} + i_{E2} = I_0 \Rightarrow$$

$$i_{E1} = \frac{I_0}{1 + e^{-v_U/V_T}} \quad \text{i} \quad i_{E2} = \frac{I_0}{1 + e^{v_U/V_T}} \Rightarrow$$

$$i_{C1} = \alpha_F i_{E1} = \frac{\alpha_F I_0}{1 + e^{-v_U/V_T}} \quad \text{i}$$

$$i_{C2} = \alpha_F i_{E2} = \frac{\alpha_F I_0}{1 + e^{v_U/V_T}}.$$

U mirnoj radnoj tački je

$$v_U = v_1 - v_2 = 0 \Rightarrow$$

$$i_{C1} = I_{C1} = I_{C2} = \frac{\alpha_F I_0}{2} \approx \frac{I_0}{2}, \quad \alpha_F = \frac{\beta_F}{1 + \beta_F} \approx 1.$$

Na slici 5.2a prikazane su zavisnosti kolektorskih struja  $i_{C1}$  i  $i_{C2}$  u funkciji ulaznog napona  $v_U$ ,  $i_{C1} = i_{C1}(v_U)$  i  $i_{C2} = i_{C2}(v_U)$ .

Diferencijalni izlazni napon je:

$$v_I = v_{I2} - v_{I1} = V_{CC} - R_C i_{C2} - (V_{CC} - R_C i_{C1}) \Rightarrow$$

$$v_I = R_C (i_{C1} - i_{C2}) = R_C \alpha_F (i_{E1} - i_{E2}) \Rightarrow$$

$$v_I = R_C \alpha_F (i_{E1} - i_{E2}) = R_C \alpha_F i_{E1} (1 - i_{E2}/i_{E1})$$

$$\Rightarrow v_I = R_C \alpha_F I_0 \frac{1 - e^{-v_U/V_T}}{1 + e^{-v_U/V_T}}.$$

Koristeći identitet:

$$\frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} = \frac{e^{(x/2)} - e^{-(x/2)}}{e^{(x/2)} + e^{-(x/2)}} = th(x/2),$$

$$x = v_U/V_T,$$

izlazni napon dobija oblik:

$$v_I = R_C \alpha_F I_0 \operatorname{th} \left( \frac{v_U}{2V_T} \right).$$

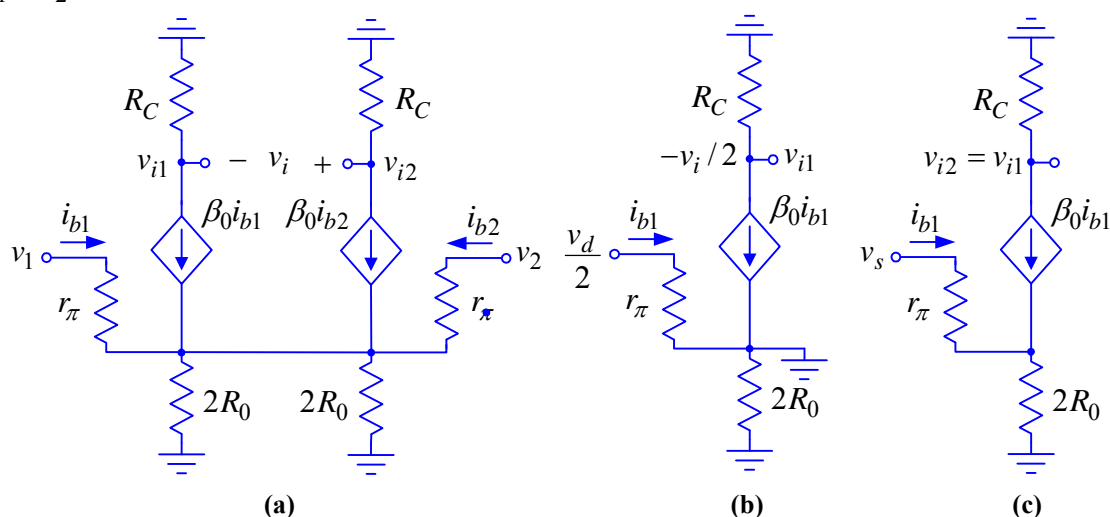
Na slici 5.2b prikazana je zavisnost diferencijalnog izlaznog napona od razlike ulaznih napona  $v_I = v_I(v_U)$ . U okolini mirne radne tačke ova karakteristika dobro se aproksimira linearnom karakteristikom:

