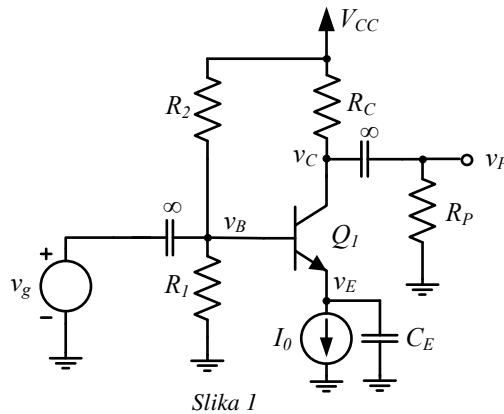


1. U kolu sa slike 1, parametri tranzistora su $V_{BE} = 0,6V$, $V_{CES} = 0,2V$, $V_A \rightarrow \infty$ i $\beta_F = 100$, dok je $R_1 = 15k\Omega$, $R_2 = 75k\Omega$, $R_P = 20k\Omega$, $I_0 = 1mA$, $V_{CC} = 12V$, $v_g(t) = V_m \sin(2\pi ft)$, $V_m = 10mV$, $f = 1kHz$, i $V_T = 25mV$.

a) Odrediti struje baze, kolektora i emitora u mirnoj radnoj tački.

Odrediti i nacrtati vremenske dijagrame napona v_B , v_E , v_C i v_P kada je:

- b) $C_E = 0$;
 c) $C_E \rightarrow \infty$;
 d) Odrediti otpornost R_u koju vidi pobudni generator i otpornost R_i koju vidi potrošač R_P , pod uslovima iz tačaka b) i c).



Slika 1

Rešenje:

a) Ekvivalentna šema pojačavača u mirnoj radnoj tački prikazana je na slici 1a. Parametri Tevenenovog generatora su

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 2V \text{ i } R_B = R_1 \parallel R_2 = 12,5k\Omega.$$

Ukoliko pretpostavimo direktan aktivni režim tranzistora, prema slici je $I_0 = I_B + I_C = (1 + \beta_F)I_B$, odakle je $I_B = \frac{I_0}{1 + \beta_F} = 9,9\mu A$ i $I_C = \beta_F I_B = 990\mu A$. Jednosmerni naponi na priključcima tranzistora su s toga $V_B = V_{BB} - R_B I_B = 1,88V$, $V_E = V_B - V_{BE} = 1,28V$ i $V_C = V_{CC} - R_C I_C = 7,05V$, čime je opravda pretpostavka da tranzistor radi u direktnom aktivnom režimu ($V_{CE} > V_{CES} = 0,2V$).

b) Na slici 1b prikazana je šema pojačavača za male signale u okolini mirne radne tačke. Parametri modela za male signale su $g_m = \frac{I_C}{V_T} = 39,6mS$ i $r_\pi = \frac{\beta_0 V_T}{I_C} = 2,54k\Omega$.

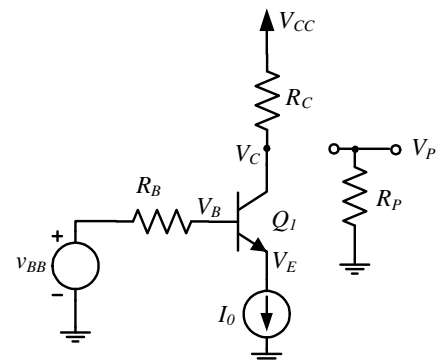
Prema slici je $0 = i_e = i_b + i_c = (1 + \beta_0)i_b$, odakle je $i_b = i_c = 0$. Sada je $v_e = v_b$ i $v_p = v_c = -(R_C \parallel R_P)\beta_0 i_b = 0$.

Principom superpozicije važi da je $v_B = V_B + v_b$, $v_E = V_E + v_e$, $v_C = V_C + v_c$ i $v_P = V_P + v_p$, gde je $v_e = v_b = v_g$. Dakle,

