

Problema nr. 1

ș.l. Arcadie Cracan, conf. Neculai Cojan, ETTI, Iași

23 martie 2018

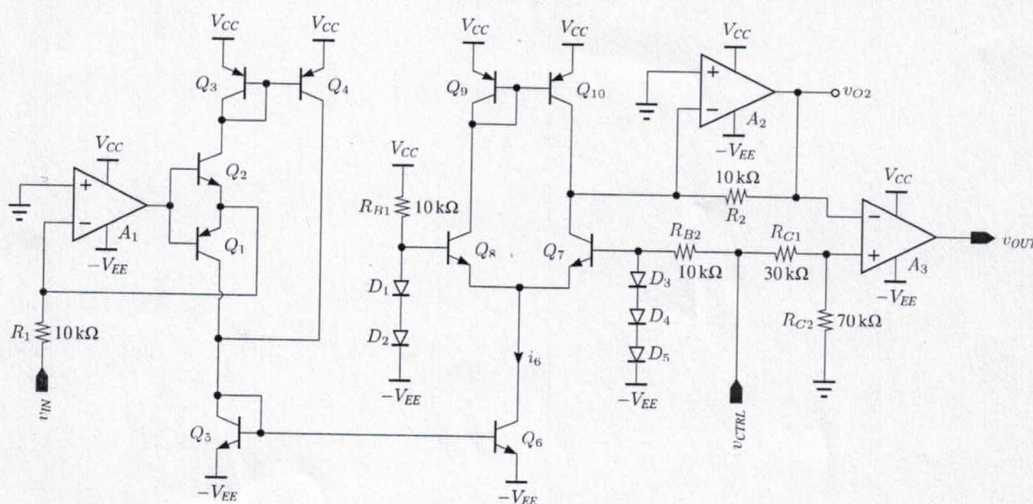


Figura 1: Circuit care prezintă o caracteristică de transfer neliniară

În circuitul din figura 1 se consideră că:

- amplificatoarele operaționale sunt ideale și alimentate cu sursă dublă ($V_{OH} = V_{CC}$, $V_{OL} = -V_{EE}$, unde V_{OH} este tensiunea maximă din ieșirea amplificatorului operațional iar V_{OL} este tensiunea minimă din ieșirea amplificatorului operațional);
- toate tranzistoarele bipolare au factorul de amplificare în curent $\beta = \infty$, nu prezintă efectul de modulație a grosimii bazei (rezistența de ieșire de semnal mic din colector este infinită) și toate tranzistoarele de același tip sunt identice;
- tensiunea de deschidere a tranzistoarelor bipolare se va considera $V_{BEon} = V_{EBon} = 0,6 \text{ V}$, iar tensiunea pe o diodă în conducție se va considera $V_{Don} = 0,6 \text{ V}$;
- $V_{CC} = V_{EE} = 10 \text{ V}$;
- $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_{B1} = R_{B2} = 10 \text{ k}\Omega$;
- $R_{C1} = 70 \text{ k}\Omega$; $R_{C2} = 30 \text{ k}\Omega$.

Pentru circuitul din figura 1 se cere:

1. Să se determine relația dintre i_6 (curentul din colectorul lui Q_6) și v_{IN} .
2. Să se determine relația dintre v_{O2} și i_6 în funcție de valoarea tensiunii v_{CTRL} :
 - (a) $v_{CTRL} = 10 \text{ V}$,
 - (b) $v_{CTRL} = -10 \text{ V}$.
3. Să se traseze caracteristica de transfer $v_{OUT}(v_{IN})$ și să se precizeze valorile pragurilor pentru cazurile
 - (a) $v_{CTRL} = 10 \text{ V}$ și
 - (b) $v_{CTRL} = -10 \text{ V}$.

