



# Osnovi elektronike SG EEN Školska godina 2014/15

Primeri sa predavanja, rešeni zadaci  
za domaći i zadaci za vežbu

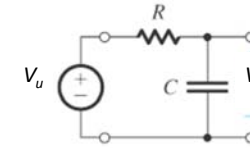
Prof. Dr Predrag Petković

## Pojačanje signala

### Frekvencijske karakteristike



**Primer 2.1:** Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.



$$V_i(j\omega) = \frac{Z_C}{Z_C + R} V_u(j\omega) = \frac{1/j\omega C}{1/j\omega C + R} V_u(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} V_u(j\omega)$$

$$T(j\omega) = \frac{V_i(j\omega)}{V_u(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + (s/\omega_o)} \quad \left. \begin{array}{l} s=j\omega \\ \omega_o = 1/\tau = 1/RC \end{array} \right\}$$



23. oktobar 2014.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

2

## Pojačanje signala

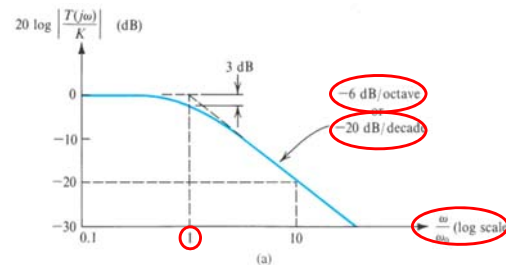
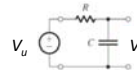


**Primer 2.1:** Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

$$T(j\omega) = \frac{1}{1 + (s/\omega_o)} \quad \left. \begin{array}{l} s=j\omega \\ \omega_o = 1/\tau = 1/RC \end{array} \right\}$$

$$|T(s)| = \frac{\sqrt{\text{Re}\{N(s)\}^2 + \text{Im}\{N(s)\}^2}}{\sqrt{\text{Re}\{D(s)\}^2 + \text{Im}\{D(s)\}^2}} =$$

$$20\log|T(s)| = 20\log \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \{\omega/\omega_o\}^2}} \right] \approx -20\log(\omega/\omega_o) \quad \omega_o \gg \omega$$



23. oktobar 2014.

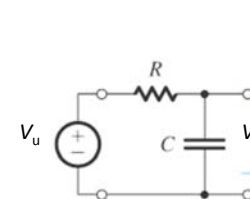
Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

3

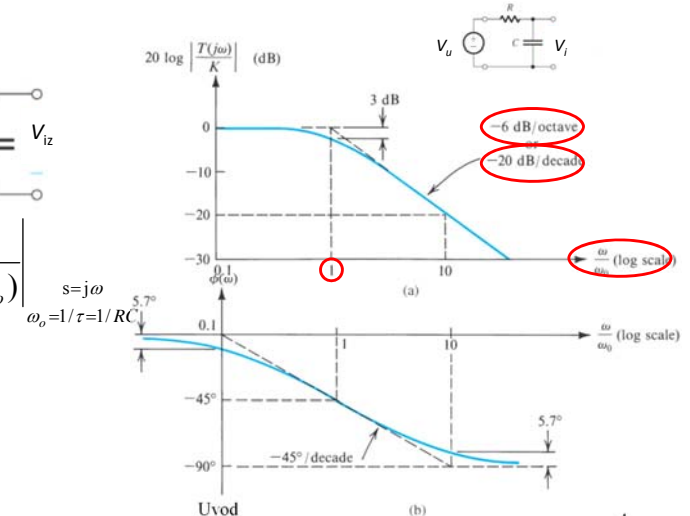
## Pojačanje signala



**Primer 2.1:** Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.



$$T(j\omega) = \frac{1}{1 + (s/\omega_o)} \quad \left. \begin{array}{l} s=j\omega \\ \omega_o = 1/\tau = 1/RC \end{array} \right\}$$



23. oktobar 2014.

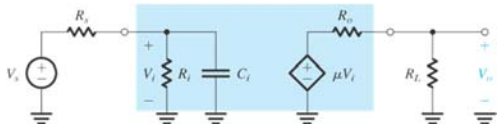
Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

4



Frekvencijske karakteristike

Primer 2.2: Odrediti prenosnu funkciju (ukupno naponsko pojačanje) kola sa slike.



Rešenje:

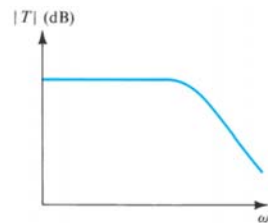
$$A(j\omega) = \mu \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_o} \cdot \frac{1}{1 + sC_i[R_s R_i / (R_s + R_i)]} = \frac{A_o}{1 + s/\omega_0}$$



$$A_o = \mu \frac{1}{1 + (R_s / R_i)} \cdot \frac{1}{1 + (R_o / R_L)}$$

$$\tau = C_i [R_s R_i / (R_s + R_i)]$$

$$\omega_0 = 1/\tau$$

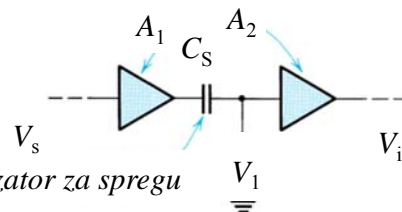


(b)

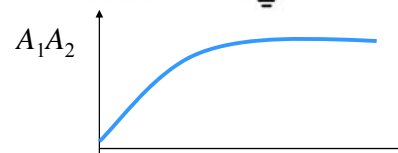


Frekvencijske karakteristike

Primer 2.3: Skicirati prenosnu funkciju (ukupno naponsko pojačanje) dvostepenog pojačavača sa slike.



Rešenje:



Frekvencijske karakteristike

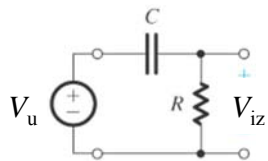
Domaći 2.1

Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

Koju funkciju kolo obavlja u frekvencijskom domenu?

Odrediti graničnu frekvenciju.

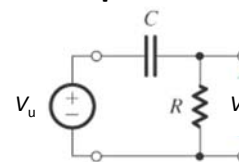
Koliko iznosi asimptotski nagib amplitudske karakteristike po dekadi i po oktavi?



Rešenje 2.1



Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

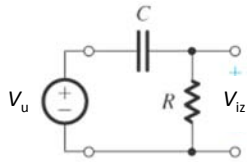


$$V_i(j\omega) = \frac{R}{Z_c + R} V_u(j\omega) = \frac{R}{1/j\omega C + R} V_u(j\omega) = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} V_u(j\omega)$$

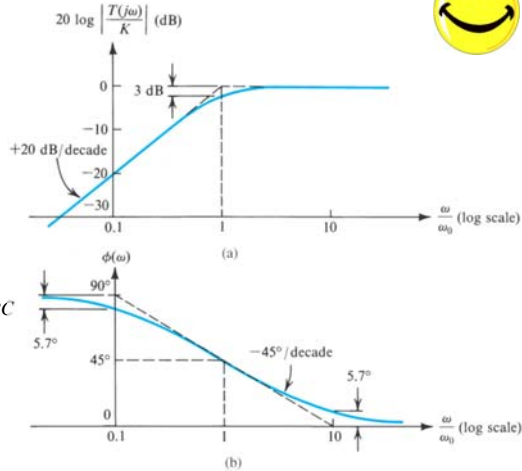
$$T(j\omega) = \frac{V_i(j\omega)}{V_u(j\omega)} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} = \frac{s/\omega_0}{1 + (s/\omega_0)} \Big|_{s=j\omega} = \frac{1}{1 + (\omega_0/s)}$$

$\omega_0 = 1/\tau = 1/RC$

Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.



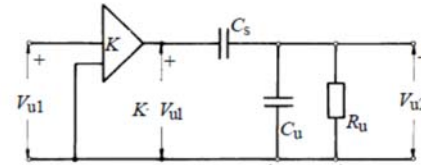
$$T(j\omega) = \frac{s/\omega_o}{1 + (s/\omega_o)} \quad \begin{matrix} s=j\omega \\ \omega_o=1/\tau=1/RC \end{matrix}$$



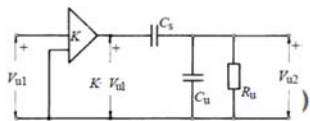
Frekvencijske karakteristike

Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.

Domaći 2.2



Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju kola sa slike.



$$A_u = \frac{V_{u2}}{V_{u1}} = K \frac{j\omega R_u C_s}{1 + j\omega(R_u C_u + R_u C_s)} \\ = K \frac{C_s}{C_u + C_s} \frac{j\tau\omega}{1 + j\tau\omega} = A_0 \frac{j\tau\omega}{1 + j\tau\omega}$$

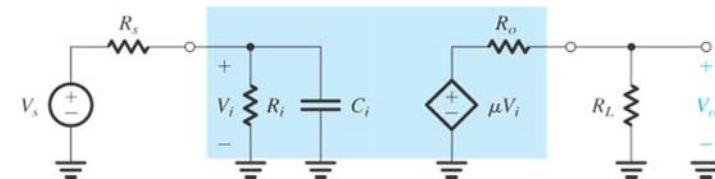
gde je  $\omega$  kružna frekvencija,  $\tau=R_u(C_u+C_s)$ , a  $A_0=K \cdot C_s/(C_s+C_u)$ .



Frekvencijske karakteristike

Zadatak: Odrediti prenosnu funkciju (ukupno naponsko pojačanje) kola sa slike.

Domaći 2.3



Ako je  $R_s=20k$ ,  $R_i=100k$ ,  $C_i=60pF$ ,  $\mu=144$  V/V,  $R_o=200\Omega$  i  $R_L=1k$

- Odrediti pojačanje pri  $\omega=0$  rad/s (jednosmerno) ( $A=100$  V/V)
- Graničnu frekvenciju (3dB) ( $\omega_o=10^6$  rad/s,  $f_o=159,2$  kHz)
- Odrediti frekvenciju pri kojoj  $A$  padne na 0dB ( $10^8$  rad/s)

### Pojačanje signala

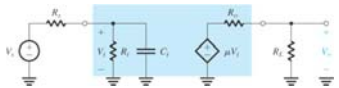
Odrediti prenosnu funkciju (ukupno naponsko pojačanje) kola sa slike.

Ako je  $R_s=20k$ ,  $R_f=100k$ ,  $C_f=60pF$ ,  $\mu=144 V/V$ ,  $R_o=200\Omega$  i  $R_L=1k$

a) Odrediti pojačanje pri  $\omega=0rad/s$  (jednosmerno) ( $A=100 V/V$ )

b) Graničnu frekvenciju (3dB) ( $\omega_o=10^6 rad/s$ ,  $f_o=159,2kHz$ )

c) Odrediti frekvenciju pri kojoj  $A$  padne na 0dB ( $10^8 rad/s$ )



$$|A(j\omega)| = A_v \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

$$|A(j\omega_{3dB})| = \frac{A_v}{\sqrt{1 + (\omega_{3dB} \cdot \tau)^2}} = \frac{A_v}{\sqrt{2}} \Rightarrow \omega_{3dB} = \frac{1}{\tau}$$

$$\omega_{3dB} = \frac{1}{\tau} = 10^6 rad/s$$

$$|A(j\omega_1)| = \frac{A_v}{\sqrt{1 + (\omega_1 \cdot \tau)^2}} = 1 \Rightarrow \omega_1^2 = \frac{A_v^2 - 1}{\tau^2}$$

$$\omega_1 \approx \frac{A_v}{\tau} = A_v \cdot \omega_{3dB} = 100 \cdot 10^6 rad/s = 10^8 rad/s$$

$$V_i(s) = \frac{Z_i}{Z_i + R_s} V_s(s) = \frac{R_i / (1 + sC_f R_i)}{R_i / (1 + sC_f R_i) + R_s} V_s(s) = \frac{R_i}{R_i + R_s + 1 + sC_f(R_i \parallel R_s)} V_s(s)$$

$$V_o(s) = \frac{R_L}{R_o + R_L} \mu V_i(s) = \frac{R_L}{R_o + R_L} \frac{\mu R_i}{R_i + R_s + 1 + sC_f(R_i \parallel R_s)} V_s(s)$$

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)} = \mu \frac{R_L}{R_o + R_L} \frac{R_i}{R_i + R_s + 1 + sC_f(R_i \parallel R_s)}$$

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)} = A_v \frac{1}{1 + sC_f(R_i \parallel R_s)} = A_v \frac{1}{1 + s\tau}$$

$$\tau = C_f(R_i \parallel R_s) = 10^{-6} s$$

$$A_v = \mu \frac{R_L}{R_o + R_L} \frac{R_i}{R_i + R_s} = 144 \frac{1k}{1.2k} \frac{100k}{120k} = 100 V/V$$

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>



### Pojačanje signala

**Primer 3.1** Pojačavač koji se napaja sa +/-10V i pobuđuje sinusnim naponom amplitude 1V, daje napon amplitude 9 V na potrošaču od 1k. Izmerena je struja kroz svaki izvor napajanja od po 9,5mA i ulazna struja amplitude 0.1mA.