$$v_I|_{v_U \rightarrow 0} \rightarrow \frac{R_C \alpha_F I_0}{2V_T} v_U \Rightarrow v_I|_{v_U \rightarrow 0} \rightarrow g_{m0} v_U,$$

gde je  $g_{m0}$  transkonduktansa tranzistora u okolini mirne radne tačke:

$$g_{m0} = \frac{I_{C1,2}}{V_T} = \frac{\alpha_F I_{E1,2}}{V_T} = \frac{\alpha_F I_0}{2V_T}.$$

Na slici 5.3a prikazana je šema za male signale diferencijalnog pojačavača. Unutrašnja otpornost strujnog izvora je  $R_0$ . Pošto je kolo osno simetrično, može se primeniti bisekciona teorema. Na slici 5.3b prikazana je uprošćena šema za male signale kada je na ulazu diferencijalna pobuda, dok je na slici 5.3c prikazana šema za male signale pri pobudi naponom srednje vrednosti  $v_s = v_1 = v_2$ .



Slika 5.3 Šema za male signale (a) diferencijalnog pojačavača, (b) pri diferencijalnoj pobudi i (c) pri pobudi naponom srednje vrednosti.

Prema slici 5.3b dobija se da je diferencijalno pojačanje pojačavača kada se izlaz uzima sa jednog kolektora

$$a_{d1} = \frac{v_{i1}}{v_d} = -\frac{1}{2} \frac{\beta_0}{r_\pi} R_C = -\frac{1}{2} g_m R_C, \quad a_{d2} = \frac{v_{i2}}{v_d} = \frac{1}{2} g_m R_C, \quad g_m = \frac{I_{C1,2}}{V_T} = \frac{I_0}{2V_T}.$$

Naponsko pojačanje do diferencijalnog izlaza dvostruko je veće

$$a_d = \frac{v_i}{v_d} = \frac{v_{i2} - v_{i1}}{v_d} = g_m R_C.$$

Prema slici 5.3c pojačanje napona srednje vrednosti je

$$a_{s1} = a_{s2} = \frac{v_{i1}}{v_s} = \frac{\beta_0 R_C}{r_\pi + (1 + \beta_0) 2R_0} \Rightarrow a_s = \frac{v_i}{v_s} = \frac{v_{i1} - v_{i2}}{v_s} = 0.$$

Faktori potiskivanja napona srednje vrednosti su

$$\rho_1 = \frac{a_{d1}}{a_{s1}} = -\frac{\frac{1}{2} \frac{\beta_0}{r_\pi} R_C}{\frac{\beta_0 R_C}{r_\pi + (1 + \beta_0) 2R_0}} = \frac{r_\pi + (1 + \beta_0) 2R_0}{2r_\pi} \approx \frac{\beta_0}{r_\pi} R_0 = g_m R_0 \quad \text{i} \quad \rho = \frac{a_d}{a_s} = 0.$$