Problema 1

Soluție

3p

1. Datorită reacției negative în circuitul cu A_1 , Q_1 , $Q_2 \Rightarrow v_1^- = 0$ (potențialul bornei inversoare a amplificatorului A_1). Prin urmare curentul prin R_1 are expresia

$$i_{R1} = \frac{v_{IN}}{R_1}$$

Acest curent se încheie prin Q_1 dacă $v_{IN} < 0$ și prin Q_2 dacă $v_{IN} > 0$. Astfel că

$$i_1 = \begin{cases} \frac{v_{IN}}{R_1}, & v_{IN} \geq 0 \\ 0, & v_{IN} < 0 \end{cases}$$

$$i_2 = \begin{cases} 0, & v_{IN} \geq 0 \\ -\frac{v_{IN}}{R_1}, & v_{IN} < 0 \end{cases}$$

Curentul prin tranzistorul-diodă Q_5 este

$$i_5 = i_1 + i_4 = i_1 + i_3 = i_1 + i_2$$

Prin urmare expresia lui $i_6 = i_5$ are forma

$$i_6 = \begin{cases} \frac{v_{IN}}{R_1}, & v_{IN} \geq 0 \\ -\frac{v_{IN}}{R_1}, & v_{IN} < 0 \end{cases}$$

sau, mai compact,

$$i_6 = \left| \frac{v_{IN}}{R_1} \right|$$

3p

2. Atunci când $v_{CTRL} = 10 \text{ V}$, diodele D_3 , D_4 și D_5 sunt în conducție, prin urmare potențialul din baza tranzistorului Q_7 este $3V_{Don} - V_{EE}$, iar potențialul din emitorul tranzistorului Q_7 este $3V_{Don} - V_{BEon} - V_{EE} = 2V_{Don} - V_{EE}$.

Deoarece potențialul din baza tranzistorului Q_8 este $2V_{Don} - V_{EE}$, rezultă că atunci când $v_{CTRL} = 10 \text{ V}$ tranzistorul Q_8 este blocat. Prin urmare curentul lui Q_6 va circula prin Q_7 .

Atunci când $v_{CTRL} = -10 \text{ V}$ tranzistorul Q_7 este blocat, iar curentul lui Q_6 va circula prin Q_8 .

$$i_7 = \begin{cases} i_6, & v_{CTRL} = 10 \text{ V} \\ 0, & v_{CTRL} = -10 \text{ V} \end{cases}$$

$$i_8 = \begin{cases} 0, & v_{CTRL} = 10 \text{ V} \\ i_6, & v_{CTRL} = -10 \text{ V} \end{cases}$$

Reacția negativă prin R_2 în jurul lui A_2 va face ca tot curentul din Q_8 și Q_{10} să fie absorbit în R_2 :

$$i_{R2} = i_7 - i_{10}$$

unde i_{R2} este măsurat în sensul de la ieșirea lui A_2 spre borna inversoare a lui A_2 . Dar $i_{10} = i_9 = i_8 \Rightarrow$

$$i_{R2} = \begin{cases} i_6, & v_{CTRL} = 10 \text{ V} \\ -i_6, & v_{CTRL} = -10 \text{ V} \end{cases}$$

$$i_{R2} = \begin{cases} \left| \frac{v_{IN}}{R_1} \right|, & v_{CTRL} = 10 \text{ V} \\ -\left| \frac{v_{IN}}{R_1} \right|, & v_{CTRL} = -10 \text{ V} \end{cases}$$

Tensiunea din ieșirea lui A_2 , v_{O2} , are expresia $v_{O2} = R_2 i_{R2}$ și, prin urmare,

$$v_{O2} = \begin{cases} R_2 i_{R2}, & v_{CTRL} = 10V \\ -R_2 i_{R2}, & v_{CTRL} = -10V \end{cases} \quad v_{O2} = \begin{cases} \left| \frac{v_{IN}}{R_1} \right| R_2, & v_{CTRL} = 10V \\ -\left| \frac{v_{IN}}{R_1} \right| R_2, & v_{CTRL} = -10V \end{cases} \quad 0,5p$$