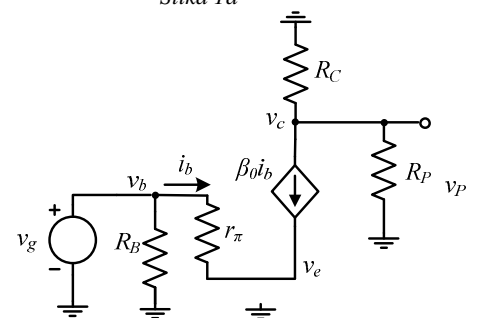
$$v_B(t) = 1,88V + 10mV \cdot \sin(2\pi ft)$$

$$v_E(t) = 1,28V + 10mV \cdot \sin(2\pi ft)$$

$$v_C(t) = 7,05V$$



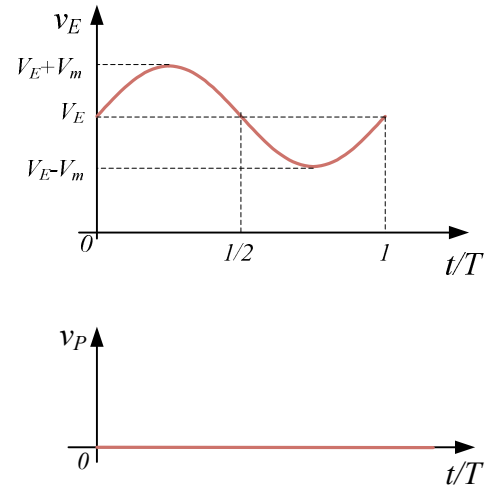
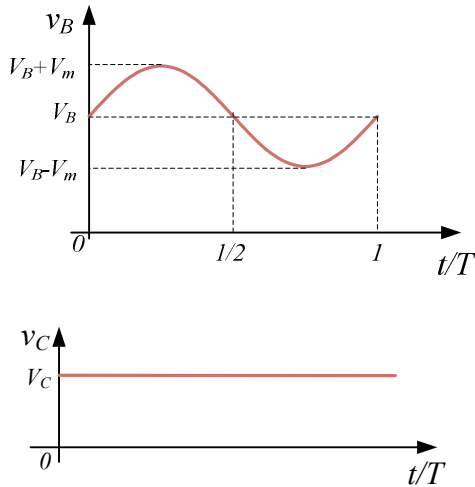
Slika 1a



Slika 1b

$$v_p(t) = 0$$

što je prikazano graficima na slici 1c.

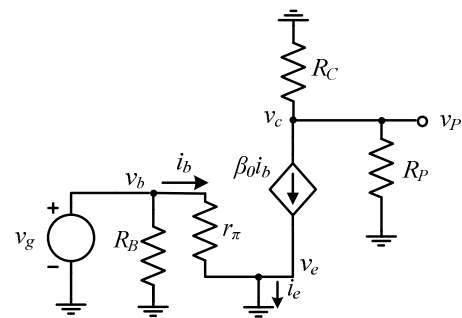


Slika 1c

c) Na slici 1d je prikazana šema za male signale u ovom slučaju. Parametri za male signale su isti kao u prethodnoj tački, s obzirom da je jednosmerni režim kola ostao nepromenjen. Prema slici je $v_b = v_g$ i $v_e = 0$. Struja baze je $i_b = \frac{v_{be}}{r_\pi} = \frac{v_g}{r_\pi}$, odakle dobijamo $i_c = \beta_0 i_b = \beta_0 \frac{v_g}{r_\pi}$. Sada možemo sračunati i

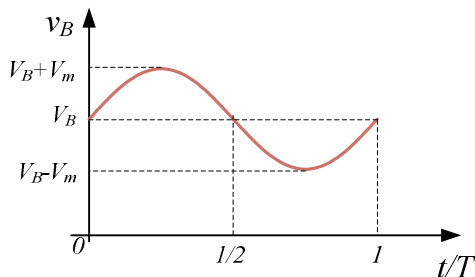
$$v_p = v_c = -(R_C \parallel R_P) \beta_0 i_b = -(R_C \parallel R_P) \beta_0 \frac{v_g}{r_\pi} = -g_m (R_C \parallel R_P) v_g.$$

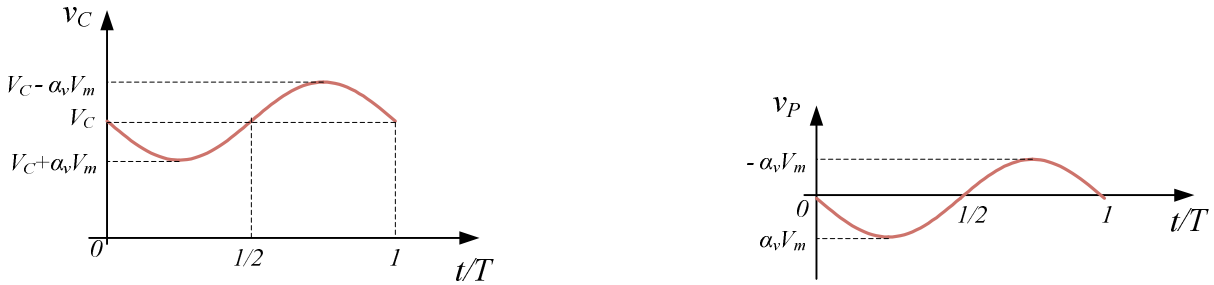
$$\text{Naponsko pojačanje je } a_v = \frac{v_p}{v_g} = -g_m (R_C \parallel R_P) = -158.$$



