

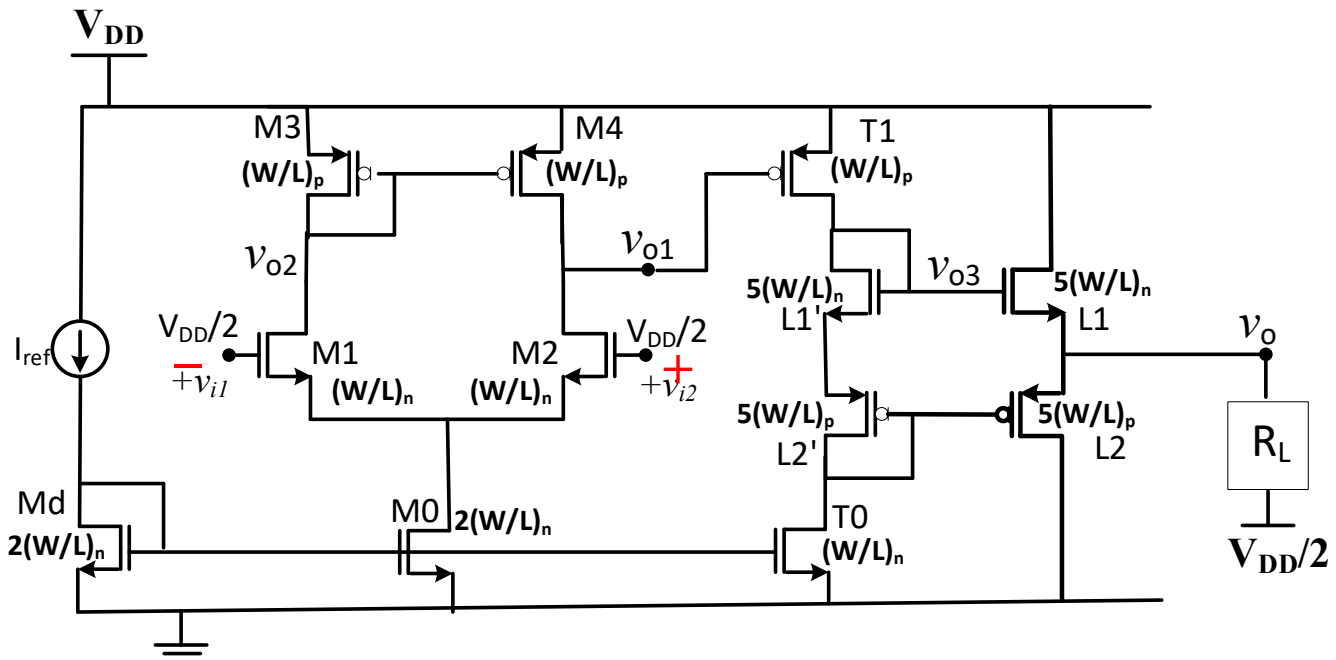
Série MOSFET N8 « Ampli-Op en CMOS »

Données Techno: $V_{DD} = 5\text{ V}$, $L_{\min} = 1\text{ }\mu\text{m}$;

$$\text{nMOS: } k_{P,n} = 120 \mu\text{A/V}^2; V_{Tn} = 0.8 \text{ V}; U_{a,N} = 25 \text{ V}/\mu\text{m}$$

pMOS: $k_{P,p} = 40 \mu\text{A/V}^2$; $V_{Tp} = 0.9 \text{ V}$; $U_{a,P} = 20 \text{ V}/\mu\text{m}$

Ex 2 Amplificateur Opérationnel:


$$V_{DD} = 5 \text{ V}; I_{ref} = 40 \text{ uA}; R_L = 10 \text{ k}\Omega$$

Transistors: $(W/L)_n = 10/2$; $(W/L)_p = 30/2$.

1. Identifier et les structures élémentaires de cet AmpliOp et donner leurs fonctions?
2. Déterminer sur le schéma l'entrée non-inverseuse (+) et l'entrée inverseuse (-).
3. Calculer les tensions et les courants de polarisation dans toutes les branches. En déduire le parametres petits signaux de tous les transistors.

Etage1:

$$I_D (M_0) = I_{ref} = 40 \text{ uA} ; I_D (M_{1,2,3,4}) = 0.5 I_{ref} = 20 \text{ uA} ;$$

$$V_{GS}(M_{1,2}) = \sqrt{\frac{2I_{D1}}{k_{p,n}\left(\frac{W}{L}\right)_n}} + V_{Tn} = 1.06 \text{ V} ; V_S(M_{1,2}) = \frac{V_{DD}}{2} - V_{GS1,2} = 1.44 \text{ V}$$

$$V_{SG}(M_{3,4}) = \sqrt{\frac{2I_{D3}}{k_{p,p}\left(\frac{W}{L}\right)_p}} + V_{Tp} = 1.16 \text{ V}; V_g(M_3) = V_{02,DC} = V_{DD} - V_{SG3,4} = 3.84 \text{ V}$$