3. Amplificatorul A_3 are rol de comparator în buclă deschisă. Tensiunea din ieșirea lui A_3 va fi pozitivă (V_{OH}) dacă tensiunea din divizorul R_{C1} , R_{C2} , $v_{DIV} = R_{C2}/(R_{C1} + R_{C2})v_{CTRL}$ este mai mare decât tensiunea din ieșirea lui A_2 și negativă (V_{OL}) în caz contrar. Putem scrie

$$v_{O3} = \begin{cases} V_{OH}, & v_{DIV} \geq v_{O2} \\ V_{OL}, & v_{DIV} < v_{O2} \end{cases}$$

În primul caz, atunci când $v_{CTRL} = 10V$, tensiunea din divizor rezultă $v_{DIV} = 30/100 \cdot 10 = 3V$, iar v_{O2} are expresia $v_{O2} = |v_{IN}|$, prin urmare

$$v_{O3} = \begin{cases} V_{OH}, & 3 \geq |v_{IN}| \Leftrightarrow -3 \leq v_{IN} \leq 3 \\ V_{OL}, & 3 < |v_{IN}| \Leftrightarrow v_{IN} < -3 \text{ sau } v_{IN} > 3 \end{cases} \quad 0,5p$$

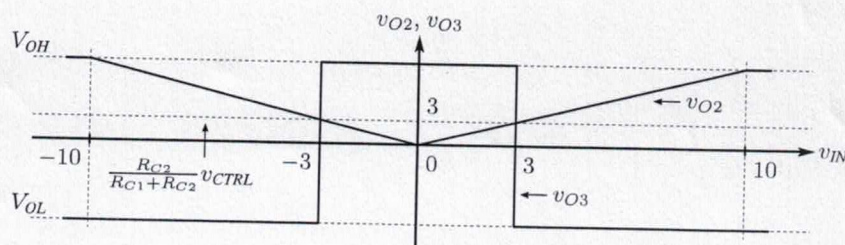


Figura 2: Caracteristica de transfer $v_{OUT}(v_{IN})$ pentru $v_{CTRL} = 10V$

În cel de-al doilea caz, atunci când $v_{CTRL} = -10V$, tensiunea din divizor rezultă $v_{DIV} = 30/100 \cdot (-10) = -3V$, iar v_{O2} are expresia $v_{O2} = -|v_{IN}|$, prin urmare

$$v_{O3} = \begin{cases} V_{OH}, & -3 \geq -|v_{IN}| \Leftrightarrow v_{IN} \leq -3 \text{ sau } v_{IN} \geq 3 \\ V_{OL}, & -3 < -|v_{IN}| \Leftrightarrow -3 < v_{IN} < 3 \end{cases} \quad 0,5p$$