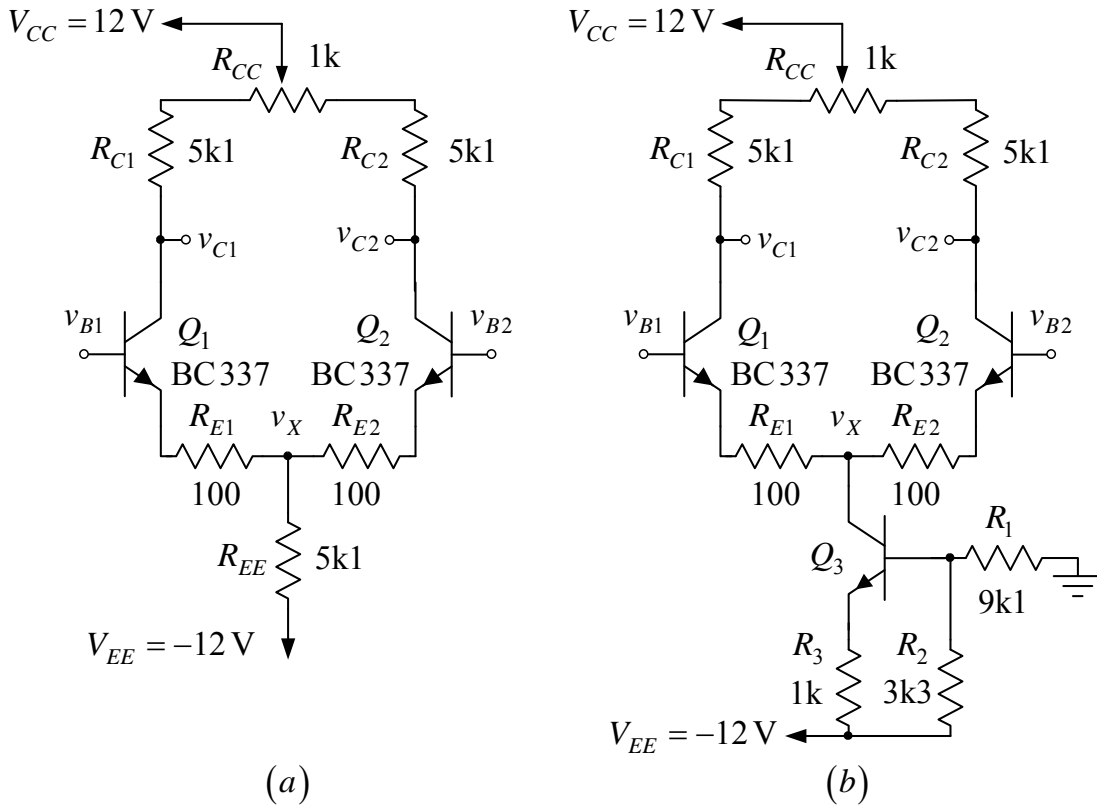
## 2. OPIS VEŽBE

Koriste se šeme pojačavača prikazane na slici 5.4a i 5.4b. Otpornici u emitorima diferencijalnog para ubačeni su radi povećanja linearnosti diferencijalnog pojačavača. Pojačavač se napaja iz dve baterije za napajanje  $V_{CC} = 12\text{ V}$  i  $V_{EE} = -12\text{ V}$ , koje treba priključiti na maketu.

Na ulaz pojačavača dovodi se prostoperiodični napon iz signal generatora.

Merenje jednosmernih i promenljivih napona obavlja se pomoću osciloskopa.

Balansiranje pojačavača (podešavanje napona na kolektorima na istu vrednost) obavlja se pomoću potenciometra  $R_{CC}$ .



Slika 5.4 (a) Diferencijalni pojačavač sa otpornikom ( $R_{EE}$ ) i (b) strujnim izvorom u emitorima.

### Pribor, instrumenti i materijal

- maketa DIFERENCIJALNI POJAČAVAČ
- dva izvora za napajanje od 12V i -12V
- signal generator
- osciloskop