Slika 1d

Primenjujući princip superpozicije nalazimo $v_B(t) = 1,88\text{V} + 10\text{mV} \cdot \sin(2\pi f t)$, $v_E(t) = 1,28\text{V}$, $v_C = V_C + a_v V_m \sin(2\pi f t) = 7,05\text{V} - 1,58\text{V} \cdot \sin(2\pi f t)$ i $v_E = V_E + a_v V_m \sin(2\pi f t) = -1,58\text{V} \cdot \sin(2\pi f t)$. Vremenski grafici relevantnih napona u toku prve periode dati su slikom 1e.



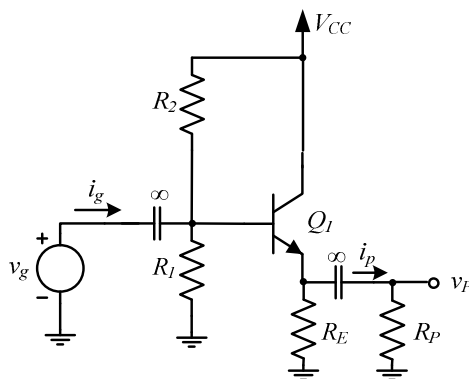


Slika 1e

d) U slučaju kola sa slike *1b*, otpornost koju vidi generator v_g je $R_u = R_B = R_1 \parallel R_2 = 12,5k\Omega$, s obzirom da je $i_b = 0$ (time je otpornost koja se vidi u bazi beskonačna). Izlazna otpornost koju vidi potrošač je $R_i = R_C = 5k\Omega$.

U slučaju kola sa slike *1d*, otpornost koju vidi generator v_g je $R_u = R_B \parallel r_\pi = R_1 \parallel R_2 \parallel r_\pi = 2,1k\Omega$. Izlazna otpornost koju vidi potrošač je $R_i = R_C = 5k\Omega$.

2. U pojačavaču sa zajedničkim kolektorom prikazanom na slici 2, parametri upotrebljenog tranzistora su $V_{BE} = 0,6V$, $V_{CES} = 0,2V$, $V_A = 75V$ i $\beta_F = \beta_0 = 250$, dok su ostale vrednosti $V_{CC} = 5V$, $V_T = 25mV$, $R_1 = 76,5k\Omega$, $R_2 = 37,1k\Omega$, $R_E = 1k\Omega$ i $R_P = 10k\Omega$.
- Odrediti naponsko pojačanje $a_v = v_p/v_g$;
 - Odrediti strujno pojačanje $a_i = i_p/i_g$;
 - Odrediti ulaznu otpornost R_u i otpornost R_i koju vidi potrošač R_P ;
 - Ako je varijacija napona napajanja $v_{cc}(t) = V_{ccm} \sin(2\pi ft)$, $V_{ccm} = 50mV$, $f = 100Hz$ i $V_{ccm} \ll V_{CC}$, pri $v_g = 0$ odrediti amplitudu promenljive komponente napona na potrošaču V_{pcm} ;
 - Ponoviti tačke a-c) u slučaju da je unutrašnja otpornost generatora $R_g = 50\Omega$.



Slika 2

Rešenje:

a) Šema za male signale pojačavača prikazana je na slici 2a, gde je $R_B = R_1 \parallel R_2 = 25k\Omega$. Parametri šeme za male signale su $g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T} = 100,4mS$, $r_\pi = \frac{\beta_0 V_T}{I_{CQ}} = 2,49k\Omega$ i $r_{ce} = \frac{V_A}{I_C} = 29,9k\Omega$.

