

Problema 1 UNST Politehnica Bucuresti, 5 Aprilie 2024

Dr. Ing. Daniel LEONESCU, Ș.I. Dr. Ing. Marius ENACHESCU

- Considerați schema din Figura 1, care constituie o componentă a unui sistem integrat realizat în tehnologia CMOS.
- Pentru tranzistoarele de tip **NMOS** sunt cunoscute următoarele caracteristici:
 - Tensiunea de prag $V_{tn} = 0,8V$, $k_n' = \mu_n C_{ox} = 100\mu A/V^2$
 - Raportul (W/L) pentru MN1, MN2 și MN3 este de 8/2;
 - Raportul (W/L) pentru MN0 și MN4, raportul este de 16/2.
- Pentru tranzistoarele de tip **PMOS**, se cunosc următoarele:
 - Tensiunea de prag $V_{tp} = -0,75V$, $k_p' = \mu_p C_{ox} = 35\mu A/V^2$
 - Raportul (W/L) pentru MP1 și MP2 este de 24/2.
- Utilizați:
 - Tensiunea de alimentare, $V_{DD} = 5V$
 - Curentul de polarizare, $I_{b1} = 5\mu A$ (sursă de curent ideală)
 - Rezistența $R1 = 40k\Omega$
- Amplificatorul operațional AO1 este alimentat de la V_{DD} și GND . Acesta poate fi considerat ideal, cu excepția faptului că tensiunea de ieșire este limitată în intervalul $[0+V_s, V_{DD}-V_s]$, unde $V_s = 0,3V$.
- Circuitul are două intrări de tensiune:
 - V_{ref} este o tensiune fixă de 2V, independentă de tensiunea de alimentare.
 - V_{in} este o tensiune variabilă care, în condiții normale de funcționare, se încadrează în intervalul $[0, V_{ref}]$.
- Ieșirea circuitului este în curent, iar sarcina de la ieșire este reprezentată de MN4, configurat ca o diodă.

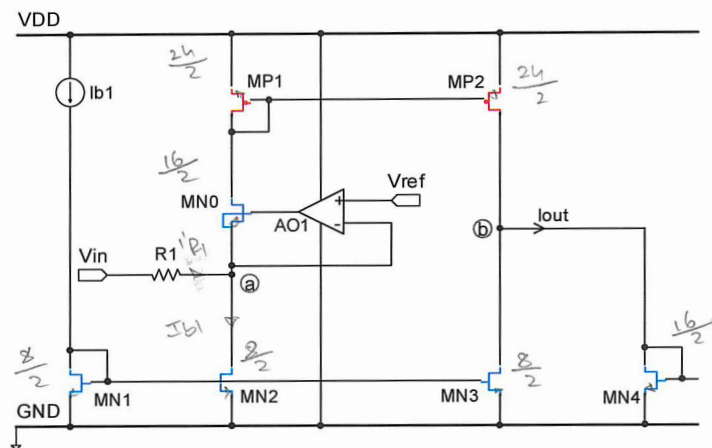


Figura 1

- **Cerinte:**
 - Demonstrați că I_{out} depinde liniar de diferența $(V_{ref}-V_{in})$.
Notă: Se va presupune că toate tranzistoarele MOS operează în regim de saturație și se va ignora efectul de modulare a lungimii canalului.
 - Determinați tensiunea minimă de alimentare pentru care rămâne valabilă dependența $I_{out} \sim (V_{ref}-V_{in})$ găsită la punctul (a) și toate tranzistoarele rămân în saturație.**Notă:** se va neglija fenomenul de modulare a lungimii canalului.
 - Examinați comportamentul circuitului atunci când tensiunea de intrare V_{in} depășește tensiunea de referință V_{ref} :
 - Reprezentați grafic $I_{R1}(V_{in})$, $I_{out}(V_{in})$, pentru intervalul $0 < V_{in} < V_{DD}$.
 - Estimați variația potențialului în nodurile (a), (b), precum și potențialului de la ieșirea amplificatorului AO1 (poarta lui MN0), realizând un grafic aproximativ.
 - Pentru fiecare element din lista următoare, specificați dacă influențează sau nu precizia curentului de ieșire și justificați pe scurt răspunsul.
 - Valoarea (toleranța) curentului I_{b1} .
 - Toleranța rezistorului $R1$.
 - Offset-ul amplificatorului operațional.
 - Impedanța de ieșire a amplificatorului operațional.
 - Rezistența de ieșire finită a tranzistoarelor din oglinda formată din MN1, MN2, și MN3.
 - Rezistența de ieșire finită a tranzistoarelor din oglinda formată din MP1 și MP2.
 - Valoarea tensiunii de alimentare, în condițiile de la punctul (a) și pentru intervalul dintre valoarea determinată la punctul (b) și $V_{DD}=5V$.