### 3. ZADATAK

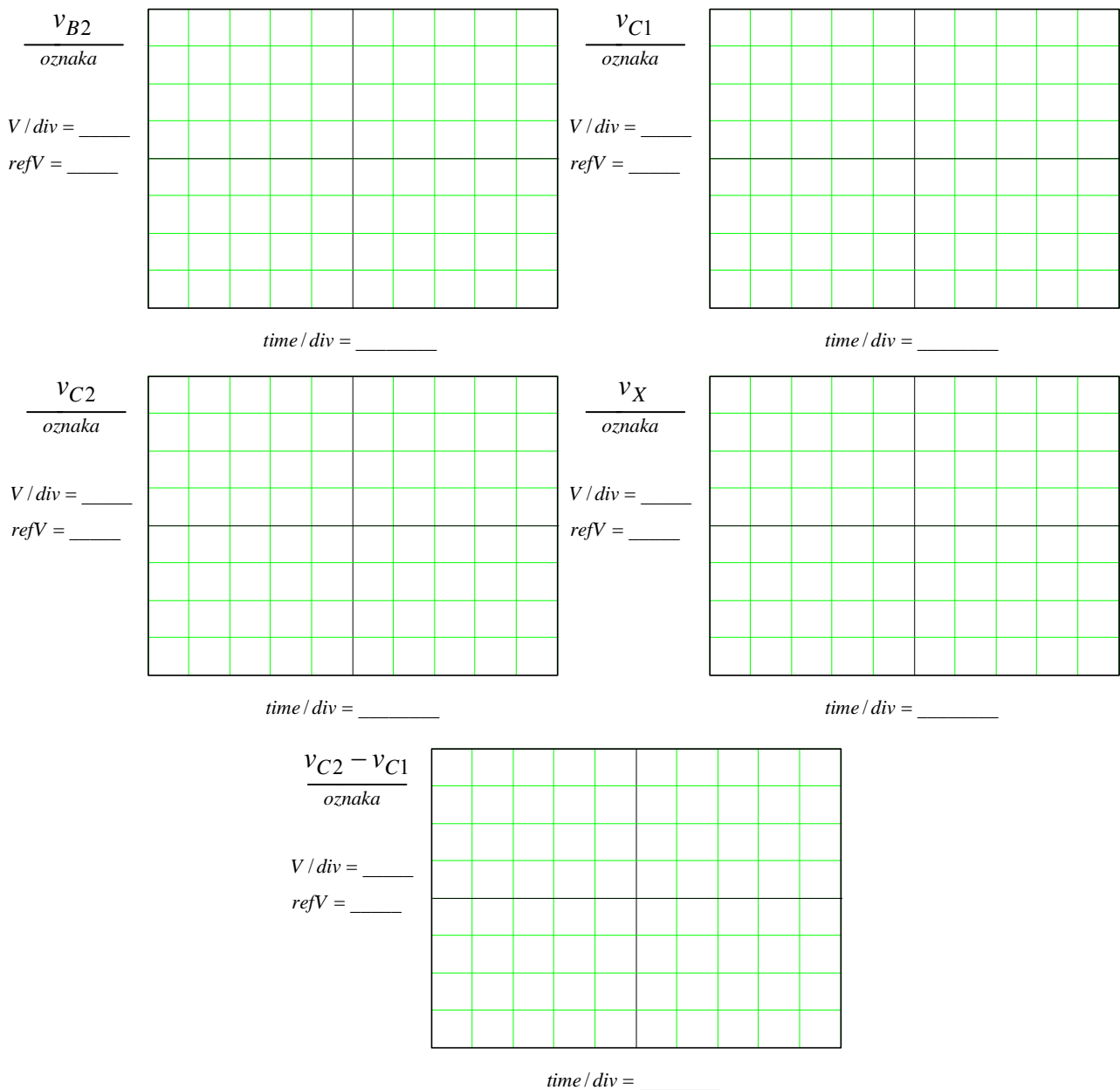
1. Spojiti elemente na maketi prema šemi pojačavača sa slike 5.4a. Ulaze pojačavača, baze tranzistora  $Q_1$  i  $Q_2$ , spojiti na masu. Ovo se postiže postavljanjem džampera tako da su spojeni sledeći priključci: SW1 (2-3); SW2 (2-3). Otpornik  $R_{EE}$  postavlja se stavljanjem džampera na prekidaču SW3 tako da su spojeni priključci 1 i 2.
2. Priključiti baterije za napajanje  $V_{CC}=12\text{ V}$  i  $V_{EE}=-12\text{ V}$  na maketu. Zajednički priključak za obe baterije dovodi se na buksnu sa oznakom GND.
3. Podesiti osciloskop da meri jednosmerne (DC) napone. Potom ga priključiti u kolo da meri napone na kolektorima, a zatim uključiti izvor za napajanje.