Prema slici je

$$\begin{aligned} v_p &= (R_E \parallel R_P \parallel r_{ce})(i_b + \beta_0 i_b) \\ &= (R_E \parallel R_P \parallel r_{ce})(1 + \beta_0) i_b \end{aligned}$$

Promenljiva komponenta struje baze i_b se može sračunati kao

$i_b = \frac{v_g}{r_\pi + R_X}$, gde je R_X otpornost označena na slici. Ovu

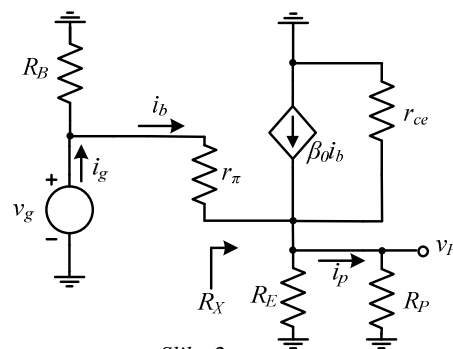
otpornost možemo sračunati rešavanjem kola stavljajući test generator na mesto odakle želimo da sračunamo otpornost. Druga mogućnost je primena dualne Milerove teoreme (videti predavanja), koja odmah daje $R_X = (R_E \parallel R_P \parallel r_{ce})(1 + \beta_0)$. Dakle,

$$i_b = \frac{v_g}{r_\pi + (R_E \parallel R_P \parallel r_{ce})(1 + \beta_0)}$$

odakle se sada dobija

$$v_p = \frac{(R_E \parallel R_P \parallel r_{ce})(1 + \beta_0)v_g}{r_\pi + (R_E \parallel R_P \parallel r_{ce})(1 + \beta_0)}$$

odnosno



Slika 2a

$$a_v = \frac{v_p}{v_g} = \frac{(R_E \parallel R_P \parallel r_{ce})(1 + \beta_0)}{r_\pi + (R_E \parallel R_P \parallel r_{ce})(1 + \beta_0)} = 0,989.$$

b) Koristeći dva puta osobinu strujnog razdelnika (slika 2a), dobija se

$$i_b = i_g \cdot \frac{R_B}{R_B + r_\pi + R_X}$$

$$i_p = \frac{R_E \parallel r_{ce}}{R_P + R_E \parallel r_{ce}} (1 + \beta_0) i_b$$

odakle je

$$a_i = \frac{i_p}{i_g} = \frac{R_E \parallel r_{ce}}{R_P + R_E \parallel r_{ce}} (1 + \beta_0) \frac{R_B}{R_B + r_\pi + (R_E \parallel R_P \parallel r_{ce})(1 + \beta_0)} = 2,2.$$

c) Ulazna otpornost je $R_u = R_B \parallel (r_\pi + R_X) = R_B \parallel (r_\pi + (R_E \parallel R_P \parallel r_{ce})(1 + \beta_0)) = 22,5k\Omega$. Izlazna otpornost je $R_i = R_E \parallel r_{ce} \parallel r_e = R_E \parallel r_{ce} \parallel \frac{r_\pi}{1 + \beta_0} = 10\Omega$.

d) Na slici 2b je prikazana šema za male signale iz koje se određuje uticaj varijacije napona napajanja V_{CC} . Prema ovoj slici je

$$v_{be}(g_m + g_\pi) + g_{ce}(v_{cc} - v_p) - v_p(G_P + G_E) = 0,$$

gde su slovima g i G označene odgovarajuće provodnosti. Korišćenjem uslova $v_{be} = -v_p$ dobija se

$$a_{cc} = \frac{v_p}{v_{cc}} = \frac{g_{ce}}{g_m + g_\pi + g_{ce} + G_P + G_E} = 3,28 \cdot 10^{-4}.$$

Amplituda napona na potrošaču je sada $V_{pcm} = a_{cc} V_{ccm} = 16,4\mu V$.

e) Ekvivalentna šema u ovom slučaju je prikazana na slici 2c. Strujno pojačanje a_i je očigledno nepromenjeno u odnosu na prethodne tačke. Ulazna otpornost koju vidi idealni generator se povećala za R_g koje je vezano redno, pa je u slučaju realnog naponskog generatora

$$R_{ug} = R_g + R_B \parallel (r_\pi + (R_E \parallel R_P \parallel r_{ce})(1 + \beta_0)) = 22,5k\Omega$$

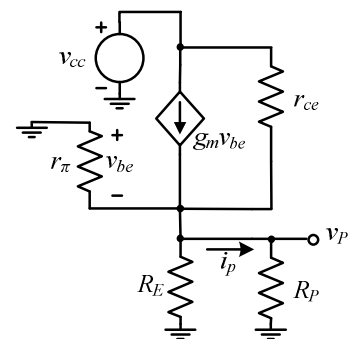
Da bismo sračunali ukupno naponsko pojačanje $a_{vuk} = \frac{v_p}{v_g}$, možemo rešiti kolo sa slike 2c, ali možemo

da iskoristimo rezultat tačke a). Naime, pojačanje dobijeno u tački a) predstavlja naponsko pojačanje