Odrediti:

- pojačanje napona,
- Pojačanje struje,
- pojačanje snage,
- snagu DC izvora napajanja,
- disipiranu snagu i
- stepen iskorišćenja

30. oktobar 2014.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

14

### Pojačanje signala

Rešenje Primer 3.1:

a) pojačanje napona,  $A_v = \frac{9}{1} = 9 V/V$   
 $A_v = 20 \log 9 \approx 19.1 \text{ dB}$

b) pojačanje struje,

$$I_i = \frac{V_i}{R_p} = \frac{9 V}{1k\Omega} = 9 \text{ mA}$$

$$A_s = \frac{I_i}{I_u} = \frac{9 \text{ mA}}{0.1 \text{ mA}} = 90 \text{ A/A}$$

$$A_s = 20 \log 90 \approx 39.1 \text{ dB}$$



30. oktobar 2014.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

15

### Pojačanje signala

Rešenje Primer 3.1:

c) pojačanje snage

Aktivna snaga na potrošaču

$$P_p = V_{ieff} I_{ieff} = \frac{V_i}{\sqrt{2}} \frac{I_i}{\sqrt{2}} = \frac{9 V}{\sqrt{2}} \frac{9 \text{ mA}}{\sqrt{2}} = 40.5 \text{ mW}$$

Aktivna snaga na ulazu

$$P_u = V_{ueff} I_{ueff} = \frac{V_u}{\sqrt{2}} \frac{I_u}{\sqrt{2}} = \frac{1 V}{\sqrt{2}} \frac{0.1 \text{ mA}}{\sqrt{2}} = 0.05 \text{ mW}$$

Pojačanje snage

$$A_p = \frac{P_p}{P_u} = \frac{40.5}{0.05} = 810 \text{ W/W}$$

$$A_p = 10 \log 810 \approx 29.1 \text{ dB}$$



30. oktobar 2014.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

16

## Pojačanje signala



Rešenje Primer 3.1:

d) snaga izvora za napajanje

$$P_{DC} = 10V \cdot 9,5mA + 10V \cdot 9,5mA = 190 \text{ mW}$$

e) snaga disipacije

$$\begin{aligned} P_d &= P_{DC} + P_u - P_p = \\ &= 190\text{mW} + 0,05\text{mW} - 49,5\text{mW} \\ &= 149,6 \text{ mW} \end{aligned}$$

f) stepen iskorišćenja

$$\eta = \frac{P_p}{P_{DC}} \cdot 100 = 21,3\%$$

80% snage potroši se van potrošača – na pojačavaču

30. oktobar 2014.

Uvod  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>

17

## Millerova teorema



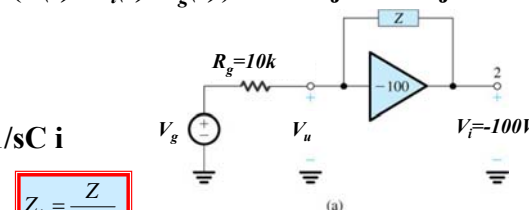
### Domaći 4.1

Zadatak:

Odrediti elemente ekvivalentnog Millerovog kola za pojačavač sa slike (upotrebljen je idealni pojačavač sa  $A=-100$ ) i ukupno naponsko pojačanje ( $A(s)=V_i(s)/V_g(s)$ ) u slučaju kada je Z:

- $R=1M$
- $C=1pF$
- Šta će biti ako je  $Z=1/sC$  i

- $A>1?$
- $A=1?$
- $1>A>0?$



$$Z_1 = \frac{Z}{1-A}$$

$$Z_2 = \frac{Z}{1-1/A} = \frac{A \cdot Z}{A-1}$$

Operacioni pojačavači

13. novembar 2014.

## Millerova teorema

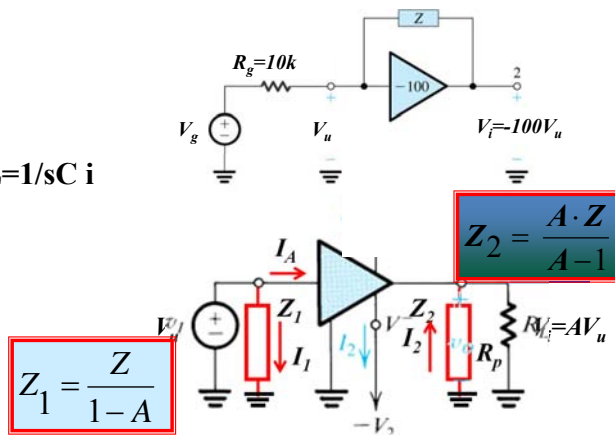


### Rešenje 4.1

Odrediti elemente ekvivalentnog Millerovog kola za pojačavač sa slike i ukupno naponsko pojačanje ( $A(s)=V_i(s)/V_g(s)$ ) u slučaju kada je Z:

- $R=1M$
- $C=1pF$
- Šta će biti ako je  $Z=1/sC$  i

- $A>1?$
- $A=1?$
- $1>A>0?$



$$Z_1 = \frac{Z}{1-A}$$

$$Z_2 = \frac{A \cdot Z}{A-1}$$

20. novembar 2014.

Operacioni pojačavači

## Millerova teorema



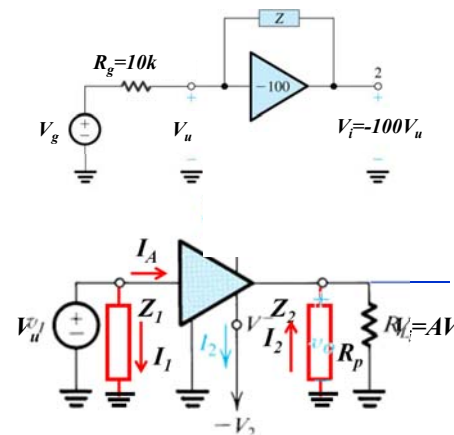
### Rešenje 4.1

Odrediti elemente ekvivalentnog Millerovog kola za pojačavač sa slike i ukupno naponsko pojačanje ( $A(s)=V_i(s)/V_g(s)$ ) u slučaju kada je Z:

- $R=1M$

$$Z_1 = \frac{Z}{1-A} = \frac{1M}{1-(-100)} \approx 10k$$

$$Z_2 = \frac{A \cdot Z}{A-1} = \frac{-100 \cdot 1M}{(-100)-1} \approx 1M$$



20. novembar 2014.

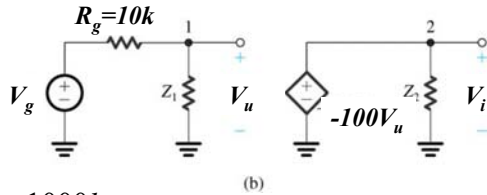
Operacioni pojačavači

Millerova teorema



Rešenje 4.1

a)



$$Z_1 = \frac{Z}{1-A} = \frac{1000k}{1-(-100)} = \frac{1000k}{101} = 9.9k$$

$$Z_2 = \frac{Z}{1-1/A} = \frac{1M}{1-(-1/100)} = \frac{1M}{1.01} = 0.99M$$

$$A = \frac{V_i}{V_g} = \frac{V_i}{V_u} \frac{V_u}{V_g} = -100 \frac{Z_1}{Z_1 + R_g} = -100 \frac{9.9}{9.9+10} = -49.7 \text{ V/V}$$

20. novembar 2014.

Operacioni pojačavači

Millerova teorema



Rešenje 4.1

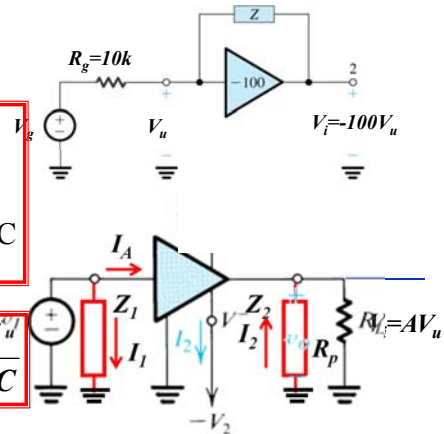
Odrediti elemente ekvivalentnog Millerovog kola za pojačavač sa slike i ukupno naponsko pojačanje ( $A(s)=V_i(s)/V_g(s)$ ) u slučaju kada je Z:

b)  $C=1pF$

$$Z_1 = \frac{Z}{1-A} = \frac{1/(j\omega C)}{1-A} = \frac{1}{j\omega C(1-A)}$$

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega \cdot (101pF)}; \text{ kao } C_e = (1-A) \cdot C$$

$$Z_2 = \frac{A \cdot Z}{A-1} = \frac{-100 \cdot 1/(j\omega C)}{(-100)-1} \approx \frac{1^{Vu}}{j\omega C}$$



20. novembar 2014.

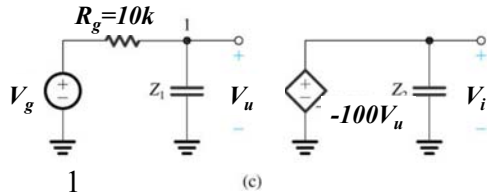
Operacioni pojačavači

Millerova teorema



Rešenje 4.1

b)



$$Z_1 = \frac{Z}{1-A} = \frac{1/sC}{1+100} = \frac{1}{s(101C)}$$

$$Z_2 = \frac{Z}{1-1/A} = \frac{1/sC}{1-(-1/100)} = \frac{1}{s(1.01C)}$$

$$A = \frac{V_i}{V_g} = \frac{V_i}{V_u} \frac{V_u}{V_g} = -100 \frac{1/101sC}{1/101sC + R_g} = \frac{-100}{1+101sCR_g}$$

$$A = \frac{-100}{1+1.01 \times 10^{-6} s} \text{ V/V}$$

$$f_g = f_{3dB} = \frac{1}{2\pi \times 101sCR_g} = \frac{1}{2\pi \times 1.01 \times 10^{-6} s} = 157.6 \text{ kHz}$$

23. oktobar 2012.

Operacioni pojačavači

Millerova teorema



Rešenje 4.1

Odrediti elemente ekvivalentnog Millerovog kola za pojačavač sa slike i ukupno naponsko pojačanje ( $A(s)=V_i(s)/V_g(s)$ ) u slučaju kada je Z:

c) Šta će biti ako je  $Z=1/sC$  i  $A>1$ ?

$$Z_1 = \frac{Z}{1-A} = \frac{1/(sC)}{1-A} = \frac{1}{sC(1-A)}$$

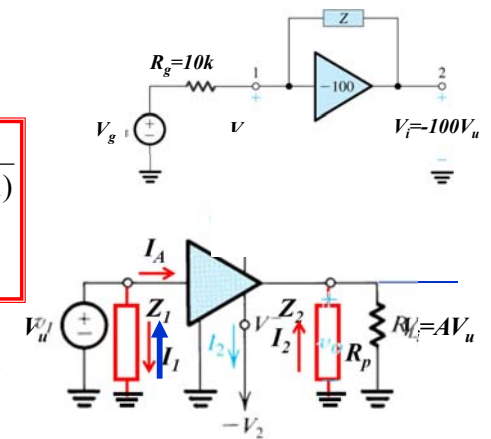
$$Z_1 = -\frac{1}{s \cdot (C(A-1))}$$

konvertor negativne impedanse.

Struja menja smer jer je  $V_i > V_u$

20. novembar 2014.

Operacioni pojačavači





**Rešenje 4.1**

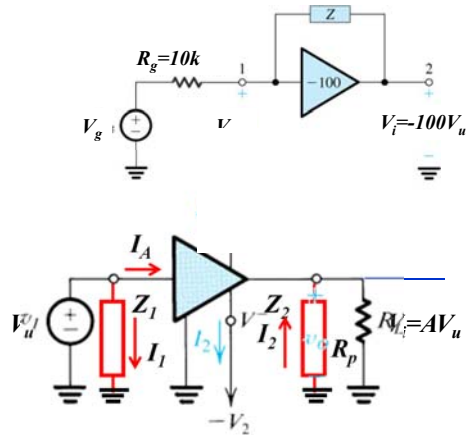
Odrediti elemente ekvivalentnog Millerovog kola za pojačavač sa slike i ukupno naponsko pojačanje ( $A(s)=V_i(s)/V_g(s)$ ) u slučaju kada je  $Z$ :

c) Šta će biti ako je  $Z=1/sC$  i  $A=1$ ?

$$Z_1 = \frac{Z}{1-A} = \frac{1/(sC)}{1-A} = \infty$$

$$Z_2 = -\frac{A \cdot Z}{Z(1-A)} = \infty$$

$V_i=V_u$  kompenzovano  $V_u$



**Rešenje 4.1**

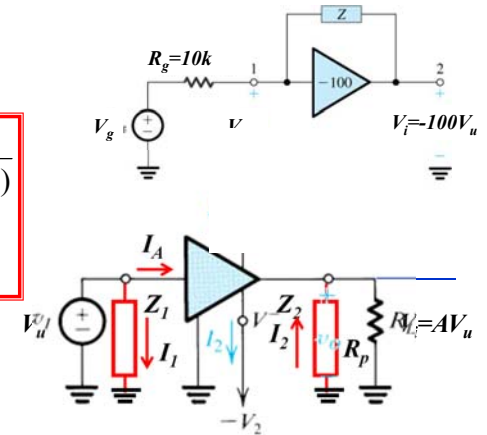
Odrediti elemente ekvivalentnog Millerovog kola za pojačavač sa slike i ukupno naponsko pojačanje ( $A(s)=V_i(s)/V_g(s)$ ) u slučaju kada je  $Z$ :

c) Šta će biti ako je  $Z=1/sC$  i  $1>A>0$ ?

$$Z_1 = \frac{Z}{1-A} = \frac{1/(sC)}{1-A} = \frac{1}{sC(1-A)}$$

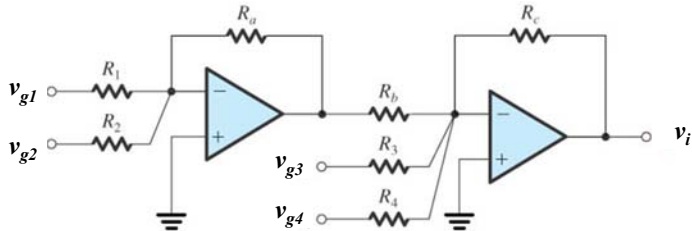
$$Z_2 = \frac{1}{s \cdot C_e}; \quad C_e < C$$

povećana impedansa.  $Z_1 > Z$



**Domaći 4.2**

Odrediti napon na izlazu pojačavača sa slike

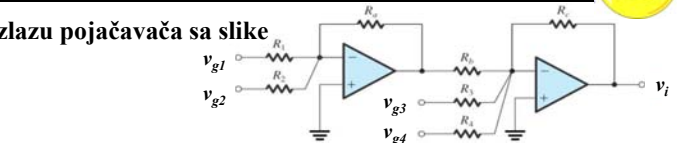


$$v_i = \frac{R_a R_c}{R_1 R_b} v_{g1} + \frac{R_a R_c}{R_2 R_b} v_{g2} - \frac{R_c}{R_3} v_{g3} - \frac{R_c}{R_4} v_{g4}$$