Laboratorijske vežbe iz osnova analogne elektronike za IR

- Potencijometrom RCC podesiti da vrednosti napona na kolektorima u mirnoj radnoj tački budu međusobno jednake.
- Izmeriti jednosmerne napone na kolektorima (koristiti opcije **MEASURE** i **TYPE MEAN**)

$$V_{C1,2} = \text{_____} [\text{V}].$$

- Na ulaz 2 pojačavača iz signal generatora dovesti prostoperiodični napon amplitude  $V_m = 50\text{mV}$  i učestanosti  $f = 1\text{kHz}$ , dok je ulaz 1 i dalje na masi. Za ovo je potrebno da su džamperi u sledećim položajima: SW1 (2-3); SW2 (1-2).
- Na grafike prikazane na slici 5.5 ucrtati vremenske dijagrame napona na bazi tranzistora Q2, napona na kolektorima i napona VX u toku jedne periode ulaznog napona. Prvi kanal osciloskopa postaviti na bazu tranzistora Q2, a drugim kanalom meriti ostale napone. Podatke o srednjim vrednostima napona upisati u polje  $refV$ . Podesiti osciloskop za AC merenja i odrediti amplitude promenljivih komponenti napona. Obratiti pažnju na fazne stavove pojedinih napona.

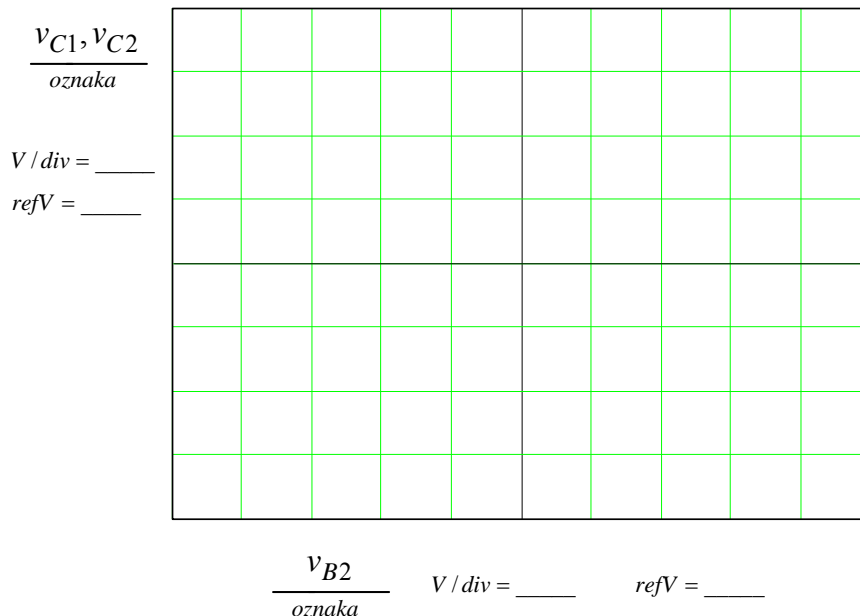


Slika 5.5 Eksperimentalno određeni vremenski oblici napona u karakterističnim tačkama diferencijalnog pojačavača.

8. Na osnovu prethodnih merenja odrediti diferencijalno pojačanje pojačavača

$$a_d = (V_{c1m} - V_{c2m}) / V_{b2m} = \underline{\hspace{2cm}} .$$

9. Snimanje karakteristike prenosa  $v_{C1} = v_{C1}(v_g)$  i  $v_{C2} = v_{C2}(v_g)$ . Na ulaz 2 pojačavača dovesti prostoperiodični napon čija je učestanost  $f = 1\text{kHz}$  i amplituda  $V_m = 1\text{V}$ , dok je ulaz 1 i dalje na masi. Prvi kanal osciloskopa priključiti na bazu tranzistora Q2, a drugim meriti napon na jednom kolektoru. Postaviti tastere na osciloskopu za X-Y merenja, a zatim sliku sa osciloskopa precrtati na grafik prikazan na slici 5.6. Na isti grafik ucrtati i grafik dobijen merenjem napona na drugom kolektoru.