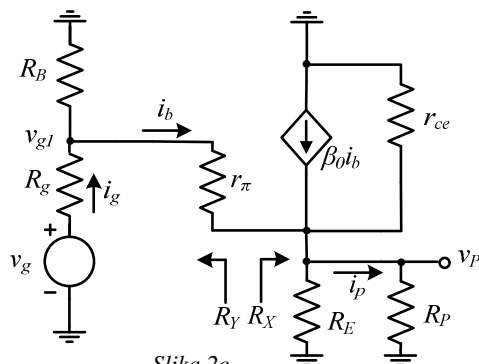
$a_v = \frac{v_p}{v_{g1}}$ sa slike 2c. Time je $a_{vuk} = a_v \cdot \frac{v_{g1}}{v_g}$. Napon v_{g1} je određen naponskim razdelnikom koga čine

otpornost R_g i ulazna otpornost pojačavača R_u (sračunata u tački c), pa je $v_{g1} = \frac{R_u}{R_u + R_g} v_g \approx v_g$, tj.

$a_{vuk} \approx a_v$. Formulu za izlaznu otpornost možemo takođe iskoristiti, s tim što otpornost r_π treba zameniti otpornošću $R_Y = r_\pi + R_B \parallel R_g$, odakle je $R_i = R_E \parallel r_{ce} \parallel \frac{r_\pi + R_B \parallel R_g}{1 + \beta_0} \approx 10\Omega$.

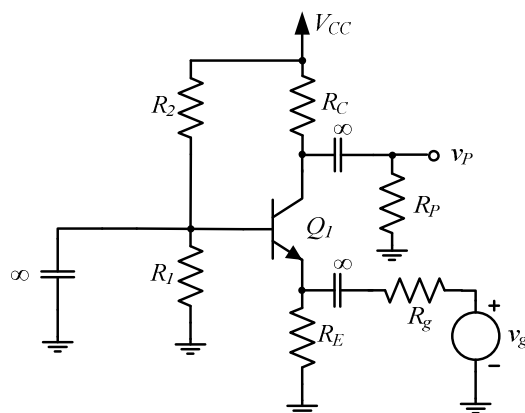


Slika 2b



Slika 2c

3. Na slici 3 je prikazan jedan pojačavač u spoju sa zajedničkom bazom. Parametri tranzistora su $V_{BE} = 0,65V$, $V_{CES} = 0,2V$, $V_A \rightarrow \infty$ i $\beta_F = \beta_0 = 200$, dok je $V_{CC} = 12V$, $V_T = 25mV$, $R_1 = 47k\Omega$, $R_2 = 100k\Omega$, $R_E = 6,2k\Omega$, $R_g = 50\Omega$ i $R_P = 68k\Omega$.
- Odrediti struju kolektora u mirnoj radnoj tački. Smatrati da tranzistor radi u direktnom aktivnom režimu.
 - Odrediti otpornost R_C tako da se na potrošaču dobije maksimalna amplituda simetričnog neizobličenog napona. Koliko iznosi ova amplituda?
 - Odrediti otpornost R_u koju vidi pobudni generator v_g .
 - Odrediti otpornost R_i koju vidi potrošač R_P .
 - Odrediti naponsko pojačanje $a_v = v_p/v_g$.
 - Odrediti strujno pojačanje $a_i = i_p/i_g$.



Slika 3

Rešenje:

- a) Na slici 3a je prikazana ekvivalentna šema pojačavača u mirnoj radnoj tački, gde je

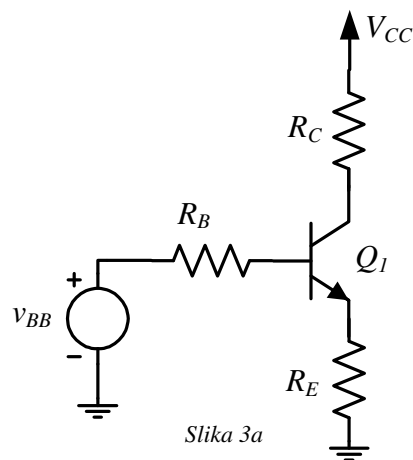
$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 3,84V \text{ i } R_B = R_1 \parallel R_2 = 32k\Omega.$$

Prema ovoj slici je $V_{BB} - R_B \frac{I_C}{\beta_F} - V_{BE} - R_E \frac{I_C}{\alpha_F} = 0$, odakle se dobija $I_C = 500\mu A$.