**Rešenje 4.2** Idealni operacioni pojačavač



Odrediti napon na izlazu pojačavača sa slike



1/3

$$i_{rc} = \frac{v_0}{R_c} = -\left(\frac{v_a}{R_b} + \frac{v_3}{R_3} + \frac{v_4}{R_4}\right) \Rightarrow v_0 = -\frac{R_c}{R_b} v_a - \frac{R_c}{R_3} v_3 - \frac{R_c}{R_4} v_4$$

$$i_{ra} \frac{v_a}{R_a} = -\left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2}\right) \Rightarrow v_a = -\frac{R_a}{R_1} v_1 - \frac{R_a}{R_2} v_2$$

$$v_0 = -\frac{R_c}{R_b} \left(-\frac{R_a}{R_1} v_1 - \frac{R_a}{R_2} v_2\right) - \frac{R_c}{R_3} v_3 - \frac{R_c}{R_4} v_4$$

$$v_i = \frac{R_a R_c}{R_1 R_b} v_{g1} + \frac{R_a R_c}{R_2 R_b} v_{g2} - \frac{R_c}{R_3} v_{g3} - \frac{R_c}{R_4} v_{g4}$$





### Domaći 5.1

Zadatak: Za invertorski pojačavač pobuđen naponom  $v_i=0.1V$  kod koga je  $R_1=0.1k$  i  $R_2=10k$  u kome se koriste OpAmp sa pojačanjem u OP od  $A=60dB, 80dB$  i  $100dB$  i odrediti:

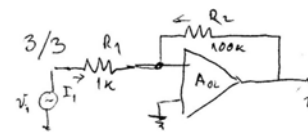
- Pojačanje u zatvorenoj petlji
- Procentualnu promenu pojačanja u zatvorenoj petlji u odnosu na slučaj sa idealnim OpAmpom
- Veličinu napona na ulazu OpAmpa

Rešenje

- a) (90,83; 99,00; 99,90); b) (-9,17%; -1,00%; -0,10%);  
 c) (-9,08mV; -0,99mV; -0,10mV)



### Rešenje 5.1



$$i_1 = \frac{v_i - \frac{v_o}{A_{ol}}}{R_1} = - \frac{v_o - \frac{v_i}{A_{ol}}}{R_2} = i_2$$

$$v_i R_2 - \frac{R_2 v_o}{A_{ol}} = -v_o R_1 + \frac{R_1 v_o}{A_{ol}}$$

$$v_i R_2 = - \left( R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A_{ol}} \right) v_o \Rightarrow v_o = \frac{A_{ol} v_i R_2}{A_{ol} R_1 + (R_1 + R_2)} v_i$$

$$A = \frac{v_o}{v_i} = - \frac{A_{ol} R_2}{A_{ol} R_1 + R_1 + R_2} = \frac{A_{ol} \cdot 100}{A_{ol} + 101}$$

$A_{ol}$		$A_{oz}$		$\frac{\Delta A}{A} 100\%$
[dB]	[V/V]	[dB]	[dB]	
60	$10^3$	90,83	39,16	-9,17%
80	$10^4$	99,00	39,91	-0,99%
100	$10^5$	99,90	39,99	-0,10%



### Domaći 5.2

Za nMOS tranzistor kod koga je  $V_t=1V$ ,  $\mu_n C_{ox} = 120\mu A/V^2$ ,  $W/L=10$  i  $\lambda=0.02V^{-1}$  odrediti:

- opseg napona  $V_{GS}$  za koje tranzistor vodi
- napon  $V_{DS}$  u funkciji  $V_{GS}$  pri kome tranzistor ulazi u zasićenje,
- dinamičke parametre tranzistora  $g_m$  i  $r_o$  u radnoj tački definisanoj sa  $I_D=75\mu A$ , ako se zna da tranzistor radi u zasićenju.
- Nacrtati model za male signale i upisati vrednosti parametara.

$V_{GS} > 1V$ ;  $V_{DS} > V_{GS} - 1V$ ;  $424\mu A/V$ ,  $0.67M\Omega$



### Rešenje 5.2

Za nMOS tranzistor kod koga je  $V_t=1V$ ,  $\mu_n C_{ox} = 120\mu A/V^2$ ,  $W/L=10$  i  $\lambda=0.02V^{-1}$  odrediti: a) opseg napona  $V_{GS}$  za koje tranzistor vodi; b) napon  $V_{DS}$  u funkciji  $V_{GS}$  pri kome tranzistor ulazi u zasićenje; c) dinamičke parametre tranzistora:  $g_m$  i  $r_o$  u radnoj tački definisanoj sa  $I_D=75\mu A$ , ako se zna da tranzistor radi u zasićenju; d) nacrtati model i upisati vrednosti parametara;

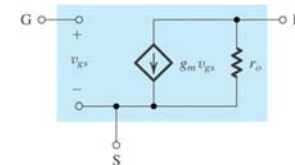
- $V_{GS} > V_t = 1V$ ;
- $V_{DS} > V_{GS} - V_t = V_{GS} - 1V$ ;
- 

$$g_m = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)}$$

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS} - V_t = \sqrt{\frac{I_D}{\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} = \sqrt{\frac{75 \cdot 10^{-6}}{\frac{1}{2} \cdot 120 \cdot 10^{-6} \cdot 10}} = 0,35V$$

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_t} = \frac{150 \cdot 10^{-6}}{0,35} = 424\mu A/V < g_{mBJT} = 40mA/V$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} = \frac{1}{\lambda \cdot I_D} = \frac{1}{0,02 \cdot 75 \cdot 10^{-6}} = 666,66k\Omega \approx 0,67M\Omega$$



d)





**Domaći 5.3**

BJT sa  $\beta=100$ , i  $V_A=100V$  polarisan je u radnoj tački sa  $I_C=1mA$  i  $V_{CE}=5V$ . Nacrtati hibridni  $\pi$  i T model i odrediti parametre:

- a)  $g_m$
- b)  $r_\pi$
- c)  $r_o$
- d)  $\alpha$
- e)  $r_e$  u radnoj tački.
- f) Uporediti  $g_m$  sa odgovarajućim parametrom MOSFETa sa slajda 39 (Domaći 5.2).

40mA/V; 2.5k $\Omega$ ; 105k $\Omega$ ; 100/101; 25 $\Omega$ .



**Rešenje 5.3**

BJT sa  $\beta=100$ , i  $V_A=100V$  polarisan je u radnoj tački sa  $I_C=1mA$  i  $V_{CE}=5V$ . Nacrtati hibridni  $\pi$  i T model i odrediti parametre: a)  $g_m$ ; b)  $r_\pi$ ; c)  $r_o$ ; d)  $\alpha$ ; e)  $r_e$  u radnoj tački. f) Uporediti  $g_m$  sa odgovarajućim parametrom MOSFETa iz Domaćeg 5.2.

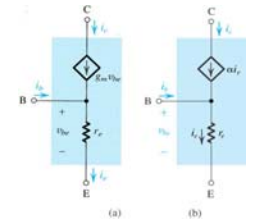
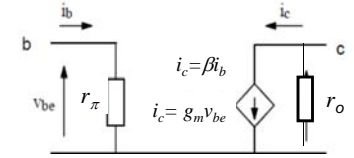
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1mA}{0.026V} = 38,4mA/V \approx 40mA/V > 424\mu A/V$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\beta V_T}{I_C} = \frac{100 \cdot 0.026V}{1mA} = 2,6k\Omega \approx 2,5k\Omega$$

$$r_o = \frac{V_A + |V_{CE}|}{I_C} = \frac{(100 + 5)V}{1mA} = 105k\Omega$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} = \frac{100}{101} = 0,99 \approx 1$$

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{\alpha}{g_m} = \frac{101}{100} \frac{1}{38,4mA/V} = 25,78k\Omega \approx 25k\Omega$$



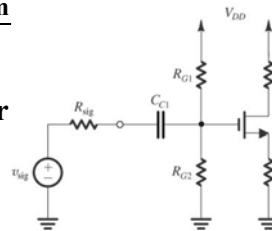
Pojačavač sa zajedničkim sorsom



**Domaći 6.1:**

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa  $V_{\bar{t}}=1V$ ,  $\mu_n C_{ox} 'W/L=1mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ .

Poznato je  $V_{DD}=15V$ .



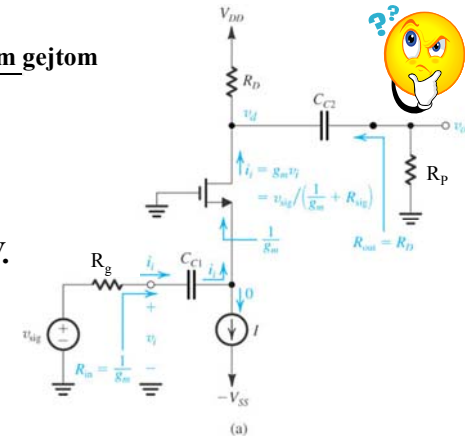
- a) Odrediti vrednosti ostalih elemenata kola pod uslovom da je  $I_D=0.5mA$  i da su padovi napona na  $R_D$  i  $R_S$  isti i iznose  $V_{DD}/3$ . ( $R_D=R_S=10k$ ,  $R_{G1}=8M$ ,  $R_{G2}=7M$ )
- b) Izračunati za koliko će se promeniti  $I_D$  ukoliko se tranzistor zameni drugim kod koga je  $V_{\bar{t}}=1.5V$ . ( $I_D=0.45mA$ ,  $\Delta I_D = -0.05mA$ ,  $\Delta I_D/I_D = -10\%$ )
- c) Ponoviti postupak pod a i b) u slučaju da se zadrži ista vrednost za  $I_D$  i  $R_D$  a da je  $R_S=0$ . ( $R_{G1}=13M$ ,  $R_{G2}=2M$ ,  $\Delta I_D = -0.375mA$ ,  $\Delta I_D/I_D = -75\%$ )
- d) Izračunati naponsko pojačanje ulaznu i izlaznu otpornost u slučaju a) i c). ( $A_v = -10/11$ ,  $R_{uo} = 3.73M$ ,  $R_{ic} = 10k$ ,  $A_c = 10$ ,  $R_{uc} = 1.73M$ ,  $R_{ic} = 10k$ )

Pojačavač sa zajedničkim gejtom



**Domaći 6.2:**

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa  $V_{\bar{t}}=1.5V$ ,  $\mu_n C_{ox} 'W/L=2A=1mA/V^2$ ,  $V_A=75V$ . Poznato je  $V_{DD}=V_{SS}=10V$ ,  $I_D=0.5mA$ ,  $R_D=15k$ .



- a) Odrediti vrednosti jednosmernih napona  $V_D$  i  $V_S$ . ( $V_D=2.5V$ ,  $V_S=-2.5V$ )
- b) Odrediti  $A_v$ ,  $R_{u}$ ,  $R_i$  i  $A_v$  ukoliko je  $R_P=15k$ ,  $R_g=50\Omega$ . ( $A_v=15V/V$ ,  $R_i=1k$ ,  $R_o=15k$ ,  $A_v=7.5V/V$ )
- c) Odrediti ukupno naponsko pojačanje ukoliko je  $R_g=1k$ ,  $10k$ ,  $100k$ . ( $3.75V/V$ ,  $0.68V/V$ ,  $0.07V/V$ )

### Pojačavač sa zajedni

#### Domaći 6.3:

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa

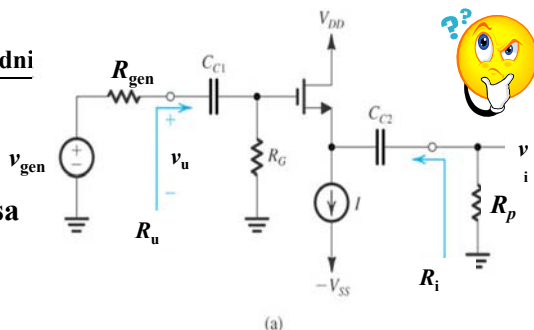
$$V_t = 1.5V, V_A = 75V,$$

$$\mu_n C_{ox} 'W/L = 2A = 1mA/V^2.$$

$$\text{Poznato je } V_{DD} = V_{SS} = 10V,$$

$$I_D = 0.5mA, R_G = 4.7M, R_P = 15k.$$

- Odrediti vrednosti jednosmernih napona  $V_G$  i  $V_S$ .  
( $V_G = 0V, V_S = -2.5V$ )
- Odrediti  $A_v, R_u, R_i$  i  $A_v$  ukoliko je  $R_g = 1M\Omega$ .  
( $A_v = 0.993V/V, R_u = 4.7M, R_i = 0.993k, A_v = 0.768V/V$ )



27. novembar 2014.

Jednostepeni MOSFET pojačavači

### Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

#### Domaći 7:

Izračunati napon na potrošaču od  $R_p = 10\Omega$  ako je pobuđen iz generatora  $V_g = 10mV$  i  $R_g = 10k$  u slučaju da je povezan:

- Direktno;
- preko pojačavača sa zajedničkim kolektorom čiji su parametri:  $R_E = 5k, R_B = 100k, h_{11E} = 1k, h_{12E} = 0, h_{21E} = 100, h_{22E} = 0$ ;
- preko pojačavača sa zajedničkim emitorom čiji su parametri:  $R_C = 5k, R_B = 100k, h_{11E} = 1k, h_{12E} = 0, h_{21E} = 100, h_{22E} = 0$ ;
- preko kaskadne veze pojačavača sa zajedničkim emitorom iz tačke c) (ulaz vezan za generator) i pojačavača sa zajedničkim kolektorom iz tačke b) (izlaz vezan za  $R_p$ ).