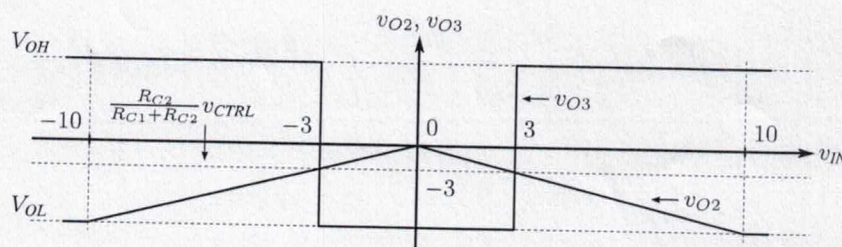


Figura 3: Caracteristica de transfer $v_{OUT}(v_{IN})$ pentru $v_{CTRL} = -10V$

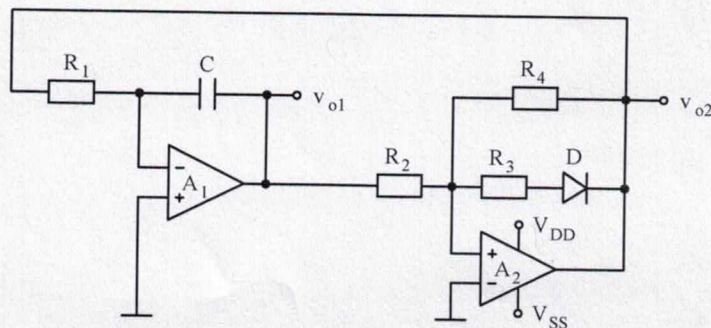
Problema nr. 2

s. l. dr ing. Radu Belea, Universitatea Galati

Circuitul din figură conține o pereche de amplificatoare operaționale de tip "rail to rail" ($V_{oH} = V_{DD}$ și $V_{oL} = V_{SS}$). Se cunosc: $R_1 = 120 \text{ k}\Omega$, $C = 1.5 \text{ nF}$, $R_2 = 12 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 47 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 64 \text{ k}\Omega$, $V_{DD} = 5 \text{ V}$, $V_{SS} = -5 \text{ V}$ și $V_D = 0 \text{ V}$ (căderea de tensiune pe dioda polarizată direct).

Se cer:

- Calculați V_{PS} , V_{PJ} , tensiunile de prag ale comparatorului.
- Calculați ΔV , tensiunea vârf-la-vârf a semnalului triunghiular generat de circuit.
- Calculați Δt_c și Δt_d intervalele de timp de creștere și respectiv de descreștere ale semnalului triunghiular și frecvența celor două semnale: v_{o1} și v_{o2} .
- Desenați formele de undă ale semnalelor $v_{o1}(t)$ și $v_{o2}(t)$. Marcați pe reprezentarea grafică tensiunile: V_{oH} , V_{oL} , V_{PS} , V_{PJ} și intervalele de timp Δt_c și Δt_d .



Problem 2

Rezolvare:

- 3p. a. Pentru că amplificatorul este de tip "rail to rail", tensiunile de saturație sunt egale cu tensiunile de alimentare. Amplificatorul operațional A_2 are reacție pozitivă, deci lucrează în comutație. În consecință semnalul digital v_{o2} are nivelele V_{DD} și V_{SS} .

Pentru $v_{o2} = V_{DD}$, dioda este blocată și calculăm tensiunea de prag V_{PJ} :

$$V_{PJ} = -\frac{R_2}{R_4} V_{DD} = -\frac{12 \text{ k}\Omega}{64 \text{ k}\Omega} 5 \text{ V} = \underline{-0.94 \text{ V}}$$

Pentru $v_{o2} = V_{SS}$, dioda conduce și calculăm $R_{ech} = R_3 || R_4$ și tensiunea de prag V_{PS} :

$$R_{ech} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{47 \text{ k}\Omega \times 64 \text{ k}\Omega}{47 \text{ k}\Omega + 64 \text{ k}\Omega} = 27 \text{ k}\Omega$$

$$V_{PS} = -\frac{R_2}{R_4} V_{SS} = -\frac{12 \text{ k}\Omega}{27 \text{ k}\Omega} (-5 \text{ V}) = \underline{2.21 \text{ V}}$$

- 1p b. Tensiunea vârf-la-vârf a semnalului triunghiular este:

$$\Delta V = V_{PS} - V_{PJ} = 2.21 \text{ V} - (-0.94 \text{ V}) = \underline{3.15 \text{ V}}$$

- 3p. c. pentru că $V_{DD} = -V_{SS}$ avem $\Delta t_c = \Delta t_d$.

$$\Delta t_c = \Delta t_d = \frac{\Delta V R_1 C}{V_{DD}} = \frac{3.15 \text{ V} \times 120 \times 10^3 \Omega \times 1.5 \times 10^{-9} \text{ F}}{5 \text{ V}} = \frac{3.15 \times 120 \times 1.5}{5} 10^{-6} \text{ s} = 113.46 \mu\text{s}$$

$$f = \frac{1}{\Delta t_c + \Delta t_d} = \frac{1}{2 \times 113.46 \mu\text{s}} = \frac{500}{113.46} \text{ kHz} = 4.4 \text{ kHz}$$