Slika 5.6 Eksperimentalno određene zavisnosti  $v_{C1}(v_{B2})$  i  $v_{C2}(v_{B2})$ .

10. Na osnovu prethodnog merenja odrediti pri kojoj vrednosti ulaznog napona i napona na kolektorima tranzistori izlaze iz direktnog aktivnog režima

$$v_{B2\text{max}} = \underline{\hspace{1cm}} [\text{mV}], v_{C1\text{min}} = \underline{\hspace{1cm}} [\text{V}], v_{C1\text{max}} = \underline{\hspace{1cm}} [\text{V}], v_{C2\text{min}} = \underline{\hspace{1cm}} [\text{V}] \text{ i } v_{C2\text{max}} = \underline{\hspace{1cm}} [\text{V}].$$

11. Na osnovu grafika sa slike 5.6 odrediti pojačanje pojačavača u okolini mirne radne tačke

$$a_1 = dv_{C1} / dv_{B2} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ i } a_2 = dv_{C2} / dv_{B2} = \underline{\hspace{2cm}} .$$

12. Postaviti osciloskop za snimanje vremenskih dijagrama (DISPLAY YT).

13. Na ulaz pojačavača sa oznakom 2 iz signal generatora dovesti prostoperiodični napon amplitude  $V_m = 20\text{mV}$  i učestanosti  $f = 1\text{kHz}$ , dok je drugi ulaz i dalje na masi. Odrediti amplitudu napona na kolektoru tranzistora Q2 i diferencijalno pojačanje pojačavača

$$V_{c2m} = \underline{\hspace{1cm}} [\text{mV}] \text{ i } a_{d1R} = \frac{V_{c2m}}{V_{b2m}} = \underline{\hspace{2cm}} .$$

14. Pritiskom na taster Output odvojiti pobudni generator od kola i isključiti izvor za napajanje.

15. Izračunati struju strujnog izvora sa slike 5.4b. Smatrati da se bazna struja može zanemariti i da je  $V_{BE} = 0,65\text{V}$ .

16. Umesto otpornika u emitoru priključiti strujni izvor kao na slici 5.4b. Ovo se postiže promenom položaja kratkospojnika na prekidaču SW3 tako da priključci 2 i 3 budu kratkospojeni. U prekidačima SW1 i SW2 postaviti kratkospojnike tako da su obe baze diferencijalnog para na masi (SW1 (2-3) i SW2 (2-3)). Osciloskopom izmeriti napone na kolektorima i, ukoliko je potrebno, potenciometrom podesiti da njihove jednosmerne vrednosti budu jednake.

17. Potom ponoviti istu proceduru kao u tački 13

$$V_{c2m} = \text{_____} [\text{mV}] \text{ i } a_{d1I} = \frac{V_{c2m}}{V_{b2m}} = \text{_____} .$$

18. Da li se razlikuju diferencijalna pojačanja iz tačaka 13 i 17? Ukratko objasniti razlog.

---



---



---

19. Pritiskom na taster Output odvojiti pobudni generator i isključiti izvor za napajanje. Potom baze ulaznih tranzistora kratkospojiti i povezati sa pobudnim generatorom (SW1 (1-2) SW2 (1-2)).

20. Uključiti izvor za napajanje i ukoliko je potrebno potenciometrom podesiti da jednosmerni naponi na kolektorima diferencijalnog para budu jednaki. Zatim iz signal generatora dovesti prostoperiodični napon amplitude  $V_m = 1\text{ V}$  i učestanosti  $f = 1\text{ kHz}$ . Odrediti amplitudu napona na kolektoru tranzistora i pojačanje napona srednje vrednosti

$$V_{c2m} = \text{_____} [\text{mV}] \text{ i } a_{s1I} = \frac{V_{c2m}}{V_{b1,2m}} = \text{_____} .$$

21. Pritiskom na taster Output odvojiti pobudni generator i isključiti izvor za napajanje Umesto strujnog izvora vratiti otpornik u emitor (SW3 (1-2)). Ulazi pojačavača ostaju kratkospojeni sa pobudnim generatorom, kao u prethodnoj tački. I napon na izlazu signal generatora ostaje kao u prethodnoj tački ( $V_m = 1\text{ V}$ ,  $f = 1\text{ kHz}$ ).