Rezolvare:

a)

AO1 ideal $\Rightarrow V_a = V_{ref}$

(1.75p) $I_{R1} = (V_a - V_{in})/R1 = (V_{ref} - V_{in})/R1$, cu sensul pozitiv dinspre nodul (a)

Curentii in nodul (a): $I_{R1} + I_{D_{MN2}} = I_{D_{MNO}}$ (AO1 nu are curent de intrare)

$$I_{D_{MNO}} = I_{D_{MP1}}$$

(0.5p) $I_{D_{MN1}} = I_{D_{MN2}} = I_{D_{MN3}} = I_{b1}$ (acelasi W/L, se neglijeaza R_o)

$$\text{Rezulta } I_{D_{MP1}} = I_{R1} + I_{b1}$$

(0.5p) $I_{D_{MP1}} = I_{D_{MP2}}$ (acelasi W/L, se neglijeaza R_o) $\Rightarrow I_{D_{MP2}} = I_{R1} + I_{b1}$

(1p) Curentii in nodul (b): $I_{D_{MP2}} = I_{out} + I_{b1} \Rightarrow I_{out} = I_{D_{MP2}} - I_{b1} = I_{R1} = (V_{ref} - V_{in})/R1$

b)

b1) Nodul (a) este fortat la potentialul $V_{ref}=2V$

MNO e la limita intrarii in saturatie, iar curentul de drena este maxim

V_{DD_min} se verifica in doua situatii:

(3p) A) MNO si MP1 „incap” in alimentare

$$V_{DS_{MNO}} = V_{GS_{MNO}} - V_{TN} = \sqrt{\frac{2I_D}{kn' \frac{W}{L}}}$$

$$I_{D_{MNO_max}} = V_{ref}/R1 + I_{b1} = 55\mu A$$

$$\Rightarrow V_{DS_{MNO}} = 0.37V$$

$$\text{Pentru MP1 avem: } V_{DS} = V_{GS} = V_{TP} + \sqrt{\frac{2I_D}{kp' \frac{W}{L}}} = 0.75 + 0.51 = 1.26V$$

$$V_{DD_min} = 2V + 0.37V + 1.26V = 3.63V$$

(3p) B) AO1 poate comanda poarta lui MNO

$$V_{GS_{MNO}} = 0.37 + 0.8 = 1.17V \text{ (vezi mai sus)}$$

$$V_{ref} + V_{GS_{MNO}} + V_s = 2 + 1.17 + 0.3 = 3.47V < 3.63V \Rightarrow \text{pentru } V_{DD_min} \text{ ramanem cu valoarea determinata mai sus}$$

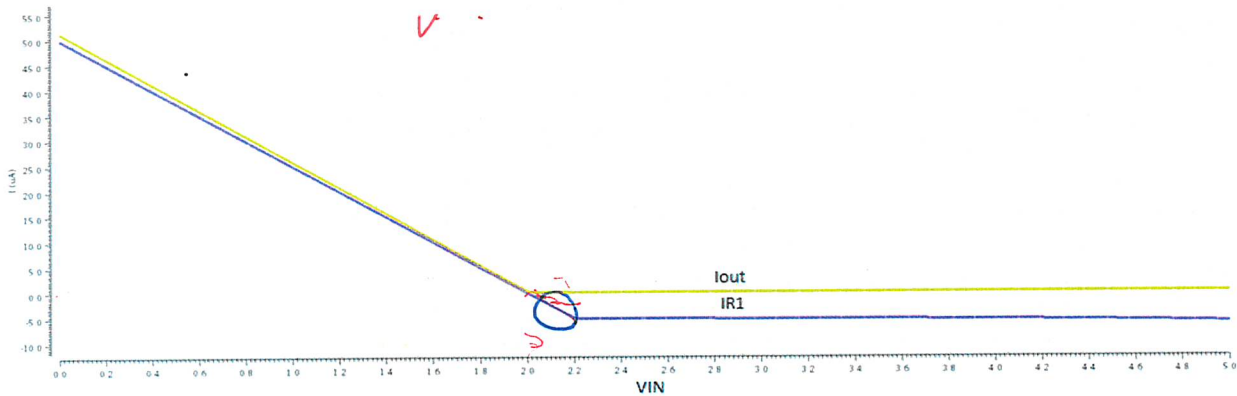
c)