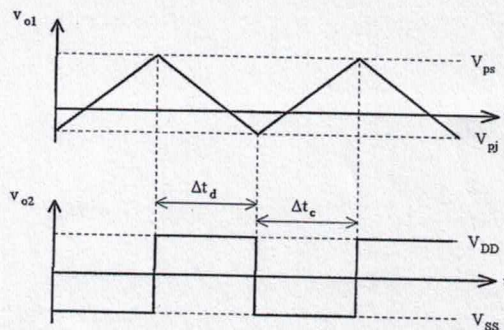
Variantă:

$$I_C = \pm \frac{V_{OH}}{R_1} = \pm \frac{|V_{OL}|}{R_1} = \frac{5 \text{ V}}{120 \text{ k}\Omega} = \pm 4.166 \mu\text{A}$$

$$\Delta t_c = \Delta t_d = \frac{\Delta V \cdot C}{I_C} = \frac{3.15 \text{ V} \times 1.5 \times 10^{-9} \text{ F}}{4.1 \times 10^{-6} \frac{\text{V}}{\Omega}} =$$

$$\approx 113 \mu\text{s}$$

- 3p d. Formele de undă ale semnalelor $v_{o1}(t)$ și $v_{o2}(t)$ sunt:

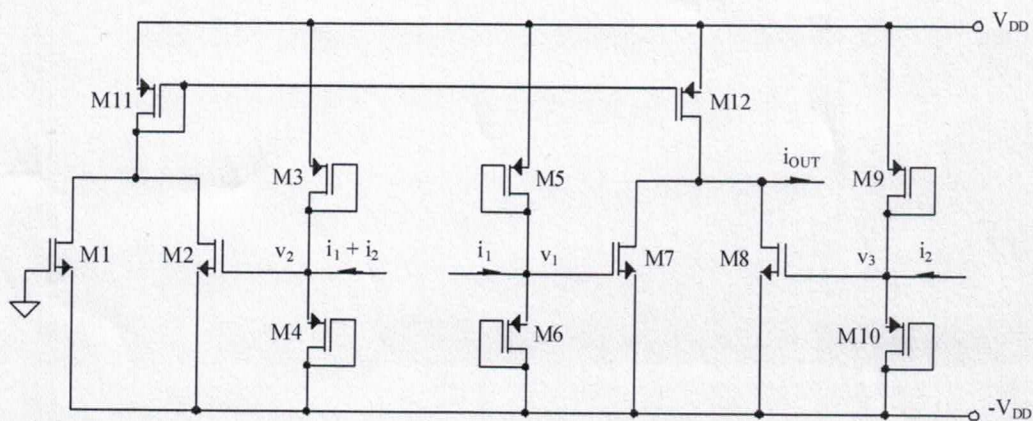


Problema 3 - Universitatea Politehnica din Bucuresti

Se consideră circuitul din figura următoare. Toate tranzistoarele de același tip sunt identice și polarizate în saturație, prezentând o dependență a curentului de drenă de tensiunea grilă-sursă exprimată prin relația:

$$I_D = \frac{K}{2}(V_{GS} - V_T)^2, \quad (1)$$

K și V_T fiind parametri ai tranzistorului MOS.



- Să se determine expresiile potențialelor v_1 , v_2 și v_3 în funcție de curenții de intrare i_1 și i_2
- Să se determine expresia curentului de ieșire, i_{OUT} , în funcție de curenții de intrare, i_1 și i_2 .
- Ce funcție realizează circuitul? Ce erori afectează funcția realizată?