Naponi baze i kolektora su $V_B = V_{BB} - \frac{R_B I_C}{\beta_F} = 3,76V$ i $V_C = V_{CC} - R_C I_C$.

b) Šema za male signale prikazana je na slici 3b. Sa slike je $v_p = v_p = -i_c(R_C \parallel R_P)$, gde je i_c promenljiva komponenta struje kolektora. Kako je $i_c = I_C + i_c \geq 0$, to je $-i_c \leq I_C$, pa je $v_{Pmax} = I_C(R_C \parallel R_P)$. Granični slučaj odgovara granici zakočenja tranzistora. Sa druge strane, važi da je $v_C = v_p + V_C$ (jer je napon na kondenzatoru kod potrošača u jednosmernom režimu upravo V_C), pa minimum napona v_p odgovara minimumu napona v_C . Granični uslov je zasićenje tranzistora, kada je $v_C = V_B - V_{BE} + V_{CES}$, odnosno $v_{Pmin} = V_B - V_{BE} + V_{CES} - V_C$.

U slučaju maksimalne amplitude simetričnog neizobličenog napona potrošača, imamo da je $v_{Pmin} = -v_{Pmax}$, odakle se dobija



Slika 3a

$$V_B - V_{BE} + V_{CES} - (V_{CC} - R_C I_C) = -I_C (R_C \parallel R_P).$$

Rešavanjem po R_C dobija se kvadratna jednačina $R_C^2 + 1,19 \cdot 10^5 R_C - 1,19 \cdot 10^9 = 0$, koja ima jedno pozitivno rešenje $R_C = 9,27k\Omega$. Maksimalna amplituda simetričnog neizobličenog napona na potrošaču je $V_{pmm\max} = I_C (R_C \parallel R_P) = 4,08V$.

c) Parametri sa slike 3b su $g_m = \frac{I_C}{V_T} = 20mS$, $r_\pi = \frac{\beta_0 V_T}{I_{CQ}} = 10k\Omega$ i $g_\pi = \frac{1}{r_\pi} = 100mS$.

Otpornost koju vidi pobudni generator je $R_u = R_g + R_E \parallel R_x$, gde je R_x otpornost koja se vidi u emiteru $R_x = \frac{1}{g_m + g_\pi} \approx \frac{1}{g_m} = 50\Omega$, pa je $R_u = 100\Omega$.

d) Otpornost koju vidi potrošač je $R_i = R_C = 9,27\Omega$.

e) Prema slici 3b je

$$v_{be} = \frac{R_x \parallel R_E}{R_g + R_x \parallel R_E} v_g$$

i $v_p = -g_m (R_C \parallel R_P) v_{be}$, odakle je

$$a_v = \frac{v_p}{v_g} = -g_m (R_C \parallel R_P) \frac{R_x \parallel R_E}{R_g + R_x \parallel R_E} = 81,4.$$

f) Kako je

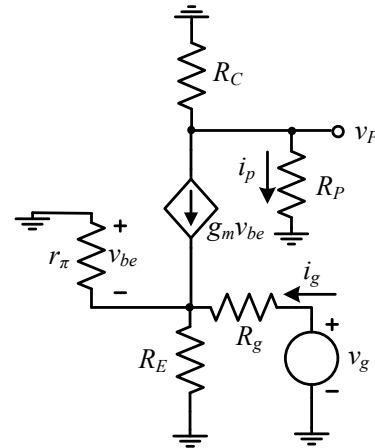
$$i_g = \frac{v_g}{R_u} = \frac{v_g}{R_g + R_E \parallel R_x}$$