V_{out} e max cand I_{out} e max; $I_{out_max} = 50\mu A$

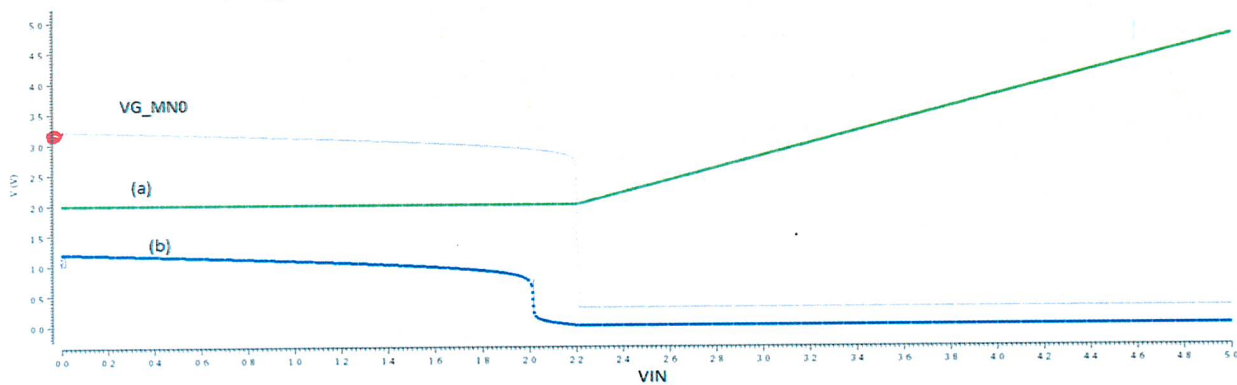
$$V_{out_max} = V_{DS_{MN4}} = V_{GS_{MN4}} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2I_D}{kn'\frac{W}{L}}} = 0.8 + 0.37 = 1.17V$$

$$V_{GS_{MN0}}_{max} = 1.17V \Rightarrow V_{G_{MN0}}_{max} = 2V + 1.17V = 3.17V$$

Graficul in nodul (IR1 si I_{out}) -> (2p+2p)



Graficul in nodul ($V_{G_{MN0}}$, a si b) -> (2p+1p+1p)



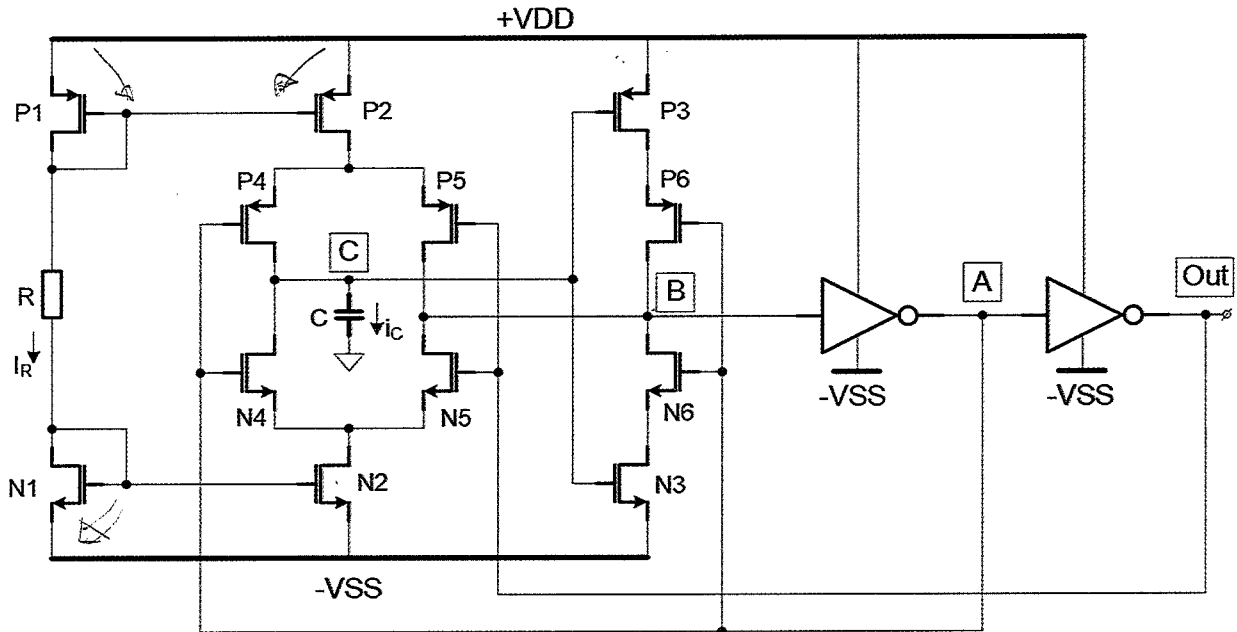
d)

2,3,5,6 -> influenteaza direct valoarea I_{out} - se vede din etapele calculului de la punctul a)

(7 x 0.75p)

Problema

Conf. dr. ing. Marius Neag Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca



Pentru circuitul din figura se cunosc urmatoarele:

$P1=P2=P3$; $N1=N2=N3$. Cand $P1,2,3$ si $N1,2,3$ opereaza in saturatie rezistenta lor drena-sursa ia valori foarte mari ($R_{DS_SAT} \rightarrow \infty$).