Problema 3 - Bucuresti
Rezolvare

a.

$$\frac{K}{2}(V_{DD} - v_1 - V_T)^2 + i_1 = \frac{K}{2}(v_1 + V_{DD} - V_T)^2 \quad - 1p$$

Rezulta:

$$v_1 = \frac{i_1}{2K(V_{DD} - V_T)} \quad - 1p$$

Similar:

$$v_2 = \frac{i_1 + i_2}{2K(V_{DD} - V_T)} \quad - 1p$$

$$v_3 = \frac{i_2}{2K(V_{DD} - V_T)} \quad - 1p$$

4p

b.

$$i_{OUT} = i_{D1} + i_{D2} - i_{D7} - i_{D8} \quad - 0,5p$$

$$i_{D1} = \frac{K}{2}(V_{DD} - V_T)^2 \quad - 0,5p$$

$$i_{D2} = \frac{K}{2}(v_2 + V_{DD} - V_T)^2 = \frac{K}{2} \left[\frac{i_1 + i_2}{2K(V_{DD} - V_T)} + V_{DD} - V_T \right]^2 \quad - 1p$$

$$i_{D7} = \frac{K}{2}(v_1 + V_{DD} - V_T)^2 = \frac{K}{2} \left[\frac{i_1}{2K(V_{DD} - V_T)} + V_{DD} - V_T \right]^2 \quad - 1p$$

$$i_{D8} = \frac{K}{2}(v_3 + V_{DD} - V_T)^2 = \frac{K}{2} \left[\frac{i_2}{2K(V_{DD} - V_T)} + V_{DD} - V_T \right]^2 \quad - 1p$$

5p

Deci:

$$i_{OUT} = \frac{i_1 i_2}{4K(V_{DD} - V_T)^2} \quad - 1p$$

c. Multiplicator cu intrare in curent si iesire in curent.

- 0,5p

Erori cauzate de dependenta curentului i_{OUT} de K , V_{DD} si de V_T .

- 0,5p

1p

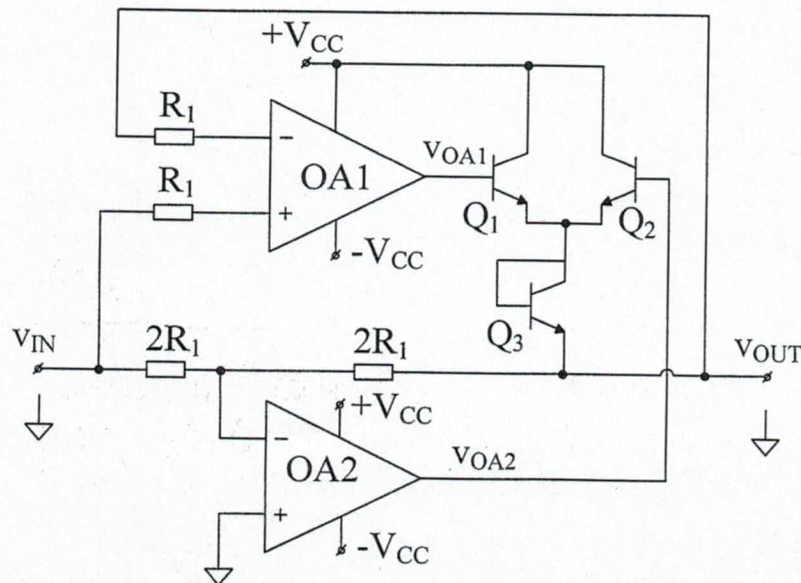
Problema 4

Conf. dr. ing. Marius Neag, Cluj-Napoca

Pentru circuitul din figură se dau:

OA1 și OA2 ideale cu următoarele excepții:

- rezistența între fiecare intrare și masă, R_{inOA} , finită; $R_{inOA} \gg R_1$
- GBW_{OA} finit; excursia tensiunii de ieșire: $[-V_{CC}, +V_{CC}]$



pt. transistoari Q_1, Q_2, Q_3 : $V_{BE_{on}} = 0.6V$, se neglijează efectul Early
se cere: (Rezistența de ieșire este infinită)

a) caracteristica de transfer $V_{OUT} = f(V_{IN})$
când $V_{IN} \in (-V_{CC}, +V_{CC})$

b) Desenați $V_{OUT}(t)$ dacă la intrare se aplică o tensiune sinusoidală cu amplitudinea mult mai mică decât V_{CC} și frecvența mult mai mică decât GBW_{OA}

c) frecvența maximă a tensiunii sinusoidale aplicată la intrare pentru care circuitul își păstrează funcția determinată la punctul b).