Videti skice sa table na sledećem slajdu.

04. decembar 2014.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

### Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

#### Domaći



04. decembar 2014.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

### Pojačavač sa zajedničkim kolektorom

#### Rešenje 7:

Izračunati napon na potrošaču od  $R_p = 10\Omega$  ako je pobuđen iz generatora  $V_g = 10mV$  i  $R_g = 10k$  u slučaju da je povezan:

- Direktno;
- preko pojačavača sa zajedničkim kolektorom čiji su parametri:  $R_E = 5k, R_B = 100k, h_{11E} = 1k, h_{12E} = 0, h_{21E} = 100, h_{22E} = 0$ ;
- preko pojačavača sa zajedničkim emitorom čiji su parametri:  $R_C = 5k, R_B = 100k, h_{11E} = 1k, h_{12E} = 0, h_{21E} = 100, h_{22E} = 0$ ;
- preko kaskadne veze pojačavača sa zajedničkim emitorom iz tačke c) (ulaz vezan za generator) i pojačavača sa zajedničkim kolektorom iz tačke b) (izlaz vezan za  $R_p$ ).

$$a) \quad V_p = \frac{R_p}{R_g + R_p} V_g = \frac{10\Omega}{10010\Omega} \cdot 10mV = 10\mu V$$

09. decembar 2014.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



Rešenje 7 (nastavak):

b) preko pojačavača sa zajedničkim kolektorom čiji su parametri:  $R_E=5k, R_B=100k, h_{11E}=1k, h_{12E}=0, h_{21E}=100, h_{22E}=0;$

$Z_C: R_E=5k, R_B=100k, h_{11E}=1k, h_{21E}=100$   
 $R_{uZC} = R_B || R_{uE} = R_B || (h_{11E} + (1+h_{21E})R_E)$   
 $R_{uE} = 1k + 101 \cdot 5k = 506k$   
 $R_{uZC} = R_B || R_{uE} = 83,5k$   
 $R_{iZC} = R_{iE} || R_E = R_{iE} || R_E$   
 $R_{iE} = \frac{h_{11E}}{1+h_{21E}} = \frac{1k}{101} = 10\Omega$   
 $R_{iZC} \approx R_{iE} = 10\Omega$   
 $A_{0ZC} \approx 1$

$$V_p = \frac{R_p}{R_{iZC} + R_p} \cdot A_{0ZC} \cdot V_u = \frac{R_p}{R_{iZC} + R_p} \cdot A_{0ZC} \cdot \frac{R_{uZC}}{R_{uZC} + R_B} \cdot V_g$$

$$= \frac{10}{10+10} \cdot 1 \cdot \frac{83,500}{83,500} \cdot 10mV = \frac{1}{2} \cdot 0,9 \cdot 10mV = 4,5mV$$

09. decembar 2014.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



Rešenje 7 (nastavak):

c) preko pojačavača sa zajedničkim emitorom čiji su parametri:  $R_C=5k, R_B=100k, h_{11E}=1k, h_{12E}=0, h_{21E}=100, h_{22E}=0;$

$R_{uZE} = R_B || R_{uE} = R_B || h_{11E} \approx h_{11E} = 1k$   
 $R_{iZE} = R_C || R_{iE} = R_C = 5k$   
 $A_{0ZE} = -\frac{h_{21E}}{h_{11E}} R_C = -\frac{100}{1k} \cdot 5k = -500$

$$V_p = \frac{R_p}{R_{iZE} + R_p} \cdot A_{0ZE} \cdot V_u = \frac{R_p}{R_{iZE} + R_p} \cdot A_{0ZE} \cdot \frac{R_{uZE}}{R_g + R_{uZE}} \cdot V_g = \frac{10}{5010} \cdot (-500) \cdot \frac{1k}{1k} \cdot 10mV = 9mV$$

09. decembar 2014.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



Rešenje 7 (nastavak):

d) preko kaskadne veze pojačavača sa zajedničkim emitorom iz tačke c) (ulaz vezan za generator) i pojačavača sa zajedničkim kolektorom iz tačke b) (izlaz vezan za  $R_p$ ).

$$V_p = \frac{R_p}{R_{iZC} + R_p} \cdot A_{0ZC} \cdot V_{u1} = \frac{R_p}{R_{iZC} + R_p} \cdot A_{0ZC} \cdot \frac{R_{uZC}}{R_{iZE} + R_{uZE}} \cdot A_{0ZE} \cdot V_u$$

$$= \frac{R_p}{R_{iZC} + R_p} \cdot A_{0ZC} \cdot \frac{R_{uZC}}{R_{iZE} + R_{uZE}} \cdot \frac{R_{uZE}}{R_g + R_{uZE}} \cdot V_g =$$

$$= \frac{10}{10+10} \cdot (1) \cdot \frac{83,5k}{5k+83,5k} \cdot (-500) \cdot \frac{1k}{10k+1k} \cdot 10mV =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 0,94 \cdot (-500) \cdot \frac{1}{11} \cdot 10mV = 214\mu V$$

09. decembar 2014.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

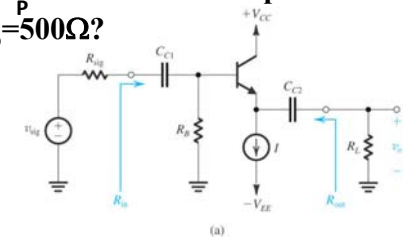
Za vežbu 7.1:

Pojačavač sa zajedničkim kolektorom



Za pojačavač sa slike, kod koga je  $R_g=10k, R_p=1k, I=5mA, R_B=40k, \beta=100$  i  $V_A=100V$ , naći  $R_{uE}, R_{uZ}, A_o, A$  i  $R_i$ .

Kolika je maksimalna vrednost amplitude izlaznog prostoperiodičnog signala pri kojoj tranzistor neće ući u oblast zakočenja? Koliki se napon na izlazu očekuje ako je amplituda napona  $v_{be}$  ograničena na  $10mV$ . Koliko će biti naponsko pojačanje kada je  $R_p=2k$  i  $R_p=500\Omega$ ?



Rešenje:

96.7k; 28.3k; 0.735 V/V; 0.8 V/V, 84  $\Omega$ ; 5 V; 1.9 V; 0.768 V/V; 0.685 V/V.

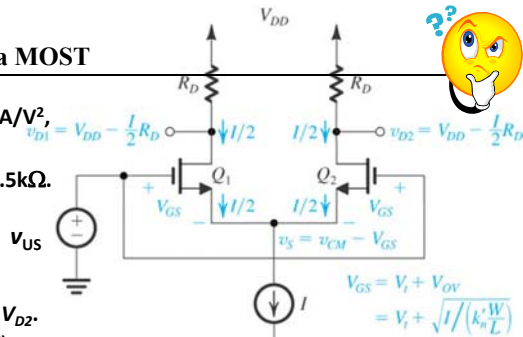
04. decembar 2014.

Jednostepeni pojačavači sa BJT

### Domaći 8.1: Realizacija sa MOST

U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa  $V_t=0.5V$ ,  $\mu_n C_{ox} 'W/L=2A=4mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ .

Poznato je  $I=0.4mA$ ,  $V_{DD}=V_{SS}=1.5V$  i  $R_D=2.5k\Omega$ .



- Za  $v_{US}=0V$  odrediti  $v_S$ ,  $i_{D1}$ ,  $i_{D2}$ ,  $v_{D1}$  i  $v_{D2}$ . ( $v_S=-0.82V$ ,  $i_{D1}=i_{D2}=0.2mA$ ,  $v_{D1}=v_{D2}=1V$ )
- Ponoviti postupak pod a) za  $v_{US}=-0.2V$ . ( $v_S=-1.02V$ ,  $i_{D1}=i_{D2}=0.2mA$ ,  $v_{D1}=v_{D2}=1V$ )
- Ponoviti postupak pod a) za  $v_{US}=0.9V$ . ( $v_S=0.08V$ ,  $i_{D1}=i_{D2}=0.2mA$ ,  $v_{D1}=v_{D2}=1V$ )
- Koliko iznosi najveći napon  $v_{US}$  pri kome je  $I=0.4mA$ , a tranzistori rade u oblasti zasićenja? ( $v_{USmax}=1.5V$ )
- Odrediti  $A_d$ ,  $A_c$  i  $CMRR$ . ( $g_m=1.25mA/V$ ,  $A_d=-3.125V/V$ ,  $A_c=0$ ,  $CMRR \rightarrow \infty$ )

11. decembar 2014.

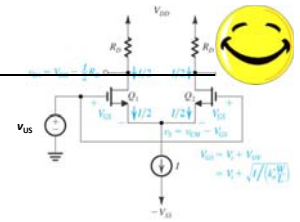
Višestepeni pojačavači

E7.1

### Domaći 8.1 Rešenje:

U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa  $V_t=0.5V$ ,  $\mu_n C_{ox} 'W/L=2A=4mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ .

Poznato je  $I=0.4mA$ ,  $V_{DD}=V_{SS}=1.5V$  i  $R_D=2.5k\Omega$ .



- $i_{D1} = i_{D2} = I/2 = 0,2mA$   
 $i_{D1} = A(V_{GS1} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS1} = V_t + \sqrt{\frac{i_{D1}}{A}} = 0,5V + \sqrt{\frac{0,2}{2}}V = 0,82V = V_{GS2}$   
 $v_S = v_{US} - V_{GS1} = 0 - 0,82 = -0,82V$   
 $v_{D1} = V_{DD} - R_D i_{D1} = 1,5V - 2,5k \cdot 0,2mA = 1V = v_{D2}$
- kao pod a)  $i_{D1} = i_{D2} = I/2 = 0,2mA$ ;  $V_{GS1} = 0,82V = V_{GS2}$ ;  $v_{D1} = 1V = v_{D2}$   
 $v_S = v_{US} - V_{GS1} = -0,2V - 0,82V = -1,02V$
- kao pod a)  $i_{D1} = i_{D2} = I/2 = 0,2mA$ ;  $V_{GS1} = 0,82V = V_{GS2}$ ;  $v_{D1} = 1V = v_{D2}$   
 $v_S = v_{US} - V_{GS1} = 0,9V - 0,82V = +0,08V$

18. decembar 2014.

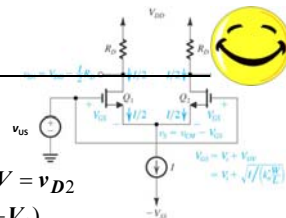
Višestepeni pojačavači

E7.1

### Domaći 8.1 Rešenje:

U kolu sa slike upotrebljeni su identični tranzistori sa  $V_t=0.5V$ ,  $\mu_n C_{ox} 'W/L=2A=4mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ .

Poznato je  $I=0.4mA$ ,  $V_{DD}=V_{SS}=1.5V$  i  $R_D=2.5k\Omega$ .



- za  $i_{D1} = i_{D2} = I/2 = 0,2mA$ ;  $V_{GS1} = 0,82V = V_{GS2}$ ;  $v_{D1} = 1V = v_{D2}$   
 $V_{DSmin} = V_{GS1} - V_t = v_{D1} - v_Smax \Rightarrow v_Smax = v_{D1} - (V_{GS1} - V_t)$   
 $v_Smax = v_{USmax} - V_{GS1} \Rightarrow v_{USmax} = v_Smax + V_{GS1} = v_{D1} - (V_{GS1} - V_t) + V_{GS1} = v_{D1} + V_t$   
 $v_{USmax} = V_{DD} - R_D i_{D1} + V_t = 1,5V$

$$e) A_d = \left. -\frac{g_m r_o R_D}{r_o + R_D} \right|_{r_o \rightarrow \infty} = -g_m R_D$$

$$g_m = \frac{2i_{D1}}{V_{GS1} - V_t} = \frac{I}{V_{GS1} - V_t} = \frac{0,4mA}{0,32V} = 1,25mA/V$$

$$A_d = -g_m R_D = 1,25mA/V \cdot 2,5k\Omega = -3,125V/V$$

$$A_c = \left. -\frac{g_m r_o R_D}{r_o + R_D + 2(g_m r_o + 1)R_S} \right|_{r_o \rightarrow \infty, R_S \rightarrow \infty} = 0$$

$$CMRR = A_d / A_c \rightarrow \infty$$

18. decembar 2014.

Višestepeni pojačavači

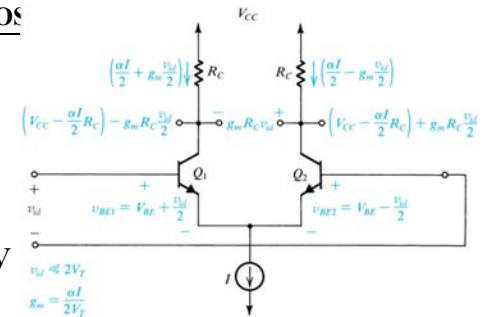
E7.1

### Za one koji žele da nauče više

### Domaći 8.2 :

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa  $\alpha=1$ ,  $V_{BE}=0.7V$ .

Poznato je  $I=1mA$ ,  $V_{CC}=15V$  i  $R_C=10k\Omega$ ,  $v_{BE1}=5+0.005\sin(\omega t)V$   
 $v_{BE2}=5-0.005\sin(\omega t)V$ .



Odrediti

- $i_{C1}$ ,  $i_{C2}$  ( $i_{C1}=0.5+0.1\sin(\omega t)$  mA,  $i_{C2}=0.5-0.1\sin(\omega t)$  mA)
- $v_{C1}$ ,  $v_{C2}$ . ( $v_{C1}=10-1\sin(\omega t)$  V,  $v_{C2}=10+1\sin(\omega t)$  V)
- $A_d$ . ( $A_d=200V/V$ )

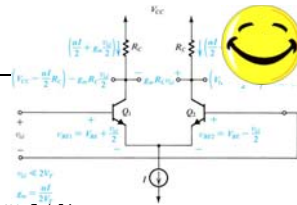
11. decembar 2014.