Tranzistoarele $P4=P5=P6 \gg P1$ si $N4=N5=N6 \gg N1$ – adica $(W/L)_{4,5,6} \gg (W/L)_1$ - sunt fie blocate ($I_D=0$) fie complet deschise ($R_{DS_ON} \rightarrow 0$). Inversoarele au tensiunea de prag $V_{prag}=(V_{DD}-V_{SS})/2$.

$V_{DD}=V_{SS} = 3V$; $V_{GS_N1} = V_{SG_P1}=1V$; $R=5K$; $C=1nF$;

Valorile initiale ale tensiunilor v_C si v_A sunt $-V_{SS}$, deci $v_C(t=0) = v_A(t=0) = -V_{SS}$

Se cere:

- Desenati formele de unda ale tensiunilor v_C si v_{Out} si ale curentilor de drena ai tranzistoarelor $P3$ si $N3$, adica $v_C(t)$, $v_{Out}(t)$, $i_{P3}(t)$ si $i_{N3}(t)$.
- Gasiti expresia si calculati valoarea frecventei semnalelor (tensiuni si curenti) periodice generate de circuit, in conditiile din enunt.
- Gasiti expresia si calculati valoarea factorului de umplere al tensiunilor dreptunghiulare periodice generate de circuit.
- Calculati valorile frecventei si ale factorului de umplere ale tensiunilor dreptunghiulare periodice generate de circuit cand valoarea tensiunii V_{DD} creste la $7,3V$ in timp ce V_{SS} ramane neschimbata. In acest caz $V_{GS_N1} = 1,1V$ iar $V_{SG_P1}=1,2V$.

SOLUTIE PROBLEMA 2

a) $t=0$ $\left. \begin{matrix} V_C(0) = -V_{SS} \\ V_A(0) = -V_{SS} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} P_3, P_4, P_6 = ON \\ N_3, N_4, N_6 = OFF \end{matrix} \right. \Rightarrow V_B \nearrow +V_{DD} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} V_A = -V_{SS} \\ V_{OUT} = +V_{DD} \end{matrix} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} P_5 = OFF \\ N_5 = ON \end{matrix} \right. \quad (1p)$

$\Rightarrow i_C = i_{P_2} = I_R \Rightarrow V_C(t) = -V_{SS} + \frac{I_R}{C} t$; $i_{N_2} = I_R$ se închide prin N_5, P_6, P_3 (2p)

Această stare se menține atât timp cât:

$V_{SGP_3} \geq V_{SGP_1} \Leftrightarrow$ până la $t=t_1$ când $V_C(t_1) = V_{DD} - V_{SGP_1}$ (1p)

$t=t_1+\epsilon$ $V_{SGP_3} < V_{SGP_1} \Rightarrow V_B \searrow -V_{SS}$ deoarece $i_{P_3} < i_{N_2} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} V_A \nearrow +V_{DD} \\ V_{OUT} \searrow -V_{SS} \end{matrix} \right. \quad (1p)$

$\Rightarrow \left\{ \begin{matrix} P_4, P_6, N_5 = OFF \\ N_3, N_6, P_5 = ON \end{matrix} \right. \Rightarrow i_C = -i_{N_2} = -I_R \Rightarrow V_C(t) = V_C(t_1) - \frac{I_R}{C} (t-t_1)$ (2p)

Această stare se menține atât timp cât:

$V_{GSN_3} \geq V_{GSN_1} \Leftrightarrow$ până la $t=t_2$ când $V_C(t_2) = -V_{SS} + V_{GSN_1}$ (1p)