22. Uključiti izvor za napajanje i ukoliko je potrebno potenciometrom podesiti da jednosmerne vrednosti napona na kolektorima budu iste. Pritiskom na taster Output odrediti amplitudu napona na kolektoru tranzistora Q2 i pojačanje napona srednje vrednosti

$$V_{c2m} = \text{_____} [\text{mV}] \text{ i } a_{s1R} = \frac{V_{c2m}}{V_{b1,2m}} = \text{_____} .$$

23. Isključiti izvor za napajanje i signal generator.

24. Da li se razlikuju pojačanja iz tačaka 20 i 22? Ukratko objasniti razlog.

---



---



---

25. Odrediti faktor potiskivanja napona srednje vrednosti sa otpornikom u emitoru i strujnim izvorom u emitoru

$$\rho_R = \frac{a_{d1R}}{a_{s1R}} = \text{_____} \text{ i } \rho_I = \frac{a_{d1I}}{a_{s1I}} = \text{_____} .$$

26. Ukratko objasniti razliku u faktorima potiskivanja  $\rho_R$  i  $\rho_I$

---

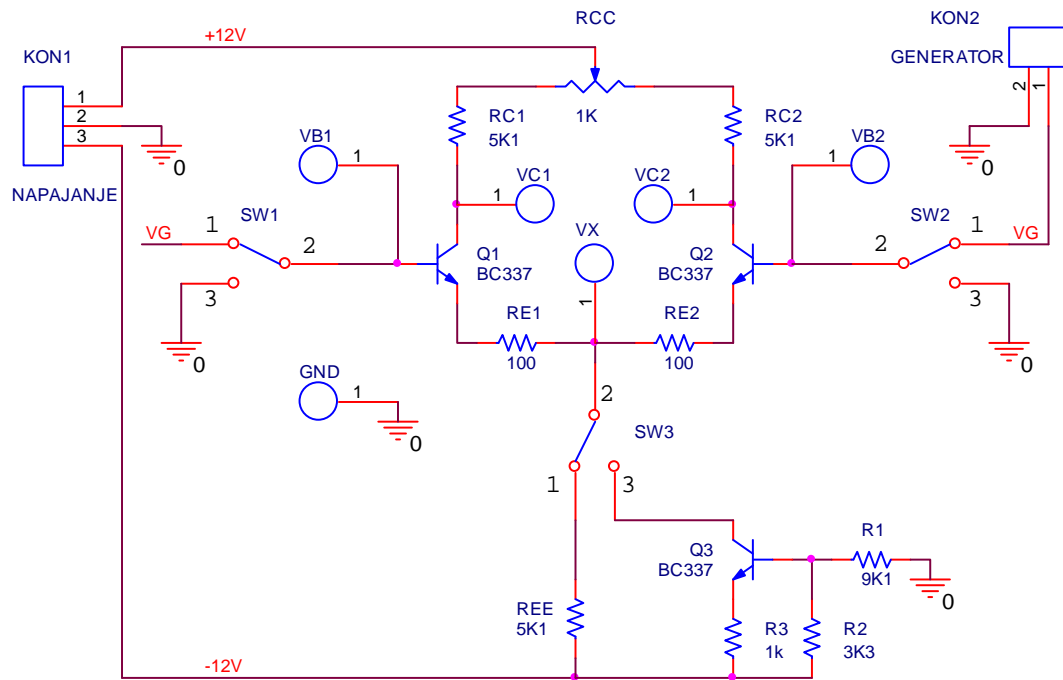


---



---

**DODATAK**



**Slika 5.7 Električna šema makete DIFERENCIJALNI POJAČAVAČ.**