$$g_m(M_{1,2}) = \sqrt{2k_{p,n} \left(\frac{W}{L}\right)_n I_{D1}} = 155 \mu S ; g_m(M_{3,4}) = \sqrt{2k_{p,p} \left(\frac{W}{L}\right)_p I_{D3}} = 155 \mu S$$

$$g_{DS}(M_{1,2}) = \frac{I_{D1}}{U_{a,n}L} = 0.4 \text{ uS} \rightarrow r_{on} = 2.5 \text{ M}\Omega$$

$$g_{DS}(M_{3,4}) = \frac{I_{D3}}{U_{a,p}L} = 0.5 \text{ uS} \rightarrow r_{op} = 2 \text{ M}\Omega$$

$$r_{on}/r_{op} = 1.11 \text{ M}\Omega$$

$$\left(g_m(M_{3,4})\right)^{-1} = 6.45 \text{ k}\Omega \ll r_{op}$$

Etage2:

$$I_D(T_1) = 0.5 I_{ref} = 20 \text{ uA} ;$$

$$V_{SG}(T_1, L_{1b}) = \sqrt{\frac{2I_{D1}}{k_{p,p}\left(\frac{W}{L}\right)_p}} + V_{Tp} = 1.16 \text{ V}; \quad V_G(T_1) = V_{01,DC} = V_{DD} - V_{SG1} = 3.84 \text{ V}$$

$$g_m(T_1) = \sqrt{2k_{p,p}\left(\frac{W}{L}\right)_p I_{D1}} = 156 \text{ uS} ;$$

$$g_{DS}(T_1) = \frac{I_{D1}}{U_{a,p}L} = 0.5 \text{ uS} \rightarrow r_{on} = 2 \text{ M}\Omega$$

$$g_{DS}(T_0) = \frac{I_{D0}}{U_{a,n}L} = 0.4 \text{ uS} \rightarrow r_{op} = 2.5 \text{ M}\Omega$$

$$r_{on}/r_{op} = 1.11 \text{ M}\Omega$$

$$I_D(L_1', L_2') = 20 \text{ uA} \rightarrow g_m(L_{1,2}') = \sqrt{2k_{p,p,n}5\left(\frac{W}{L}\right)_{n,p} I_D} = 346 \text{ uS} ; \left(g_m(L_{1,2}')\right)^{-1} = 2.9 \text{ k}\Omega \ll r_{on,p}$$

$$I_D(T_0) = 0.5 I_{ref} ; \quad V_{GS}(T_0) = \sqrt{\frac{I_{ref}}{k_{p,n}\left(\frac{W}{L}\right)_n}} + V_{Tn} = 1.06 \text{ V}$$

Etage3:

$$I_D(L_1', L_2') = I_D(L_1', L_2') = 20 \text{ uA} ;$$

On suppose qu'on a un circuit qui fixe la tension DC à la sortie à $V_{DD}/2$ (voir TP_SIM6).

$$V_{GS}(L_1, L_1') = \sqrt{\frac{2I_D}{k_{p,n}5\left(\frac{W}{L}\right)_n}} + V_{Tn} \approx 0.92 \text{ V}; \quad V_G(L_1, L_1') = V_{03,DC} = 0.5 V_{DD} + V_{GS}(L_1) \approx 3.4 \text{ V}$$

$$V_{SG}(L_2, L_2') = \sqrt{\frac{2I_D}{k_{p,p}5\left(\frac{W}{L}\right)_p}} + V_{Tp} \approx 1 \text{ V}; V_G(L_2, L_{2b}) = V_{03b,DC} = 0.5 V_{DD} - V_{SG}(L_2) = 1.5 \text{ V}$$

$$g_m(L_{1,2}) \approx \sqrt{2k_{p,p,n}5\left(\frac{W}{L}\right)_{n,p} I_D} = 346 \mu\text{S}$$

$(g_m(L_{1,2}))^{-1} \approx R_{\text{out}} \approx 2.9 \text{ k}\Omega < R_L$ (La résistance de sortie n'est à priori pas très inférieure à $R_L \rightarrow$ nous aurons donc une atténuation du signal à la sortie. Autrement dit le gain du push-pull sera inférieur à 1).



Comme les transistors L_1 et L_2 travaillent alternativement entre blocage et forte conduction, il est difficile de considérer que le signal utile consiste en une faible variation autour d'un point de fonctionnement. L'utilisation des modèles petits signaux du transistor pour construire le modèle de l'amplificateur push-pull n'est qu'une approximation grossière d'un comportement fortement non-linéaire. Les valeurs estimées pour $g_m(L_{1,2})$ et donc R_{out} doivent donc être utilisées avec précaution et le résultat final validé par simulation.