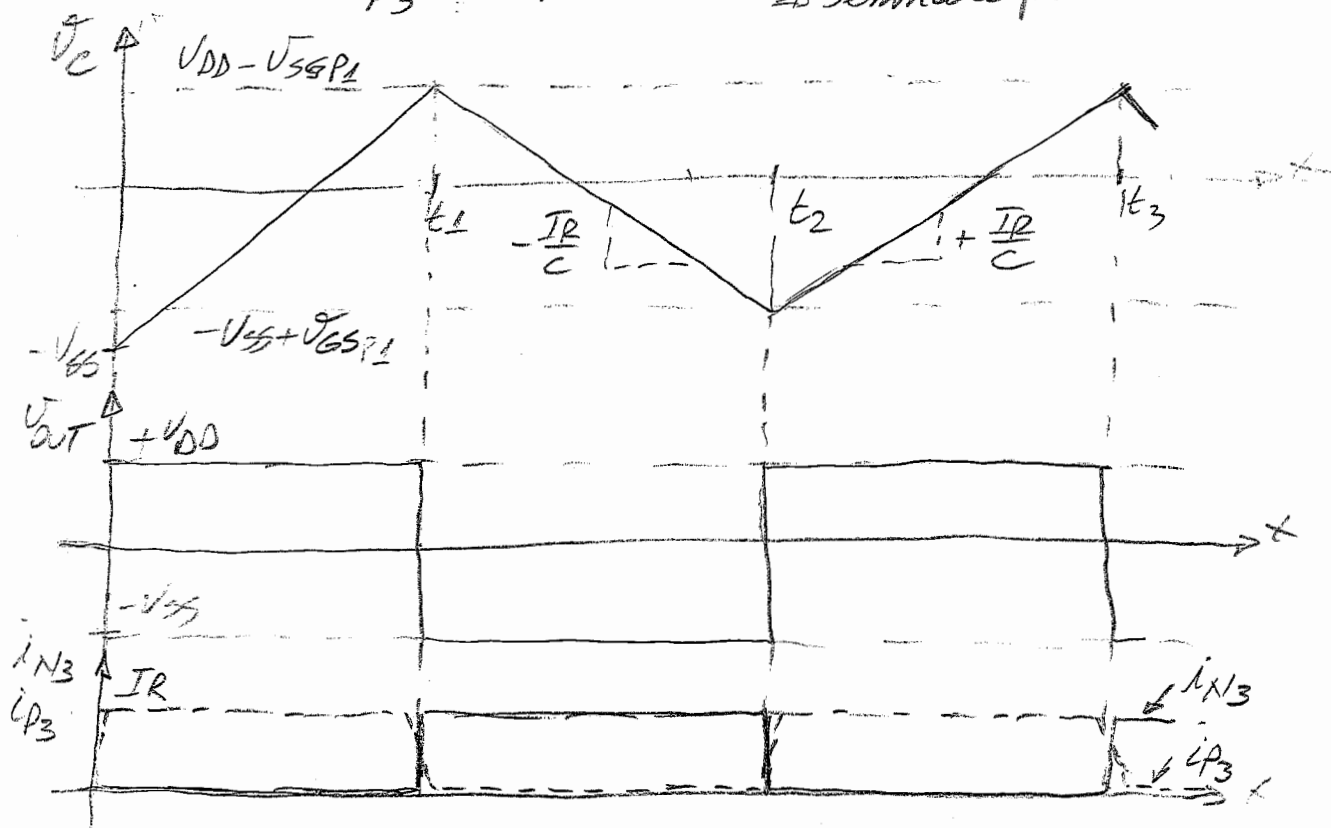
$t=t_2+\epsilon$ $V_{GSN_3} < V_{GSN_1} \Rightarrow V_B \nearrow +V_{DD}$ deoarece $i_{N_3} < i_{P_2} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} V_A \searrow -V_{SS} \\ V_{OUT} \nearrow +V_{DD} \end{matrix} \right. \quad (1p)$

$\Rightarrow \left\{ \begin{matrix} N_4, N_6, P_5 = OFF \\ P_3, P_4, P_6, N_5 = ON \end{matrix} \right. \Rightarrow i_C = i_{P_2} = I_R \Rightarrow V_C(t) = V_C(t_2) + \frac{I_R}{C} (t-t_2)$ (2p)

Această stare se menține atât timp cât:

$V_{SGP_3} \geq V_{SGP_1} \Leftrightarrow$ până la $t=t_3$ când $V_C(t_3) = V_{DD} - V_{SGP_1}$ (1p)

$t=t_3+\epsilon$ $V_{SGP_3} < V_{SGP_1} \Rightarrow$ se regăsesc condițiile de la $t=t_1$ (1p)



(2p)

(1p)

(2p)

b) $V_C(t)$ în intervalul $t_1 - t_2$

$$\text{Panta} = \frac{I_R}{C} = \frac{V_{DD} - V_{SGP1} + V_{SS} - V_{GSN1}}{t_2 - t_1}$$

$$\text{Dar } I_R = \frac{V_{DD} - V_{SGP1} + V_{SS} - V_{GSN1}}{R}$$

$$\Rightarrow t_2 - t_1 = RC \quad (1p)$$

Similar, în intervalul $t_2 - t_3$

$$\Rightarrow t_3 - t_2 = RC \quad (1p)$$

$$f_{\text{semnal}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{2RC} = 100 \text{ KHz} \quad (1p)$$

c) $t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = RC \Rightarrow$ Factor de umplere 50% (1p)

d) Din expresiile găsite la punctele b) și c) rezultă

$$f_{\text{semnal}} = \frac{1}{2RC} = f(V_{DD}, V_{SS}, V_{GSN1}, V_{SGP1}) = 100 \text{ KHz} \quad (1p)$$

$$\text{Factor de umplere} = 50\% = f(V_{DD}, V_{SS}, V_{GSN1}, V_{SGP1}) \quad (1p)$$