Višestepeni pojačavači

### Domaći 8.2 Rešenje:

Za one koji žele da nauče više

U kolu sa slike upotrebljen je tranzistor sa  $\alpha=1$ ,  $V_{BE}=0.7V$ .  
Poznato je  $I=1mA$ ,  $V_{CC}=15V$  i  $R_C=10k\Omega$ ,  $v_{BE}=5+0.005\sin(\omega t)V$   
 $v_{BE2}=5-0.005\sin(\omega t)V$ .



a) za  $I_{C1} = I_{C2} = I_C = \alpha \cdot I / 2 = 0,5mA$ ;

$g_{m1} = g_{m2} = g_m = I_C / V_T = 0,5mA / 0,025V = 20mA/V$

$v_{ud} = v_{BE1} - v_{BE2} = 0,01\sin(\omega t)V$

$i_{c1} = g_m(v_{ud} / 2) = 0,1\sin(\omega t)mA$ ;  $i_{c2} = -g_m(v_{ud} / 2) = -0,1\sin(\omega t)mA$

$i_{C1} = 0,5 + 0,1\sin(\omega t) mA$ ;  $i_{C2} = 0,5 - 0,1\sin(\omega t) mA$

b)  $V_{C1} = V_{C2} = V_C = V_{CC} - R_C I_C = 15V - 10k\Omega \cdot 0,5mA = 10V$

$v_{c1} = -R_C i_{c1} = -1\sin(\omega t) V$

$v_{c2} = -R_C i_{c2} = +1\sin(\omega t) V$

$v_{C1} = V_C + v_{c1} = 10 - 1 \cdot \sin(\omega t) V$ ;  $v_{C2} = V_C + v_{c2} = 10 + 1 \cdot \sin(\omega t) V$

c)  $A_d = (\frac{v_{C1} - v_{C2}}{v_{ud}}) = -\frac{2}{0.01} = 200 V/V$

18. decembar 2014.

Višestepeni pojačavači

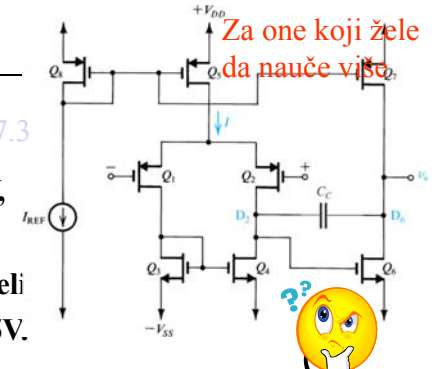
E7.1

### Domaći 8.3: Realizacija sa MOST

Za one koji žele da nauče više

•U kolu sa slike upotrebljeni su tranzistori sa  $\mu_n C_{ox} = 160\mu A/V^2$ ,  $V_{tn} = 0.7V$ ,  $\mu_p C_{ox} = 40\mu A/V^2$ ,  $V_{tp} = -0.8V$ ,  $V_{An} = -V_{Ap} = -10V$ .

Dimenzije tranzistora date su u tabeli  
Poznato je  $I_{REF} = 90\mu A$ ,  $V_{DD} = V_{SS} = 2.5V$ .



Dopuniti podatke u Tabeli i naći ukupno naponsko pojačanje.

Sugestija: Najpre odrediti pojačanje svakog stepena posebno.

	Q1	Q1	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
W/L	20/0.8	20/0.8	5/0.8	5/0.8	40/0.8	10/0.8	40/0.8	40/0.8
I <sub>D</sub> (μA)								
V <sub>GS</sub> (V)								
g <sub>m</sub> (mA/V)								
r <sub>o</sub> (kΩ)								

### Domaći 8.3 Rešenje:

Za one koji žele da nauče više

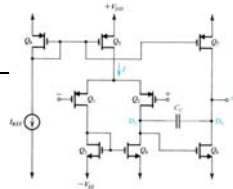
•U kolu sa slike upotrebljeni su tranzistori sa  $\mu_n C_{ox} = 160\mu A/V^2$ ,  $V_{tn} = 0.7V$ ,  $\mu_p C_{ox} = 40\mu A/V^2$ ,  $V_{tp} = -0.8V$ ,  $V_{An} = -V_{Ap} = -10V$ .

Dimenzije tranzistora date su u tabeli. Poznato je  $I_{REF} = 90\mu A$ ,  $V_{DD} = V_{SS} = 2.5V$ . Dopuniti podatke u Tabeli i naći ukupno naponsko pojačanje.

$(W/L)_5 = (W/L)_7 = (W/L)_8 \Rightarrow I_{D5} = I_{D7} = I_{D8} = I_{REF} = 90\mu A$

$(W/L)_1 = (W/L)_2 \Rightarrow I_{D1} = I_{D2} = I_{REF} / 2 = 45\mu A$

$I_{D3} = I_{D1} = 45\mu A$ ;  $I_{D4} = I_{D2} = 45\mu A$ ;  $I_{D6} = I_{D7} = 90\mu A$



$I_D = A(V_{GS} - V_t)^2 = \frac{1}{2} \mu C_{ox} (W/L)(V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS} = V_t + \sqrt{\frac{I_D}{A}}$

$g_m = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)}$ ;  $r_o = \frac{V_A}{I_D}$ , Zamenom vrednosti za svaki tranzistor

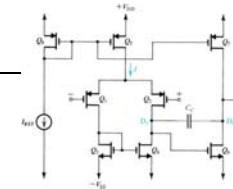
(Q1, Q2, Q5, Q7 i Q8 pMOS), (Q3, Q4, i Q6 nMOS)

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
W/L	20/0.8	20/0.8	5/0.8	5/0.8	40/0.8	10/0.8	40/0.8	40/0.8
I <sub>D</sub> (μA)	45	45	45	45	90	90	90	90
V <sub>GS</sub> (V)	1.1	1.1	1.	1.	1.1	1	1.1	1.1
g <sub>m</sub> (mA/V)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6
r <sub>o</sub> (kΩ)	222	222	222	222	111	111	111	111

### Domaći 8.3 Rešenje:

•U kolu sa slike upotrebljeni su tranzistori sa  $\mu_n C_{ox} = 160\mu A/V^2$ ,  $V_{tn} = 0.7V$ ,  $\mu_p C_{ox} = 40\mu A/V^2$ ,  $V_{tp} = -0.8V$ ,  $V_{An} = -V_{Ap} = -10V$ .

Dimenzije tranzistora date su u tabeli. Poznato je  $I_{REF} = 90\mu A$ ,  $V_{DD} = V_{SS} = 2.5V$ . Dopuniti podatke u Tabeli i naći ukupno naponsko pojačanje.



$A_1 = -g_{m1}(r_{o2} || r_{o4}) = -0.3mA/V \cdot (222k\Omega || 222k\Omega) = -33,33V/V$

$A_2 = -g_{m6}(r_{o6} || r_{o7}) = -0.6mA/V \cdot (111k\Omega || 111k\Omega) = -33,33V/V$

$A = A_1 \cdot A_2 = 1110,89V/V$

$a = 20 \log(A) = 60,91 \text{ dB}$

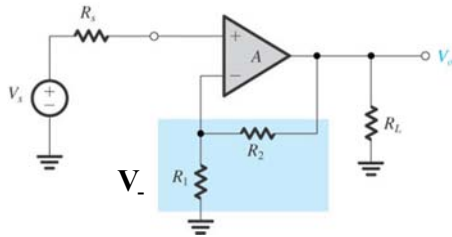
18. decembar 2014.

Višestepeni pojačavači

E7.1

52

### Domaći 9.1:



U kolu sa slike upotrebljen je idealizovani pojačavač sa  $A=100\text{dB}$ .

Odrediti:

- $R_2/R_1$  tako da se dobije  $A_r=100!$
- $B$  u dB?
- Napon na izlazu  $V_o$ , i  $V_-$  ukoliko je  $V_s=0.1\text{V}$ .
- za koliko će se smanjiti  $A_r$  ukoliko pojačanje  $A$  opadne za 20%?

(Idealizovani pojačavač ima beskonačnu ulaznu i nultu izlaznu otpornost)

### Domaći 9.1

Rešenje:

$$\text{a) } A_r = \frac{A}{1-AB} = 50 \text{ za } AB \gg 1 \Rightarrow -\frac{1}{B} = 50$$

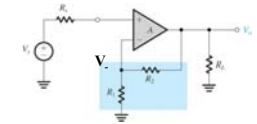
$$B = \frac{V_-}{V_o} = -\frac{R_1}{R_1+R_2}$$

$$-\frac{1}{B} = \frac{R_1+R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 50 \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 49$$

$$\text{b) } B = 20 \log\left(\frac{1}{50}\right) = 20 \log(0.02) = -33,8\text{dB}$$

$$\text{c) } V_o = \frac{A}{1-AB} V_s = 50 \cdot 0.1\text{V} = 5\text{V}$$

$$V_- = \frac{R_1}{R_1+R_2} V_o = 5\text{V} / 50 = 0.1\text{V}$$

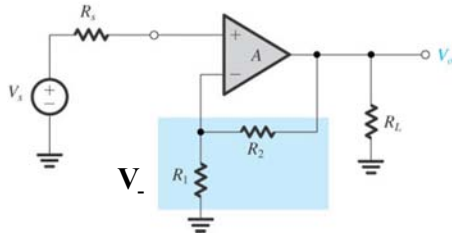


$$\text{d) } A_r = \frac{A}{1-AB} = 50; \quad A_r' = \frac{0.8A}{1-0.8AB}$$

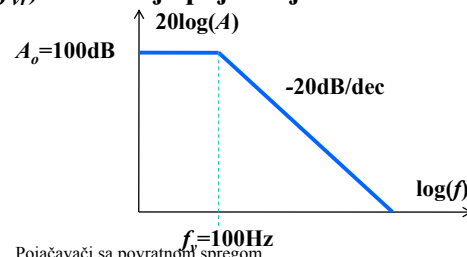
$$\frac{A_r - A_r'}{A_r} \cdot 100 = \left(1 - \frac{0.8A}{A}\right) \cdot 100$$

$$\frac{A_r - A_r'}{A_r} \cdot 100 = 0,0122\%$$

### Domaći 9.2:



U kolu iz primera 8.1 odrediti pojačanje pojačavača sa povratnom spregom pri niskim frekvencijama ( $A_{or}$ ) i gornju graničnu frekvenciju ( $f_{vr}$ ) ukoliko je pojačanje  $A$  definisano sa



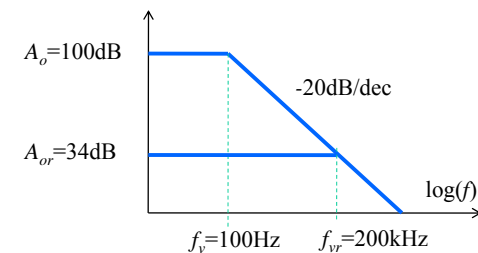
### Domaći 9.2

Rešenje:

$$A_{ro} = \frac{A_o}{1-A_o B} = 50;$$

$$a_{ro} = 20 \log(A_{ro}) = 33.98\text{dB}$$

$$f_{vr} = f_v \cdot (1 - A_o B) = 100\text{Hz} \cdot (2001) = 200,1\text{kHz}$$



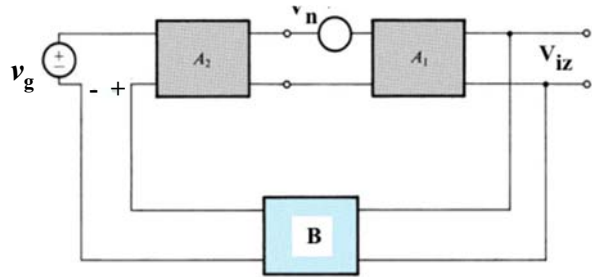


### Domaći 9.3:



Izlazni stepen pojačavača sa naponskim pojačanjem  $A_1=1V/V$  pobuđuje se signalom  $v_g=1V$ , a u njemu se generiše se šum intenziteta  $v_n=1V$ .

Odrediti za koliko će se poboljšati odnos signal-šum na izlazu, ukoliko se koristi prepojačavač sa  $A_2 = 100V/V$ , a na oba stepena primeni NPS sa ukupnim faktorom povratne sprege  $B=1$  kao na slici.

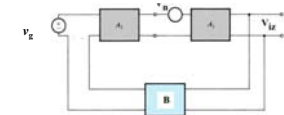


18. decembar 2014.

Pojačavači sa povratnom spregom

### Domaći 9.3

Rešenje:



**Bez prepojačavača:**

$$v_{iz} = v_{is} + v_{in} = A_1(v_g + v_n) = 1 \cdot 1V + 1 \cdot 1V;$$

$$SNR = 20 \log(v_{is} / v_{in}) = 0dB$$

**Sa prepojačavačem:**

$$(v_g - Bv_{iz})A_2 + v_n)A_1 = v_{iz};$$

$$(1 + BA_1A_2)v_{iz} = A_1A_2v_g + A_1v_n$$

$$v_{iz} = \frac{A_1A_2v_g}{(1 + BA_1A_2)} + \frac{A_1v_n}{(1 + BA_1A_2)} = v_{is} + v_{in} \Rightarrow v_{is} = \frac{A_1A_2v_g}{(1 + BA_1A_2)}; \quad v_{in} = \frac{A_1v_n}{(1 + BA_1A_2)}$$

$$v_{is} = \frac{A_1A_2v_g}{(1 + BA_1A_2)} = \frac{100}{101}1V = 0,99V;$$

$$v_{in} = \frac{A_1v_n}{(1 + BA_1A_2)} = \frac{1}{101}1V = 0,0099V.$$

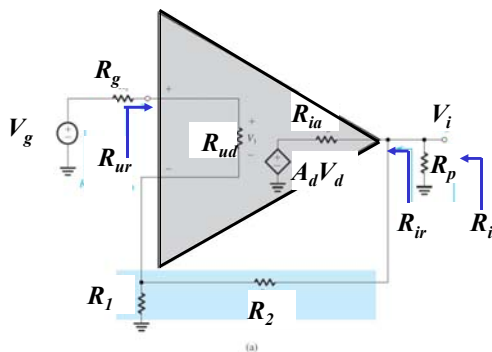
$$SNR = 20 \log(v_{is} / v_{in}) = 20 \log(100) = 40dB$$

Pojačavači sa povratnom spregom

### Domaći 9.4:

Za one koji žele da nauče više

Operacioni pojačavač sa slike ima diferencijalno pojačanje  $A_d=80dB$ , konačnu ulaznu otpornost  $R_{ud}=100k\Omega$  i izlaznu otpornost  $R_{ia}=1k\Omega$ . Odrediti  $A_r=V_i/V_g$ ,  $R_{ur}$  i  $R_{ir}$ . Poznato je  $R_g=10k\Omega$ ,  $R_1=1k\Omega$ ,  $R_2=1M\Omega$ ,  $R_p=2k\Omega$ .