i

$$i_p = \frac{v_p}{R_P} = \frac{a_v v_g}{R_P}$$

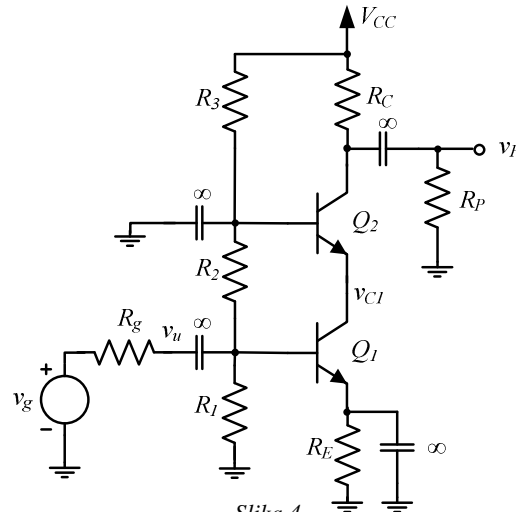
to je

$$a_i = \frac{i_g}{i_p} = \frac{R_u}{R_P} a_v = 0,12.$$



Slika 3b

4. U kaskodnom pojačavaču sa slike 4 parametri tranzistora su $\beta_F = \beta_0 = 200$, $V_A \rightarrow \infty$, $V_{BE} = 0,7V$, $V_{CES} = 0,2V$, dok je $V_{CC} = 24V$, $V_T = 25mV$, $R_1 = 56k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$, $R_3 = 180k\Omega$, $R_g = 1k\Omega$ i $R_p = R_C = 10k\Omega$.
- Odrediti otpornost R_E tako da u mirnoj radnoj tački bude $I_{C1} = 1mA$;
 - Odrediti naponska pojačanja $a_v = v_p/v_u$ i $a_{v1} = v_{c1}/v_u$ i ukupna naponska pojačanja $a_{vuk} = v_p/v_g$ i $a_{v1uk} = v_{c1}/v_g$;
 - Odrediti maksimalnu amplitudu simetričnog neizobličjenog napona na potrošaču V_{pmax} .

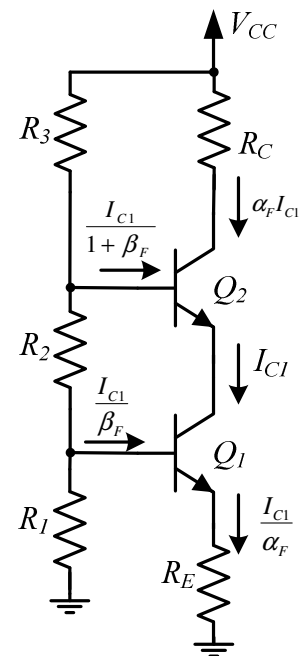


Slika 4

Rešenje:

a) Na slici 4a prikazana je ekvivalentna šema pojačavača u mirnoj radnoj tački. Znajući kolektorsku struju tranzistora Q_1 možemo odrediti baznu struju $I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta_F} = 5\mu A$. Slično je i $I_{B2} = \frac{I_{E2}}{1+\beta_F} = \frac{I_{C1}}{1+\beta_F} \approx 5\mu A$. Ako pretpostavimo da je bazna struja mnogo manja od struja kroz otpornike R_{1-3} , tada je $I_{R1-3} = \frac{V_{CC}}{R_1+R_2+R_3} = 97,5\mu A$, što je zaista dosta veće od baznih struja. Naponi na bazama su $V_{B1} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2+R_3} = 5,46V$, dok je $V_{B2} = V_{CC} \cdot \frac{R_1+R_2}{R_1+R_2+R_3} = 6,44V$. Sada je $V_{E1} = V_{B1} - V_{BE} = R_E I_{E1}$, odakle je $R_E = \frac{V_{B1}-V_{BE}}{I_{E1}} = \frac{V_{B1}-V_{BE}}{I_{C1}/\alpha_F} \approx \frac{V_{B1}-V_{BE}}{I_{C1}} = 4,76k\Omega$. Potrebno je proveriti da naponi kolektor-emitor zadovoljavaju uslov za rad tranzistora u direktnom aktivnom režimu.

b) Na slici 4b prikazana je ekvivalentna šema za male signale. Parametri u modelu za male signale su $g_{m1,2} = \frac{I_{C1,2}}{V_T} = 40mS$ i $r_{\pi 1,2} = \frac{\beta_0 V_T}{I_{C1,2}} = 5k\Omega$. Uzeto je da je $I_{C1} \approx I_{C2}$ s obzirom na veliko β_F . Važi da je $i_{c1} = \beta_0 i_{b1}$ i $i_{c1} = i_{b2} + \beta_0 i_{b2}$, pa je $i_{b2} = \frac{\beta_0}{1+\beta_0} i_{b1} \approx i_{b1}$, tj. $i_{c2} = \beta_0 i_{b2} \approx \beta_0 i_{b1}$. Promenljiva komponenta napona na potrošaču je stoga