23p

Problema nr. 3

Conf. dr. ing. Bogdan Marinca, ETCTI, Timișoara

În figura de mai jos, toate tranzistoarele, cu excepția lui M5, au $\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 0,1 \frac{mA}{V^2}$. Pentru M5: $\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 0,2 \frac{mA}{V^2}$. Toate tranzistoarele NMOS au tensiunea de prag 0,6V, iar tranzistoarele PMOS au -0,6V. Parametrul de modulare a lungimii canalului pentru toate tranzistoarele este $\lambda = 0,05V^{-1}$. Se consideră că la intrare nu se aplică semnal. Tensiunile de alimentare sunt $V_{DD}=V_{SS}=5V$, iar valorile rezistoarelor sunt: $R_1=2k\Omega$ și $R_2=10k\Omega$.

6p

- a) Calculați valoarea tensiunii pe polarizare V_B necesară să asigure un curent de drenă în M5 de $360\mu A$ și apoi demonstrați că toate tranzistoarele sunt polarizate în zona de saturație. La acest punct se neglijează efectul de modulare a lungimii canalului.
- b) Calculați parametri de semnal mic g_m și r_{ds} pentru toate tranzistoarele folosind valorile aproximative ale curenților și tensiunilor (de semnal mare) găsite la punctul precedent.

2p

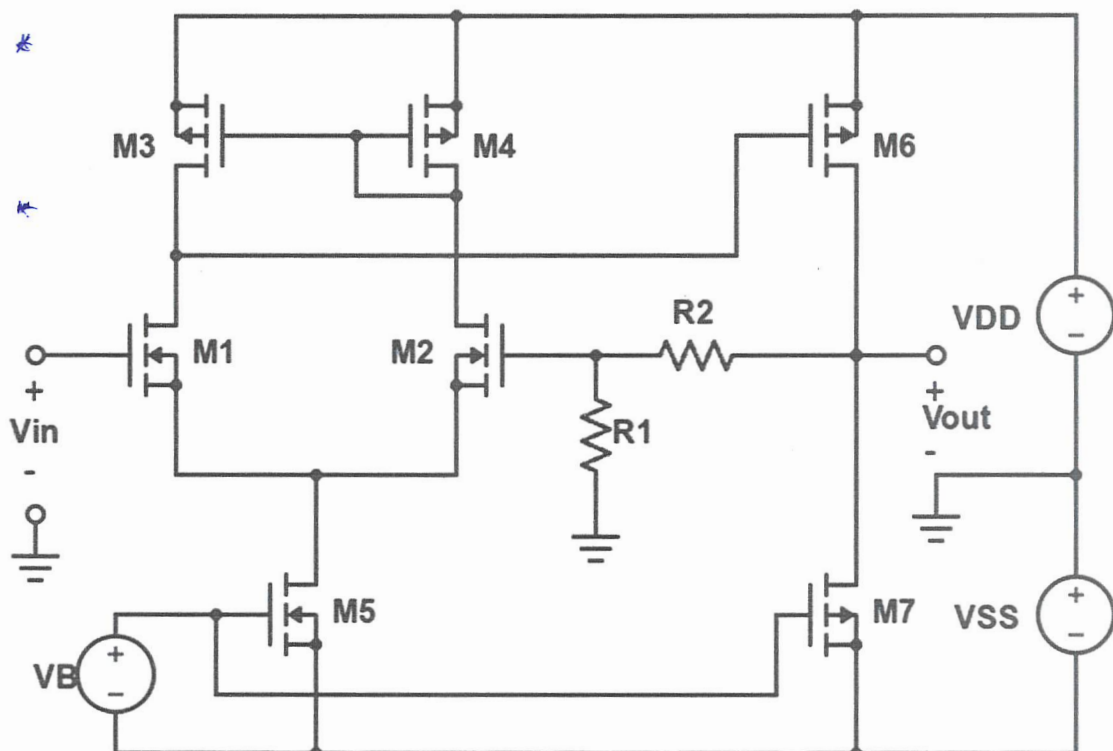
- c) Recalculați valoarea lui V_B , ținând cont de efectul de modulare a lungimii canalului și folosind valoarea lui V_{DS} găsită la punctul 1, care să asigure un curent prin M5 de $360\mu A$.
- d) Determinați câștigul pe bucla de reacție $L=A\beta$ (unde A este amplificarea totală a operaționalului și β este factorul de reacție) prin întreruperea buclei în grila lui M2 și găsirea căderii de tensiune pe R_1 (atunci când se aplică un semnal în grila lui M2 în timp ce semnalul de intrare V_{in} este resetat).
- e) Care sunt limitele tensiunii de intrare V_{in} și limitele tensiunii de ieșire V_{out} ?