Problema 4 - Soluție

(Q1, Q2, Q3)

a) Pentru $V_{in} < 0$, NU există reacție negativă în jurul lui AO1 (1p)
 - presupunem, prin absurd, că NU există reacție negativă în jurul lui AO2 $\Rightarrow V_2^+ = 0$

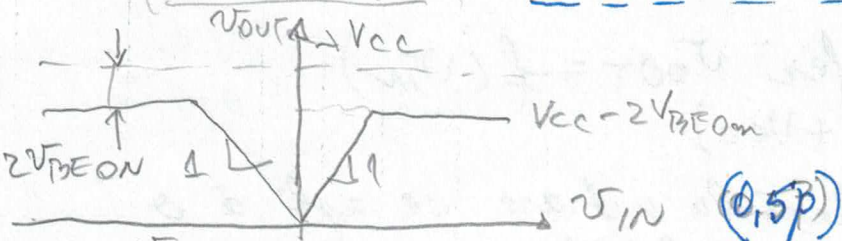
$$V_2^- = \frac{R_{inOA}}{R_{inOA} + 2R_1} \cdot V_{in} < 0 \quad \left. \vphantom{V_2^-} \right\} \Rightarrow V_{OA2} \nearrow +V_{CC} \Rightarrow Q_2 \text{ și } Q_3 \text{ deschise (1p)}$$

$\Rightarrow \exists$ R.N. în jurul lui AO2 $\Rightarrow \boxed{V_{OUT} = -V_{in}} \dots (1p)$

• Pentru $V_{in} > 0$, NU există R.N. în jurul lui AO2 (1p) (Q2 = cl.)
 - presupunem, prin absurd, că NU există RN în jurul lui AO1 $\Rightarrow$

$\Rightarrow V_1^+ = \frac{R_{inOA}}{R_{inOA} + R_1} \cdot V_{in}$
 $V_1^- = \frac{R_{inOA}}{R_{inOA} + 5R_1} \cdot V_{in} \quad \left. \vphantom{V_1^-} \right\} \Rightarrow V_1^+ > V_1^- \Rightarrow V_{OA1} \nearrow +V_{CC}$
 $\Rightarrow Q_1 \text{ și } Q_3 \text{ se deschid. (1p)}$

$\Rightarrow \exists$ reacție negativă cu $R_n = \frac{R_{inOA}}{R_{inOA} + R_1}$
 $\exists$ reacție pozitivă cu $R_p = \frac{R_{inOA}}{R_{inOA} + 5R_1} \quad \left. \vphantom{R_p} \right\} \Rightarrow \text{reacția globală este negativă} \dots (1p)$
 $\Rightarrow \boxed{V_{OUT} = V_{in}} \dots (1p)$



b) V_{OUT} vs t (0.5p) redresor dublu alternant (0.5p)
 The graph shows a full-wave rectified sine wave. The output voltage is always positive, following the absolute value of the input sine wave. The graph is labeled (0.5p).

c) • pentru $V_{in} < 0$: V_{OUT} e generat de OA2 în configurație INVERSEARE $\Rightarrow BW_{neg} = \frac{GBW_{OA}}{1 + \frac{2R_1}{2R_1}} = \frac{GBW_{OA}}{2}$ (0.5p)

• pentru $V_{in} > 0$: V_{OUT} e generat de OA1 în configurație REPEATOR $\Rightarrow BW_{pos} = GBW_{OA}$ (0.5p)

Pentru redresorul dublu alternant:
 $BW = \min(BW_{neg}, BW_{pos}) = \frac{GBW_{OA}}{2}$ (0.5p)