18. decembar 2014.

Povratna sprega

### Rešenje 9.4:

Za one koji žele da nauče više

Operacioni pojačavač sa slike ima diferencijalno pojačanje  $A_d=80dB$ , konačnu ulaznu otpornost  $R_{ud}=100k\Omega$  i izlaznu otpornost  $R_{ia}=1k\Omega$ . Odrediti  $A_r=V_i/V_g$ ,  $R_{ur}$  i  $R_{ir}$ . Poznato je  $R_g=10k\Omega$ ,  $R_1=1k\Omega$ ,  $R_2=1M\Omega$ ,  $R_p=2k\Omega$ .



$$R_{11} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} \approx 1k, \quad R_{22} = R_1 + R_2 \approx 1M$$

$$A_o = \frac{V_i}{V_g} = \frac{V_i}{V_d} \frac{V_d}{V_g} = \frac{A_d(R_p \parallel R_{22})}{(R_{ia} + R_p \parallel R_{22})} \frac{R_{ud}}{R_g + R_{11} + R_{ud}}$$

$$A_o \approx \frac{A_d R_p}{(R_{ia} + R_p)} \frac{R_{ud}}{R_{11} + R_{ud}} = \frac{10^4 \cdot 2 \cdot 10^3}{(3 \cdot 10^3)} \frac{100 \cdot 10^3}{1.1 \cdot 10^6} = 6000$$

$$B = -\frac{V_r}{V_o} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} \approx -10^{-3}$$

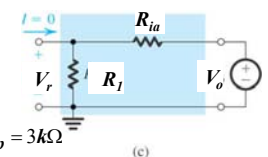
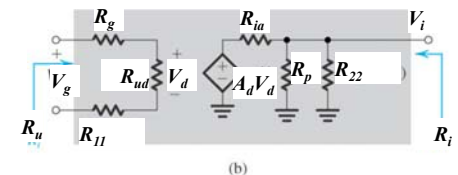
$$1 - A_o B = 1 - 6000(-10^{-3}) = 7$$

$$A_r = \frac{A_o}{1 - A_o B} = \frac{6000}{7} = 857$$

$$R_i = R_{ia} + (R_p \parallel R_{22}) \approx R_{ia} + R_p = 3k\Omega$$

$$R_{ir}' = \frac{R_i}{1 - A_o B} = \frac{3000}{7} = 428\Omega$$

$$R_{ir}' = \frac{R_p R_{ir}}{R_p + R_{ir}} \Rightarrow R_{ir}$$





## Rešenje 9.4:

Za one koji žele da nauče više



Operacioni pojačavač sa slike ima diferencijalno pojačanje  $A_d=80\text{dB}$ , konačnu ulaznu otpornost  $R_{ud}=100\text{k}\Omega$  i izlaznu otpornost  $R_{ia}=1\text{k}\Omega$ . Odrediti  $A_r=V_r/V_g$ ,  $R_{ur}$  i  $R_{ir}$ . Poznato je  $R_g=10\text{k}\Omega$ ,  $R_1=1\text{k}\Omega$ ,  $R_2=1\text{M}\Omega$ ,  $R_p=2\text{k}\Omega$ .

$$R_{11} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \approx 1\text{k}, \quad R_{22} = R_1 + R_2 \approx 1\text{M}$$

$$R_u = R_g + R_{ud} + R_{11} = 10\text{k} + 100\text{k} + 1\text{k} = 111\text{k}\Omega$$

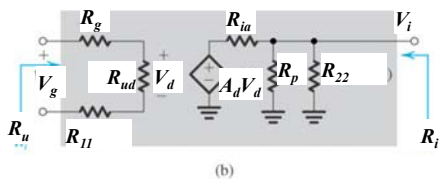
$$R_{ur}' = R_u(1 - A_o B) = 777\text{k}\Omega$$

$$R_{ur} = R_{ur}' - R_g = 776\text{k}\Omega$$

$$R_i = R_{ia} \parallel (R_p \parallel R_{22}) \approx R_{ia} \parallel R_p = 0,66\text{k}\Omega$$

$$R_{ir}' = \frac{R_i}{1 - A_o B} = \frac{666}{7} = 95\Omega$$

$$R_{ir} = \frac{R_p R_{ir}'}{R_p + R_{ir}'} \Rightarrow R_{ir} = \frac{R_p R_{ir}'}{R_p - R_{ir}'} = \frac{2000 \cdot 95}{2000 - 95} = \frac{190000}{1905} \approx 100\Omega$$



Povratna sprega

61

Oscilator sa Vinovim mostom (Wien)

## Domaći 10.1

U kolu sa slike

a) Odrediti polove funkcije 1-AB zanemarujući kolo limitera

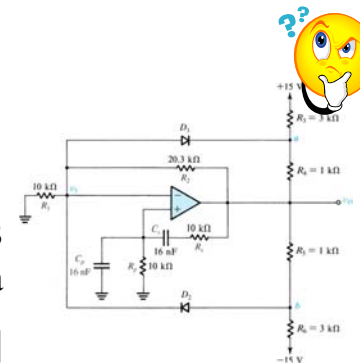
$$[s_{1,2} = (10^5/16)(0.015 \pm j)]$$

b) Naći frekvenciju oscilovanja

$$[f_o = 1\text{kHz}]$$

c) Odrediti amplitudu oscilovanja ako je  $V_D = 0.7\text{V}$

$$[21.36\text{Vpp}]$$



18. decembar 2014.

Oscilatori prostoperiodičnih oscilacija

62

## Rešenje 10.1:

- Odrediti polove funkcije 1-AB zanemarujući kolo limitera
- Naći frekvenciju oscilovanja
- Odrediti amplitudu oscilovanja ako je  $V_D = 0.7\text{V}$ .

$$A(s)B(s) = 1; \quad A(s) = 1 + \frac{R_2}{R_1}; \quad B(s) = \frac{Z_p}{Z_p + Z_s};$$

$$B(s) = \frac{\frac{R_p / sC_p}{R_p + 1/sC_p}}{\frac{R_p / sC_p}{R_p + 1/sC_p} + R_s + 1/sC_s} = \frac{R_p}{1 + R_p sC_p} \cdot \frac{R_p}{R_p + 1/sC_s + R_s + 1/sC_s}$$

$$B(s) = \frac{sC_s R_p}{sC_s R_p + (1 + sC_s R_s)(1 + sC_p R_p)} \Big|_{\substack{R_p = R_s = R \\ C_p = C_s = R}} = \frac{sCR}{1 + 3sCR + s^2 C^2 R^2} = \frac{1}{3 + sCR + 1/(sCR)}$$

$$A(s)B(s) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{3 + sCR + 1/(sCR)} = 1$$

$$3 + sCR + 1/(sCR) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right), \quad \text{zamenom brojnih vrednosti dobija se}$$

$$3 + s \cdot 16 \cdot 10^{-9} \cdot 10^4 + 1/(s \cdot 16 \cdot 10^{-9} \cdot 10^4) = 3,03; \quad s^2 \cdot 256 \cdot 10^{-10} - 0,03s \cdot 16 \cdot 10^{-5} + 1 = 0$$

25. decembar 2014.

Povratna sprega

63

## Rešenje 10.1:

- Odrediti polove funkcije 1-AB zanemarujući kolo limitera
- Naći frekvenciju oscilovanja
- Odrediti amplitudu oscilovanja ako je  $V_D = 0.7\text{V}$ .

$$s_{1,2} = \frac{0,03s \cdot 16 \cdot 10^{-5} \pm \sqrt{9 \cdot 10^{-4} \cdot 256 \cdot 10^{-10} - 4 \cdot 256 \cdot 10^{-10}}}{2 \cdot 256 \cdot 10^{-10}}$$

$$s_{1,2} = \frac{0,03 \cdot 16 \cdot 10^{-5} \pm 16 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{9 \cdot 10^{-4} - 4}}{2 \cdot 256 \cdot 10^{-10}} \approx \frac{0,03 \pm \sqrt{-4}}{32 \cdot 10^{-5}}$$

$$s_{1,2} \approx \frac{0,03 \pm \sqrt{-4}}{32 \cdot 10^{-5}} = \frac{10^{-5}}{16} (0,015 \pm j)$$

$$A(j\omega)B(j\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{3 + j\omega CR + 1/(j\omega CR)} = \frac{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}{3 + j(\omega CR - 1/(\omega CR))}$$

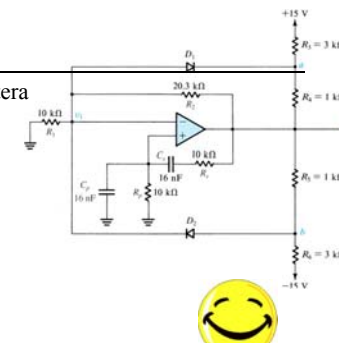
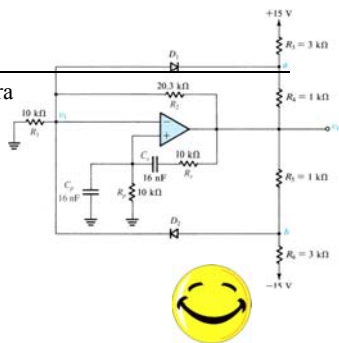
$$\text{Im}\{A(j\omega)B(j\omega)\} = \frac{-j(\omega CR - 1/(\omega CR))(1 + \frac{R_2}{R_1})}{3^2 + (\omega CR - 1/(\omega CR))^2} = 0, \Rightarrow \omega CR - 1/(\omega CR) = 0;$$

$$\omega CR = 1/(\omega CR) \Rightarrow \omega = \frac{1}{CR} = \frac{10^{-5}}{16} \text{ rad/s} \Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = 1\text{kHz}$$

25. decembar 2014.

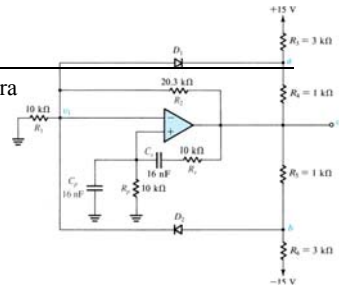
Povratna sprega

64



## Rešenje 10.1:

- a) Odrediti polove funkcije 1-AB zanemarujući kolo limitera  
 b) Naći frekvenciju oscilovanja  
 c) Odrediti amplitudu oscilovanja ako je  $V_D=0.7V$ .



D2 provede za maksimalni napon u tač t "b"

$$V_b = V_I + V_D$$

$$V_I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{o\max} \approx \frac{1}{3} V_{o\max}$$

s druge strane, napon u tač t "b", ako se zanemari struja kroz diodu, približno je jednak :

$$V_b = \frac{R_5}{R_5 + R_6} V_{SS} + \frac{R_6}{R_5 + R_6} V_{o\max}$$

$$\frac{R_5}{R_5 + R_6} V_{SS} + \frac{R_6}{R_5 + R_6} V_{o\max} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{o\max} + V_D \Rightarrow \left( \frac{R_6}{R_5 + R_6} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_{o\max} = +V_D - \frac{R_5}{R_5 + R_6} V_{SS}$$

$$\left( \frac{3}{4} - \frac{10}{30,3} \right) V_{o\max} = +0,7 - \frac{1}{4}(-15) \Rightarrow V_{o\max} = 10,68V, \text{ zbog simetrije } D1, \text{ će provesti pri } V_{o\min} = -10,68V$$

tako da je :

$$V_{opp} = V_{o\max} - V_{o\min} = 2 \cdot 10,68V = 21,36V$$

25. decembar 2014.

Povratna sprega

65

Oscilator sa Vinovim mostom (Wien)



## Domaći 10.2

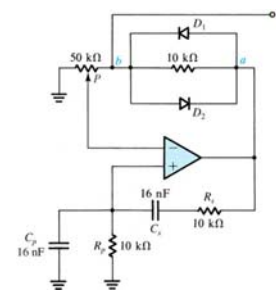
U kolu sa slike

- a) Odrediti položaj potencijometra pri kome se uspostavljaju oscilacije

[20kΩ]

- b) Naći frekvenciju oscilovanja

[ $f_o=1kHz$ ]



18. decembar 2014.