$$\sqrt{3,2} \approx 1,8$$

$$\sqrt{3,4} \approx 1,85$$

$$\sqrt{3,6} \approx 1,9$$

$$\sqrt{3,8} \approx 1,95$$



Rezolvare P3 - 23 puncte

(5 puncte) a) $I_D = \frac{1}{2} \mu_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2$ 0,25p

1p $V_B = V_{GSS} = \sqrt{\frac{2 \cdot I_{D5}}{\mu_{ox} \frac{W}{L}}} + V_{th} = \sqrt{\frac{2 \cdot 360 \cdot 10^{-6} A}{0,2 \cdot 10^{-3} \frac{A}{V^2}}} + 0,6V \approx 2,5V$ 0,25p

$I_{D5} = 360 \mu A \Rightarrow I_{D1,2,3,4} = 180 \mu A$ 6 x 0,25p = 1,5p

$I_{D7} = \frac{I_{D5}}{2} = 180 \mu A$; $I_{D6} = I_{D7} = 180 \mu A$

Toate tranzistoarele au aceeași densitate de curent $\frac{I_D}{\mu_{ox} \frac{W}{L}}$ și presupunând că sunt în zona de saturatie $\Rightarrow$ toate tranzistoarele au aceeași tensiune

0,25p $|V_{GS}| = 2,5V$ pt. NMOS V_{GS} pozitivă iar pentru PMOS V_{GS} negativă

M1: $V_{D1} = V_{DD} - V_{SG1} = 5V - 2,5V = 2,5V$; $V_{S1} = -V_{GS1} = -2,5V$; $V_{DS1} = 5V$
 $V_{OV1} = V_{GS1} - V_{th} = 2,5V - 0,6V = 1,9V \Rightarrow V_{DS1} > V_{OV1} \Rightarrow M1$ este în saturatie

M2: $V_{D2} = V_{DD} - V_{SG4} = 2,5V$; $V_{S1} = V_{S2} = -2,5V$; $V_{DS2} = 5V$
 $V_{OV2} = 1,9V \Rightarrow V_{DS2} > V_{OV2} \Rightarrow M2$ este în saturatie

M3: $V_{SD3} = V_{SG6} = 2,5V$; $V_{DS3} = V_{GS6} = -2,5V$; $V_{DS3} < V_{GS3} - V_{thp} \rightarrow M3$ saturat

M4: $V_{DS4} = V_{GS4} = -2,5V$ (corectat ca dioda) $\rightarrow M4$ saturat

M5: $V_{DS5} = -2,5V - (-5V) = 2,5V$; $V_{DS5} > V_{GS5} - V_{th} = 1,9V \Rightarrow M5$ este saturat

M6: reacția negativă face ca $V_{D6} = V_{out} = 0V$; $V_{S6} = V_{DD} = 5V \Rightarrow V_{DS6} = -5V$
 $|V_{DS6}| > |V_{GS6}| - |V_{th}| = 2,5 - 0,6 = 1,9V \Rightarrow M6$ este saturat

M7: $V_{D7} = 0V (= V_{out})$; $V_{S7} = -V_{SS} = -5V \Rightarrow V_{DS7} = 5V$; $V_{DS7} > V_{GS7} - V_{th} = 1,9V$
 $\Rightarrow M7$ saturat

(5 puncte) b) 1p $g_m = \frac{2 I_D}{|V_{GS} - V_{th}|} \Rightarrow g_{m1,2,3,4,6,7} = \frac{2 \cdot 180 \cdot 10^{-6} A}{2,5V - 0,6V} = 189,47 \mu S = 0,19 mS$ 0,2 x 7 $\approx$ 1,5p

$g_{m5} = \frac{2 \cdot 360 \cdot 10^{-6} A}{1,9V} = 0,38 mS$

1p $r_{ds} = \frac{1 + \lambda |V_{DS}|}{\lambda \cdot I_D} \Rightarrow r_{ds1,2} = \frac{1 + 0,05V^{-1} \cdot 5V}{0,05V^{-1} \cdot 180 \cdot 10^{-6} A} = 139 k\Omega$

$r_{ds3,4} = \frac{1 + 0,05V^{-1} \cdot 2,5V}{0,05V^{-1} \cdot 180 \cdot 10^{-6} A} = 125 k\Omega$

$r_{ds5} = \frac{1 + 0,05V^{-1} \cdot 2,5V}{0,05V^{-1} \cdot 360 \cdot 10^{-6} A} = 62,5 k\Omega$

$r_{ds6,7} = \frac{1 + 0,05V^{-1} \cdot 5V}{0,05V^{-1} \cdot 180 \cdot 10^{-6} A} = 139 k\Omega$

$r_{ds} = \frac{1}{\lambda \cdot I_D} \approx 1,25 \approx 1$
 (100k 50k)