Slika 4a

$$v_p = -i_{c2}(R_C \parallel R_P) = -\beta_0 i_{b1}(R_C \parallel R_P).$$

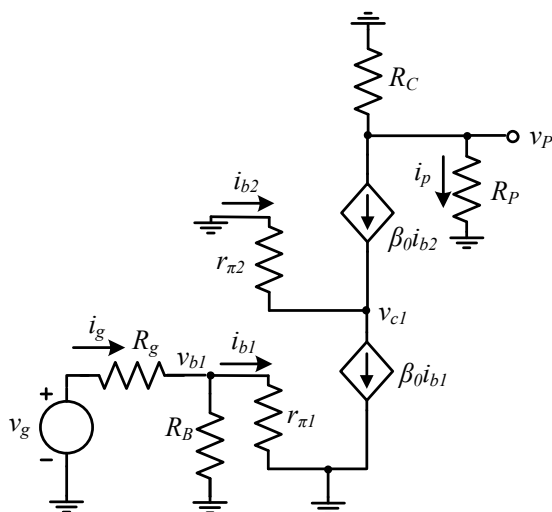
Kako je $i_{b1} = \frac{v_{b1}}{r_{\pi1}} = \frac{v_u}{r_{\pi1}}$, to je

$$v_p = -\beta_0 \frac{v_u}{r_{\pi1}} (R_C \parallel R_P) = -v_u g_m (R_C \parallel R_P)$$

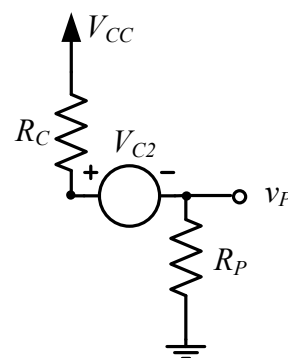
odakle je $a_v = \frac{v_p}{v_u} = -g_m (R_C \parallel R_P) = -200$.

Naponsko pojačanje prvog stepena je pojačanje stepena sa zajedničkim emiterom i ono je $a_{v1} = \frac{v_{c1}}{v_u} = \frac{v_{c1}}{v_{b1}} = -g_{m1} R_{e2}$, gde je R_{e2} otpornost koja se vidi u emiteru tranzistora Q_2 u šemi za male signale. Ovu otpornost možemo odrediti na bar tri načina. Jedan je crtanjem T modela tranzistora Q_2 u šemi za male signale odakle je $R_{e2} = r_{e2} = \frac{r_{\pi2}}{1+\beta_0}$. Drugi način je preslikavanjem otpornosti $r_{\pi2}$ dualnom Milerovom teoremom (što u stvari predstavlja transformaciju iz T u Π model za male signale). Treći način je postavljanjem test generatora u emiter modela tranzistora Q_2 u šemi za male signale i rešavanjem kola u cilju dobijaju odnosa napona i struje test generatora. Zamenom brojnih vrednosti dobija se $a_{v1} = \frac{v_{c1}}{v_u} \approx -1$.

Ukupna naponska pojačanja možemo dobiti iz već sračunatih pojačanja koristeći da je $a_{vuk} = \frac{v_p}{a_g} = a_v \cdot \frac{v_{b1}}{v_g}$, odnosno $a_{v1uk} = \frac{v_p}{a_g} = a_{v1} \cdot \frac{v_{b1}}{v_g}$. Odnos $\frac{v_{b1}}{v_g}$ možemo dobiti iz relacije za naponski razdelnik koji čine R_g i ekvivalentna otpornost koju vidi realni generator $R_B \parallel r_{\pi1}$. Dakle $\frac{v_{b1}}{v_g} = \frac{R_B \parallel r_{\pi1}}{R_B \parallel r_{\pi1} + R_g} = 0,89$. Uvrštavanjem brojnih vrednosti dobija se $a_{vuk} = 178,9$ i $a_{v1uk} = -0,89$.



Slika 4b



Slika 4c

c) Maksimalna vrednost neizobličenog napona na potrošaču određena je zakočenjem tranzistora Q_2 (videti zadatak 3b). Maksimalnu vrednost napona na potrošaču možemo dobiti kao u rešenju zadatka 3b), ali ćemo ovde dati još jedan metod. U trenutku zakočenja tranzistora Q_2 , on je modelovan otvorenom vezom i ekvivalentni model relevantnog dela kola za trenutne vrednosti napona i struja dat je slikom 4c. Kondenzator je modelovan idealnim naponskim generatorom čija je EMS jednaka naponu na kondenzatoru

u mirnoj radnoj tački, što je u isto vreme i napon na kolektoru drugog tranzistora. Prema slici je $v_{P\max} = \frac{R_P}{R_P + R_C}(V_{CC} - V_{C2}) = 5V$.

Minimalna vrednost naizobličenog napona na potrošaču određena je ulaskom tranzistora Q_2 u zasićenje, kada je $v_{P\min} = V_{B2} - V_{BE} + V_{CES} - V_{C2} \approx -8V$.

Maksimalna amplituda simetričnog neizobličenog napona na potrošaču je stoga $V_{pm\max} = \min\{v_{P\max} - V_P, V_P - v_{P\min}\} = 5V$, s obzirom da je $V_P = 0$.