Oscilatori prostoperiodičnih oscilacija

66

## Rešenje 10.2:

- a) Odrediti položaj potencijometra pri kome se uspostavljaju oscilacije  
 b) Naći frekvenciju oscilovanja

$$A(s)B(s) = 1; \quad A(s) = 1 + \frac{R_2}{R_1}; \quad B(s) = \frac{Z_p}{Z_p + Z_s};$$

$$B(s) = \frac{1}{3 + sCR + 1/sCR}$$

$$A(s)B(s) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{3 + sCR + 1/(sCR)} = 1$$

$$R_2 = 10k\Omega + R_X; \quad R_1 = 50k\Omega - R_X$$

$$3 + sCR + 1/(sCR) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right), \text{ za } j\omega_0 CR = -j/(\omega_0 CR)$$

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 3 \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = \frac{10k\Omega + R_X}{50k\Omega - R_X} = 2 \Rightarrow 10k\Omega + R_X = 2 \cdot (50k\Omega - R_X)$$

$$3R_X = 100k - 10k = 90k\Omega \Rightarrow R_X = 30k\Omega$$

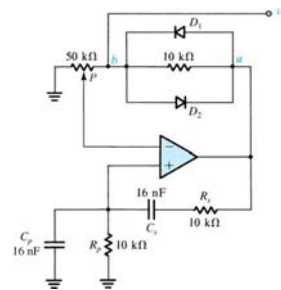
$$\text{Potencijometar: } R_X = 30k\Omega \text{ i } 50k\Omega - R_X = 20k\Omega$$

$$\omega_0 CR = 1/(\omega_0 CR) \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{CR} = \frac{10^{-5}}{16} \text{ rad/s} \Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = 1kHz$$

25. decembar 2014.

Oscilatori prostoperiodičnih oscilacija

67



## POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA



### Domaći 11.1:

Bipolarni tranzistor karakteriše snaga disipacije od  $P_{d0\max} = 2W$ , pri  $T_{O0} = 25^\circ C$  i maksimalna temperatura spoja  $T_{S\max} = 150^\circ C$ .

Odrediti termičku otpornost tranzistora i maksimalnu snagu koju tranzistor može da disipira pri temperaturi okoline  $T_O = 50^\circ C$ .

[]

25. decembar 2014.

Pojačavači velikih signala

68

68

## Rešenje 11.1: POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA



Bipolarni tranzistor karakteriše snaga disipacije od  $P_{d0max}=2W$ , pri  $T_{O0}=25^{\circ}C$  i maksimalna temperatura spoja  $T_{Smax}=150^{\circ}C$ .

Odrediti termičku otpornost tranzistora i maksimalnu snagu koju tranzistor može da disipira pri temperaturi okoline  $T_O=50^{\circ}C$ .

$$T_{Smax} - T_o = R_{th} \cdot P_{dmax} \Rightarrow R_{th} = \frac{T_{Smax} - T}{P_{dmax}} = \frac{150^{\circ} - 25^{\circ}}{2W} = 62,5^{\circ}C/W$$

$$P_{dmax}(T_o = 50^{\circ}C) = \frac{T_{Smax} - T_o}{R_{th}} = \frac{150^{\circ}C - 50^{\circ}C}{62,5^{\circ}C/W} = 1,6W$$

## POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA



### Domaći 11.A: Za one koji žele da nauče više

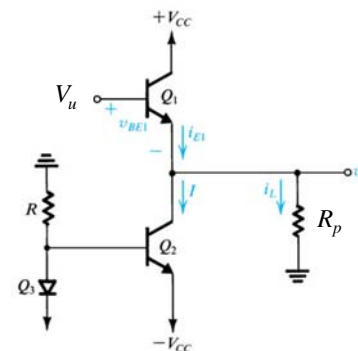
U kolu sa slike poznato je  $V_{CC}=15V$ , tranzistore karakteriše  $V_{CEsat}=0,2V$ ,  $V_{BE}=0,7V$  i  $\beta \gg 1$ . Odrediti:

a) dinamički opseg izlaznog signala;

b) vrednost otpornika  $R$  koja obezbeđuje dovoljnu struju  $I$ , da bi se na otporniku  $R_p$  dobio maksimalni dinamički opseg signala;

c) minimalnu i maksimalnu vrednost emitorske struje.

[0,97k,  $\pm 14,8V$ , 0-29,6mA]



## POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA



### Domaći 11.B: Za one koji žele da nauče više

U kolu sa slike poznato je  $V_{CC}=10V$ ,  $I=100mA$  i  $R_p=100\Omega$ , usvojiti  $V_{CEsat}=0V$  i  $\alpha=1$ . Odrediti:

a) disipaciju snage na svakom od tranzistora kada je  $V_u=0V$ .

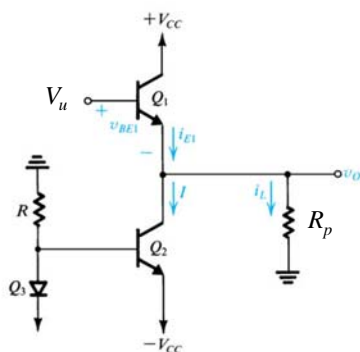
Ukoliko je pojačavač pobuđen prostoperiodičnim signalom najveće moguće amplitude odrediti:

b) disipaciju snage na svakom od tranzistora,

c) snagu na potrošaču i

d) stepen iskorišćenja,

[1W, 1W, 0.5W, 1W, 0.5W, 25%]



## Domaći 11.2: POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA



Za pojačavač sa slike koji radi u klasi B, odrediti

a) vrednost  $V_{CC}$ , tako da bude za 5V veći od maksimalnog napona na potrošaču od  $8\Omega$ , kada se na njemu ostvaruje korisna snaga od 20W.

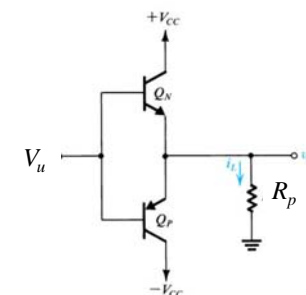
b) maksimalnu struju svakog tranzistora,

c) ukupnu snagu izvora napajanja,

d) stepen korisnog dejstva i

e) maksimalnu disipiranu snagu na svakom tranzistoru.

[ $V_{CC}>22.9V$ ,  $I_{pmax}=2.25A$ ,  $P_{CC}=32.8W$ ,  $\eta=61\%$ ,  $P_{dn}=P_{dp}=6.7W$ ]



## Rešenje 11.2: POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA



Za pojačavač sa slike koji radi u klasi B, odrediti

a) vrednost  $V_{CC}$  tako da bude za 5V veći od maksimalnog napona na potrošaču od  $8\Omega$ , kada se na njemu ostvaruje korisna snaga od 20W.

b) maksimalnu struju svakog tranzistora,

c) ukupnu snagu izvora napajanja,

d) stepen korisnog dejstva i

e) maksimalnu disipiranu snagu na svakom tranzistoru.

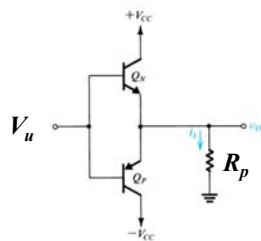
$$a) P_k = \frac{1}{2} \frac{V_{im}^2}{R_p} \Rightarrow V_{im} = \sqrt{2R_p P_k} = \sqrt{2 \cdot 8\Omega \cdot 20W} = 17,88V$$

$$V_{CC} > V_{im} + 5V = 22,88V \text{ usvajamo } V_{CC} = 23V.$$

$$b) I_{C1 \max} = I_{p \max} = \frac{V_{p \max}}{R_p} = \frac{17,88}{8} = 2,24A$$

$$c) P_{CC1} = I_{CC1} \cdot V_{CC} = \frac{1}{\pi} I_{C \max} \cdot V_{CC} = \frac{1}{3,14} \cdot 2,24 \cdot 23 = 16,4W$$

$$P_{CC} = 2P_{CC1} = 32,8W$$



Pojačavači velikih signala

18. decembar 2012.

73 73

## Rešenje 11.2: POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA



Za pojačavač sa slike koji radi u klasi B, odrediti

a) vrednost  $V_{CC}$  tako da bude za 5V veći od maksimalnog napona na potrošaču od  $8\Omega$ , kada se na njemu ostvaruje korisna snaga od 20W.

b) maksimalnu struju svakog tranzistora,

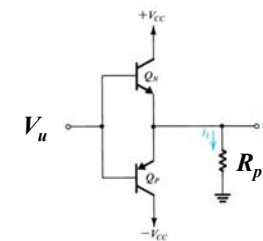
c) ukupnu snagu izvora napajanja,

d) stepen korisnog dejstva i

e) maksimalnu disipiranu snagu na svakom tranzistoru.

$$d) \eta = \frac{P_k}{P_{CC}} \cdot 100 = \frac{20}{32,8} \cdot 100 = 60,98\%$$

$$e) P_{d1} = I_{C1} \cdot V_{CE \max} = \frac{1}{\pi} I_{C \max} \cdot \frac{1}{\pi} V_{CE \max} = \frac{1}{\pi^2} I_{C \max} \cdot V_{CC} = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{V_{CC}^2}{R_p} = 6,7W$$



Pojačavači velikih signala

18. decembar 2012.

74 74

## POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA



### Domaći 11.3:

Za pojačavač sa slike koji radi u klasi B poznato je:  $V_{CC} = 6V$ ,  $R_p = 4\Omega$  i

$\beta_N = \beta_P = 50$ . Izmerena je maksimalna vrednost izlaznog napona

$V_{p \max} = 4.5V$ . Odrediti:

a) Snagu na potrošaču

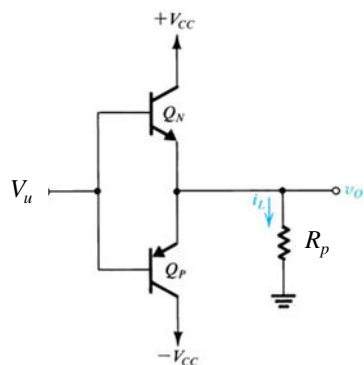
b) Snagu svakog izvora

c) Stepen iskorišćenja

d) Maksimalnu ulaznu struju

e) Snagu disipacije svakog tranzistora.

$$[P_k = 2.53W, P_{CC+} = P_{CC-} = 2.15W, \eta = 59\%, \\ I_{um} = 22.1mA, P_{dn} = P_{dp} = 0.91W]$$



Pojačavači velikih signala

25. decembar 2014.

75 75

## Rešenje 11.3: POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA



Za pojačavač sa slike koji radi u klasi B poznato je:  $V_{CC} = 6V$ ,  $R_p = 4\Omega$  i  $\beta_N = \beta_P = 50$ .

Izmerena je maksimalna vrednost izlaznog napona  $V_{p \max} = 4.5V$ . Odrediti:

a) Snagu na potrošaču

b) Snagu svakog izvora

c) Stepen iskorišćenja

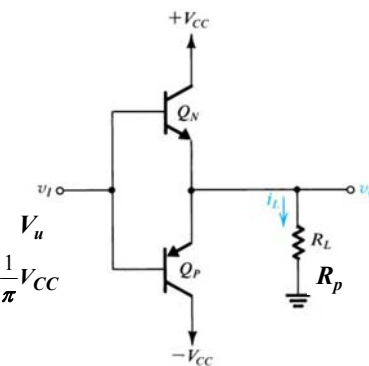
d) Maksimalnu ulaznu struju

e) Snagu disipacije svakog tranzistora.

$$d) I_{u \max} = \frac{I_{C \max}}{\beta} = \frac{1}{\beta+1} \frac{V_{p \max}}{R_p} = \frac{1}{51} \frac{4.5}{4} = 22,1mA$$

$$e) P_{d1} = I_{C1} \cdot V_{C1} = \frac{1}{\pi} \frac{V_{CE \max}}{R_p} \cdot \frac{1}{\pi} V_{CE \max} = \frac{1}{\pi^2} \frac{V_{CC}}{R_p} \cdot \frac{1}{\pi} V_{CC}$$

$$P_{d1} = \frac{1}{3,14^2} \cdot \frac{6}{4} \cdot 6 = 0,91W$$



Pojačavači velikih signala

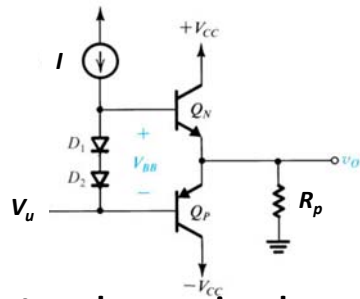
18. decembar 2012.