0,2 x 7 $\approx$ 1,5p

(2 puncte) c) $I_{D5} = \frac{1}{2} \mu_{ox} \frac{W}{L} (V_B - V_{th})^2 (1 + \lambda V_{DS5}) \Rightarrow V_B = \sqrt{\frac{2 \cdot I_{D5}}{\mu_{ox} \frac{W}{L} (1 + \lambda V_{DS5})}} + V_{th} =$
 $= \sqrt{\frac{2 \cdot 360 \cdot 10^{-6}}{0,2 \frac{mA}{V^2} \cdot (1 + 0,05V^{-1} \cdot 2,5V)}} + 0,6V = 2,39V$ 1p 0,25p

=2=

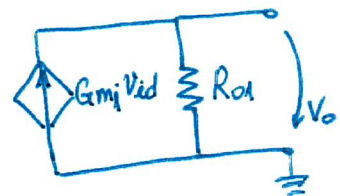
(6 puncte) d)

$$L = A_1 \cdot A_2 \cdot \beta \quad (1p)$$

A_1 = amplificarea etajului diferențial

A_2 = amplificarea etajului de ieșire (sursă comună)

β = factor de reacție



$$G_{m1} = -g_{m2} \quad R_{o1} = r_{ds2} \parallel r_{ds4} \Rightarrow A_1 = -g_{m2} (r_{ds2} \parallel r_{ds4}) \quad (1p)$$

$$\text{Identic pt. } A_2: A_2 = G_{m2} \cdot R_{o2} = -g_{m6} (R_{on} \parallel R_{op})$$

$$R_{o2} = R_{on} \parallel R_{op}; G_{m2} = -g_{m6}; R_{on} = r_{ds7} \parallel (R_1 + R_2)$$

$$R_{op} = r_{ds6}$$

$$A_2 = -g_{m6} (r_{ds6} \parallel r_{ds7} \parallel (R_1 + R_2)) \quad (1p)$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$L = g_{m2} (r_{ds2} \parallel r_{ds4}) \cdot g_{m6} (r_{ds6} \parallel r_{ds7} \parallel (R_1 + R_2)) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} =$$

$$= \frac{g_{m2}}{(r_{ds2})^{-1} + (r_{ds4})^{-1}} \cdot \frac{g_{m6}}{(r_{ds6})^{-1} + (r_{ds7})^{-1} + (R_1 + R_2)^{-1}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} =$$

$$= \frac{0,19 \text{ mS}}{(139 \text{ k}\Omega)^{-1} + (12 \text{ k}\Omega)^{-1}} \cdot \frac{0,19 \text{ mS}}{(139 \text{ k}\Omega)^{-1} + (139 \text{ k}\Omega)^{-1} + (12 \text{ k}\Omega)^{-1}} \cdot \frac{2}{12} =$$

$$= 12,5 \cdot 1,96 \cdot 0,167 = \boxed{4,08 \frac{\text{V}}{\text{V}}} \quad (1p)$$

(5 puncte) e)

Limitele la intrare:

- M_1 și M_2 trebuie să rămână în saturație: $V_{G1,2} \leq V_{D1,2} + V_{th}$

$$\Rightarrow V_{icm, max} = V_{D1} + V_{th} = V_{DD} - V_{SD3} + V_{th} = 2,5 \text{ V} + 0,6 \text{ V} = 3,1 \text{ V} \quad (1p)$$

- M_5 trebuie să asigure curentul pt. $M_{1,2} \Rightarrow M_5 = \text{saturat}$

$$\Rightarrow V_{G1} \leq V_{GS1} + V_{DS5} + (-V_{SS}) = 2,5 \text{ V} + 2,5 \text{ V} - 5 \text{ V} = 0 \text{ V} \quad (1p)$$

$$\boxed{0 \text{ V} \leq V_{icm} \leq 3,1 \text{ V}} \quad (0,5p)$$

Limitele la ieșire:

- M_6 și M_7 trebuie să rămână în saturație:

$$V_{DS7} \gg V_{OV7} = V_{GS7} + V_{th7} \Rightarrow V_D = V_O \gg \frac{2,5 \text{ V} - 5 \text{ V} - 0,6 \text{ V}}{(V_{GS7})(V_{SS})(V_{th7})} = -3,1 \text{ V} \quad (1p)$$

$$V_{SD6} \gg V_{SG6} - |V_{th}| = 2,5 \text{ V} - 0,6 \text{ V} = 1,9 \text{ V}$$

$$V_{SG} - V_{DG} \gg 1,9 \text{ V}$$

$$5 \text{ V} - V_{D6} \gg 1,9 \text{ V} \Rightarrow V_{D6} = V_O \leq 5 \text{ V} - 1,9 \text{ V} = 3,1 \text{ V} \quad (1p)$$

$$\boxed{-3,1 \text{ V} \leq V_O \leq +3,1 \text{ V}}$$

(0,5p)