4. Etablir l'expression et calculer les gains suivant: $\frac{v_{o1}}{v_{id}}; \frac{v_{o2}}{v_{id}}; \frac{v_{o3}}{v_{o1}}; \frac{v_o}{v_{o3}}$

$$\frac{v_{o1}}{v_{id}} = -g_m(M_{1,2}) r_{on} // r_{op} = -172 \quad (\equiv 44.72 \text{ dB})$$

$$\frac{v_{o2}}{v_{id}} = \frac{g_m(M_1)}{2g_m(M_3)} \approx 0.5 \quad (\equiv -6 \text{ dB})$$

$$\frac{v_{o3}}{v_{o1}} = -g_m(T_1) (r_{op} // (r_{on} + g_m(L_{1b})^{-1} + g_m(L_{2b})^{-1})) = -173 \quad (\equiv 44.8 \text{ dB})$$

$$\frac{v_o}{v_{o3}} = \frac{R_L g_m(L_{1,2})}{1 + R_L g_m(L_{1,2})} \approx 0.78 \quad (\equiv -2.2 \text{ dB}) \quad (\text{Calcule très approximatif car modèle petits signaux non-valide pour le push-pull})$$

5. En déduire le gain boucle ouverte $A = \frac{v_o}{v_{id}}$

$$A = \frac{v_o}{v_{id}} = \frac{v_{o1}}{v_{id}} \frac{v_{o3}}{v_{o1}} \frac{v_o}{v_{o3}} = 23210 \equiv 87.3 \text{ dB}$$

Le gain de AO est très grand. Il peut donc être considérée comme infinie lors de l'utilisation de l'AO en réaction négative (c.à.d. en électronique linéaire : Ampli, Filtre, intégrateur ...).

6. Quel serait le gain boucle ouverte si l'on charge l'ampli (étage 1 et 2) directement par R_L (sans l'étage Push-Pull)?

Le gain de l'étage 2 chargé par R_L devient :

$$\frac{v_{o3}}{v_{o1}} = -g_m(T_1) r_{on} // r_{op} // R_L \approx -g_m(T_1) R_L = -1.56 \quad (\equiv 3.8 \text{ dB})$$

$$A' = \frac{v_o}{v_{id}} = \frac{v_{o1}}{v_{id}} \frac{v_{o3}}{v_{o1}} \approx 209 = 46.41 \text{ dB} \quad (\sim 150 \text{ fois plus petit})$$

7. Calculer $V_{out,Max}$ et $V_{out,min}$ de l'ampliOp.

$$V_{out,Max} \approx V_{DD} - V_{SD,sat}(T1) - V_{GS}(L1) \approx V_{DD} - V_{SG}(T1) + V_{Tp} - V_{GS}(L1) \approx 5 - 1.16 + 0.9 - 0.92 \approx 3.8 \text{ V}$$

$$V_{out,Min} \approx V_{DS,sat}(T0) + V_{SG}(L2) \approx V_{GS}(T0) - V_{Tn} + V_{SG}(L2) \approx 0.98 - 0.8 + 1 \approx 1.18 \text{ V}$$

8. Bilan énergétique pour $v_2 = 1 \sin(\omega t)$ sur un R_L de $10 \text{ k}\Omega$

i. La puissance moyenne $\overline{P_L}$ fournie à la charge

$$\overline{P_L} = \frac{v_{2,p}^2}{2R_L} = \frac{1^2}{2 \cdot 10 \cdot 10^3} = 50 \mu W$$

Les valeurs moyennes des courants $\overline{i_{d1,2}}$ fournis alternativement à la charge par L_1 et L_2 (courants mono-alternance) en déduire puissance moyenne consommée P_{cc3} par le push-pull

$$\overline{i_{d1}} = -\overline{i_{d2}} = \frac{v_{2,p}}{\pi R_L} = \frac{1}{\pi \cdot 10 \cdot 10^3} = 31.8 \mu A$$

$$P_{cc3} = 2 \overline{i_{e7}} \frac{V_{DD}}{2} = 159 \mu W$$

ii. La puissance moyenne consommée par chaque étage P_{cci} , en déduire la puissance totale consommée par l'amplificateur P_{cc} (c.à.d. puissances fournies par les deux alimentations V_{cc})

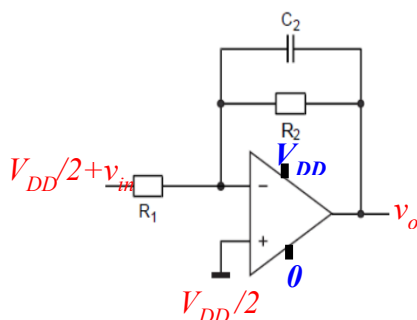
$$P_{cc1} = 2 P_{cc2} = V_{DD} I_{ref} = 200 \mu W$$

$$P_{cc} = P_{cc1} + P_{cc2} + P_{cc3} = 459 \mu W$$

iii. L'efficacité énergétique η définie comme le rapport entre la puissance fournie à la charge et la puissance totale consommée.

$$\eta = \frac{\overline{P_L}}{P_{cc}} = \frac{31.8}{459} = 6.9 \%$$

9. Ajouter sur le schéma les éléments nécessaires pour en faire un filtre Pass-bas de gain 20 dB et de bande passante 50kHz.



Ex : $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$; $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ et $C_2 = 32 \text{ pF}$

10. L'AmpliOp en réaction négative assure la linéarité du Push-Pull en maintenant $V_+ = V_-$ (réf. TP4 complément pour plus de détails). Voir TP_SIM6 pour la forme de v_{o3}