76 76



**Domaći 11.4:**

Za pojačavač sa slike koji radi u klasi AB poznato je:  $V_{CC} = 15V$ ,  $R_p = 100\Omega$ ; tranzistori su upareni sa  $I_s = 0.1\mu A$  i  $\beta = 50$ , dok za diode važi da je  $I_{sd} = 21I_s$ . Odrediti:



a) Struju  $I$  tako da kroz diode u najnepovoljnijem slučaju protiče struja od 1mA;

a) Lenju struju ( $I_{Cmin}$ );

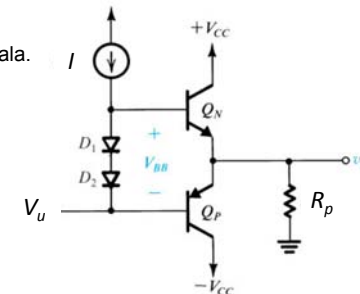
b) Disipaciju svakog tranzistora i

c) jednosmerni napon  $V_{BB}$  u odsustvu ulaznog signala. [ $I = 4mA$ ,  $I_C = 9mA$ ,  $P_d = 270mW$ ,  $V_{BB} = 1.32V$ ]



Za pojačavač sa slike koji radi u klasi AB poznato je:  $V_{CC} = 15V$ ,  $R_p = 100\Omega$ ; tranzistori su upareni sa  $I_s = 0.1\mu A$  i  $\beta = 50$ , dok za diode važi da je  $I_{sd} = 21I_s$ . Odrediti:

- Struju  $I$  tako da kroz diode u najnepovoljnijem slučaju protiče struja od 1mA;
- Lenju struju ( $I_{Cmin}$ );
- Disipaciju svakog tranzistora i
- jednosmerni napon  $V_{BB}$  u odsustvu ulaznog signala. [ $I = 4mA$ ,  $I_C = 9mA$ ,  $P_d = 270mW$ ,  $V_{BB} = 1.32V$ ]



$$a) I = I_{d \min} + I_{B \max} = I_{d \min} + \frac{I_{C \max}}{\beta} = I_{d \min} + \frac{I_{P \max}}{\beta} = I_{d \min} + \frac{V_{CC}}{\beta R_p}$$

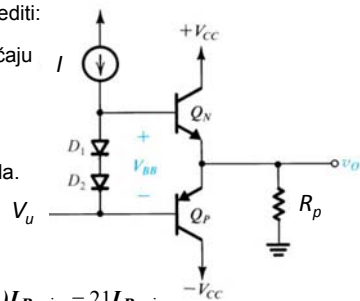
$$I = 1mA + \frac{15}{50 \cdot 100} = 1mA + 3mA = 4mA$$

**Rešenje 11.4:**



Za pojačavač sa slike koji radi u klasi AB poznato je:  $V_{CC} = 15V$ ,  $R_p = 100\Omega$ ; tranzistori su upareni sa  $I_s = 0.1\mu A$  i  $\beta = 50$ , dok za diode važi da je  $I_{sd} = 21I_s$ . Odrediti:

- Struju  $I$  tako da kroz diode u najnepovoljnijem slučaju protiče struja od 1mA;
- Lenju struju ( $I_{Cmin}$ );
- Disipaciju svakog tranzistora i
- jednosmerni napon  $V_{BB}$  u odsustvu ulaznog signala. [ $I = 4mA$ ,  $I_C = 9mA$ ,  $P_d = 270mW$ ,  $V_{BB} = 1.32V$ ]



b)  $I = I_d + I_{B \min}$   
 za  $V_u = 0$ ,  $V_d = V_{BE}$ , a odatle sledi da je  $I_d = (I_{ds}/I_s)I_{B \min} = 21I_{B \min}$   
 $I = I_{d \max} + I_{B \min} = 22I_{B \min} \Rightarrow I_{B \min} = I / 22 = 4 / 22 = 0,18mA$   
 $I_{C \min} = \beta I_{B \min} = 50 \cdot 0,18 = 9mA$

c)  $P_{do} \approx 2(I_{C \min} V_{CC}) = 2 \cdot 9mA \cdot 15V = 270mW$

d)  $I_{d \max} = I_{ds}(e^{V_d/V_T} - 1) \Rightarrow (V_d/V_T) = \ln(I_{d \max}/I_{ds}) + 1$   
 $V_{BB} = 2V_d = 2V_T(\ln(21 \cdot 0,18mA / 0.1\mu A) + 1) = 2 \cdot 0.026(24.4 + 1) = 1,32V$

3. Filtriranje usmerenog napona

Kapacitivni filter

**Domaći 12.1:**



**Potrošač  $R = 100\Omega$  priključen je preko usmerača sa Grecovim spojem na naizmenični napon frekvencije 50Hz i amplitude 12V. Ako je pad napona na diodama  $V_d = 0.8V$  odrediti:**

- vrednost  $C$  kapacitivnog filtra priključenog paralelno potrošaču koja će obezbediti odstupanje napona  $\Delta V < 1V$ ;
- vrednost jednosmernog napona na potrošaču;
- vrednost jednosmerne struje kroz potrošač;

## Rešenje 12.1:

### 4. Filtriranje usmerenog napona



Potrošač  $R=100\Omega$  priključen je preko usmerača sa Grecovim spojem na naizmenični napon frekvencije 50Hz i amplitude 12V. Ako je pad napona na diodama  $V_d=0.8V$  odrediti:

- vrednost C kapacitivnog filtra priključenog paralelno potrošaču koja će obezbediti odstupanje napona  $\Delta V < 1V$ ;
- vrednost jednosmernog napona na potrošaču;
- vrednost jednosmerne struje kroz potrošač;

$$a) \Delta V_o = \frac{V_m - 2V_d}{2 \cdot f \cdot R \cdot C} \Rightarrow C = \frac{V_m - 2V_d}{2 \cdot f \cdot R \cdot \Delta V_o} = \frac{12 - 1,6}{2 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 1} = 1,04 \mu F$$

$$b) V_o = \frac{V_m'}{\left(1 + \frac{\pi}{\omega RC}\right)} = \frac{(V_m - 2V_d)}{\left(1 + \frac{1}{2fRC}\right)} = \frac{10,4}{\left(1 + \frac{1}{2 \cdot 50 \text{Hz} \cdot 100\Omega \cdot 1,04 \mu F}\right)}$$

$$V_o = (V_m - 2V_d) \cdot \frac{\Delta V_o}{2} = 12 - 1,6 - 1 = 9,4V$$

$$c) I_o = \frac{V_o}{R} = 94mA$$

81

### 3. Filtriranje usmerenog napona

#### Kapacitivni filter

#### Domaći 12.2:



Za usmerač sa kapacitivnim filtrom iz prethodnog primera odrediti:

- ugao provođenja diode i iskazati ga u % u odnosu na periodu ulaznog signala (50Hz);
- srednju struju kroz diodu;
- maksimalnu struju kroz diodu;
- maksimalni inverzni napon na diodi;
- predložiti tip diode koji se može primeniti za ovu namenu

**Za one koji žele da nauče više**

08. januar 2015.

Izvori jednosmernog napajanja

82

## Rešenje 12.2:

### 4. Filtriranje usmerenog napona



Za usmerač sa kapacitivnim filtrom iz prethodnog primera odrediti:

- ugao provođenja diode i iskazati ga u % u odnosu na periodu ulaznog signala (50Hz);
  - srednju struju kroz diodu;
  - maksimalnu struju kroz diodu;
  - maksimalni inverzni napon na diodi;
  - predložiti tip diode koji se može primeniti za ovu namenu
- Za one koji žele da nauče više**

$$a) \omega \Delta t \approx \sqrt{2\Delta V/V_m'} \Rightarrow \Delta t = \frac{\sqrt{2\Delta V/V_m'}}{\omega} = \frac{\sqrt{2\Delta V/V_m'}}{2\pi} T$$

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\sqrt{2\Delta V/(V_m - 2V_d)}}{2\pi} \cdot 100 = \frac{\sqrt{2 \cdot 1/10,4}}{2 \cdot 3,14} \cdot 100 = 5,9\%$$

$$b) I_D \approx I_o \left(1 + \pi \sqrt{\frac{V_m'}{2\Delta V}}\right) = I_o \left(1 + \pi \sqrt{\frac{(V_m - 2V_d)}{2\Delta V}}\right) = 94mA \cdot 7,16 = 673,4mA$$

$$c) I_{Dmax} \approx I_o \left(1 + 2\pi \sqrt{\frac{V_m'}{2\Delta V}}\right) = I_o \left(1 + 2\pi \sqrt{\frac{(V_m - 2V_d)}{2\Delta V}}\right) = 94mA \cdot 15,33 = 1,53A$$

08. januar 2015.

Izvori jednosmernog napajanja

83

## Rešenje 12.2:

### 4. Filtriranje usmerenog napona



Za usmerač sa kapacitivnim filtrom iz prethodnog primera odrediti:

- ugao provođenja diode i iskazati ga u % u odnosu na periodu ulaznog signala (50Hz);
  - srednju struju kroz diodu;
  - maksimalnu struju kroz diodu;
  - maksimalni inverzni napon na diodi;
  - predložiti tip diode koji se može primeniti za ovu namenu
- Za one koji žele da nauče više**

$$d) -V_{dmax} = \frac{V_m - 2V_d - (-V_m)}{2} = \frac{2V_m - 2V_d}{2} = V_m - V_d = 11,2V > 12V$$

$$e) P_d = V_d I_D = 0,8V \cdot 673,4mA = 538,7mW$$

Videti: pod Silicon Rectifier Diodes na

<http://www.fagorelectronica.com/semi/pdf/producto/1n4000.pdf>

**1N4001** zadovoljava jer je

Peak recurrent reverse voltage (V)  $V_{RRM} = 30V > 12V$

Forward current at  $T_{amb} = 75^\circ C$   $I_{F(AV)} = 1A > 0,673A$

Recurrent peak forward current  $I_{FRM} = 10A > 1,53A$

84

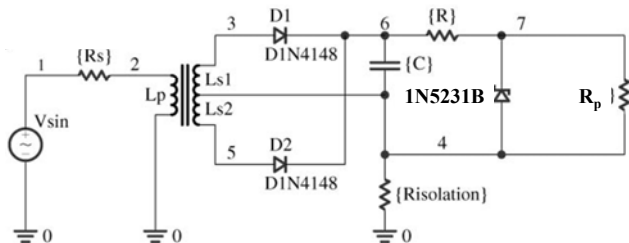


### 4.1.1 Stabilizatori - regulatori napona sa Zener diodom



#### Domaći 13.1:

Odrediti R i C u stabilizatoru sa slike tako da jednosmerni napon na potrošaču  $R_{pmin} = 200\Omega$  bude 5V, a  $\Delta V_{Cmax} = 0.5V$ . Upotrebite zener diodu 1N5231B iz Tabele 1. Usvojiti da je efektivna vrednost napona na izlazu transformatora 2x12V i da je na diodama 1N4148 pad napona  $V_D = 0.7V$  kada vode.



08. januar 2015.

Izvori jednosmernog napajanja

85

#### Rešenje 13.1:



Odrediti R i C u stabilizatoru sa slike tako da jednosmerni napon na potrošaču

$R_{pmin} = 200\Omega$  bude 5V, a  $\Delta V_{Cmax} = 0.5V$ . Upotrebite zener diodu 1N5231B iz Tabele 1. Usvojiti da je efektivna vrednost napona na izlazu transformatora 2x12V i da je na diodama 1N4148 pad napona  $V_D = 0.7V$  kada vode.

$$V_{Z0} = 5.1V @ I_{Z0} = 20mA$$

$$r_z = 17\Omega @ I_{Z0} = 20mA$$

$$\Delta V_Z = V_{Z0} - V_{os} = 5.1 - 5 = 0.1V$$

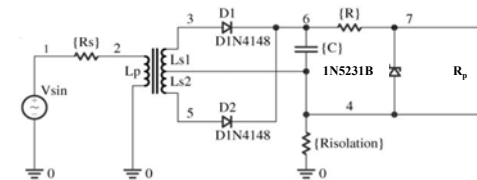
$$\Delta I_Z = \frac{\Delta V_Z}{r_z} = \frac{0.1V}{17\Omega} = 5.88 \approx 6mA$$

$$I_{Zmin} = I_{Z0} - \Delta I_Z = 20 - 6 = 14mA$$

$$I_{pmax} = \frac{V_{os}}{R_{pmin}} = \frac{5V}{200\Omega} = 25mA$$

$$R = \frac{V_{Cmin} - V_{os}}{I_{Zmin} + I_{pmax}} = \frac{(V_m - V_D) - \Delta V - V_{os}}{I_{Zmin} + I_{pmax}}$$

$$R = \frac{(\sqrt{2} \cdot 12 - 0.7) - 0.5 - 5}{14mA + 25mA} = \frac{10.77V}{39mA} = 276\Omega \approx 280\Omega$$



Dvostranusmeravanj:

$$\Delta V_{Cmax} = \frac{V_m - V_D}{2fCR}$$

$$C = \frac{V_m - V_D}{2f \cdot R \cdot \Delta V}$$

$$C = \frac{\sqrt{2} \cdot 12 - 0.7}{2 \cdot 50 \cdot 276 \cdot 0.5} = \frac{16.27}{1380} = 1.18mF \approx 1.2mF$$

15. januar 2015.

Izvori jednosmernog napajanja

86

#### Domaći 13.2:

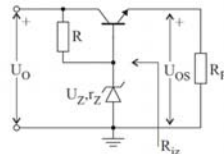


Za kolo rednog stabilizatora prikazanog na slici odrediti:

- Izlazni napon  $V_{OS}$
- Faktor stabilizacije
- Izlaznu otpornost  $R_{iz}$

Poznato je:  $R = 200\Omega$ ;  $R_p = 50\Omega$ ;  $V_O = 10V$ . Parametri diode su:  $V_Z = 6.8V$ ;  $r_Z = 10\Omega$ .

Parametri tranzistora su:  $V_{BE} = 0.7V$ ;  $h_{11E} = 1k\Omega$ ;  $h_{12E} = 0$ ;  $h_{21E} = \beta = 100$ ;  $h_{22E} = 0$ .



#### Rešenje 13.2:



Videti: Zadatak 6.1 u „Računske vežbe II deo“ na

<http://leda.elfak.ni.ac.rs/?page=education/elektronika/elektronika.htm>

15. januar 2015.

Izvori jednosmernog napajanja

87

#### Domaći 13.3:



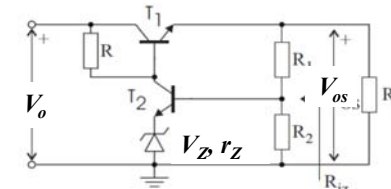
Za kolo rednog stabilizatora prikazanog na slici odrediti:

- Izlazni napon  $V_{OS}$
- Faktor stabilizacije
- Izlaznu otpornost  $R_{iz}$

**Za one koji žele da nauče više**

Poznato je:  $R_1 = R_2 = 4k\Omega$ ;  $R_p = 2\Omega$ ;  $R = 10k\Omega$ ;  $V_O = 40V$ . Parametri diode su:  $V_Z = 10V$ ;

$r_Z = 0\Omega$ . Parametri tranzistora su:  $V_{BE} = 0.7V$ ;  $h_{11E} = 1k\Omega$ ;  $h_{12E} = 0$ ;  $h_{21E} = \beta = 100$ ;  $h_{22E} = 0$ .



#### Rešenje 13.3:



Videti: Zadatak 6.2 u „Računske vežbe II deo“ na

<http://leda.elfak.ni.ac.rs/?page=education/elektronika/elektronika.htm>

15. januar 2015.

Izvori jednosmernog napajanja

88