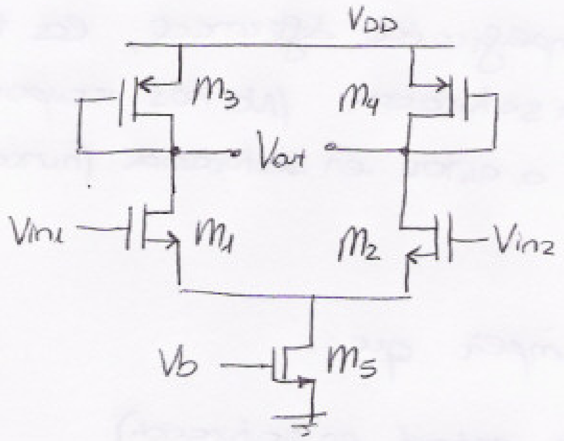
Problema 1



Datos

$(W/L)_{1,2,5} = \frac{50}{0'5}$

$(W/L)_{3,4} = \frac{20}{0'5}$

$I_{M5} = 0'5mA$

$V_{Tn} = 0'7V$

$V_{TP} = -0'8V$

Calculamos los valores mínimo y máximo de la tensión de entrada en modo común permitidos, para que el circuito funcione como amplificador diferencial.

Si $V_{in} < V_{Tn}$, es decir, la tensión de entrada es menor que la tensión umbral del MOSFET-N, entonces los transistores M_1 y M_2 están en corte, dado que no se cumple que $V_{GS} > V_{Tn}$.

El transistor $M5$ está en la región de triodo. La tensión $V_{DS5} = 0$ debido a que la intensidad que recorre el transistor es $= 0$, por estar M_1 y M_2 en corte, como hemos visto.

Los transistores M_3 y M_4 están en corte:

$$V_{OUT1} = V_{DD} - V_{SG3} = V_{DD} - |V_{TP}|$$

Si la tensión V_{in} aumenta, y se llega a $V_{in} > V_{Tn}$ entonces los transistores M_1 y M_2 comienzan a conducir en saturación $V_{DS1} > V_{in} - V_{Tn} > 0$

(En el drenador de M_1 tenemos $V_{OUT1} = V_{DD} - |V_{TP}|$) (por continuidad)

El transistor $M5$ está en la región de triodo, dado que $V_B - V_{Tn} > V_{DS5}$. Pasará a estar en saturación cuando la intensidad aumente y se cumpla que $V_b - V_{Tn} < V_{DS5}$.

Por lo tanto, el límite inferior de la tensión de entrada debe ser tal que M_5 entre en saturación, ya que para que el circuito actúe como amplificador diferencial, los transistores M_1, M_2, M_5 deben estar en saturación (No nos ocuparemos de M_3 y M_4, porque van a estar en saturación (nunca en la región de triodo).

Con esto, se debe cumplir que:

$$\begin{cases} V_{DS5} > V_b - V_{Tn} \quad (M_5 \text{ estará en saturación}) \\ V_{DS5} = V_{in1,min} - V_{GS1} \end{cases}$$

$$\hookrightarrow V_{in,min} = V_b - V_{Tn} + V_{GS1}$$

Numéricamente:

A partir de la ecuación de la corriente de saturación, sabiendo que la corriente por M_5 es $I_5 = 0'5mA$:

$$0'5mA = \frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)_5 (V_b - V_{Tn})^2$$

$$K_n = \mu_n C_{ox} = \mu_n \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} \rightarrow \quad 0'5 = 6'7\,(V_b - 0'7)^2 \longrightarrow V_b = 0'973\,V$$

Sabiendo que M_1 está en saturación y que la corriente que circula por esa zona es de $0'25mA$ (dado que se cumple que $I_1 + I_2 = 0'5$ e $I_1 = I_2$), podemos obtener el valor de V_{GS1}:

$$0'25mA = \frac{K_n}{2}\left(\frac{W}{L}\right)_1 (V_{GS1} - V_{Tn})^2$$

$$0'25 = 6'7\,(V_{GS1} - 0'7)^2 \longrightarrow V_{GS1} = 0'893\,V$$

Hallamos el límite inferior de la tensión de entrada:

$\underline{V_{in,min} = 1'17V}$

En cuanto al valor de la tensión de salida, si la tensión de entrada V_{in} aumenta mientras M_1, M_2, M_3 están en saturación, la intensidad que recorre M_5 es constante y la salida:

$$V_{OUT1} = V_{DD} - |V_{TP}| \quad \text{pasa a ser constante}$$

$$V_{SG3} = V_{SG4} = cte$$

$$V_{OUT1} = V_{OUT2} = cte.$$

<u>Cuando V_{in} continúa aumentando</u> ocurre que M_1, M_2 pasan de la zona de saturación a la de triodo. Esto se debe a que:

$$V_{in} = V_{GS1} + V_{DS5} \rightarrow V_{DS5} \text{ aumenta con } V_{in}, \text{ al ser } V_{GS1} \text{ constante.}$$

$$V_{DS1} = V_{OUT1} - V_{DS5} \rightarrow V_{DS1} \text{ disminuye con } V_i.$$

Cuando se llegue a $V_{DS1} = V_{GS1} - V_{TN}$ entonces M_1 pasa a la zona de triodo (con M_2 pasa igual), y el circuito va a dejar de comportarse como amplificador diferencial. De aquí se obtiene $V_{in,max}$.

$$V_{OUT1} - \cancel{V_{DS5}} = V_{in,max} - \cancel{V_{DS5}} - V_{TN}$$

de donde: $V_{in,max} = V_{OUT1} + V_{TN} = V_{DD} - V_{SG3} + V_{TN}$

Calculamos el valor de V_{SG3} a partir de la corriente, que ya está fijada:

$$I_{D3} = 0'25mA = \frac{k_p}{2}\left(\frac{W}{L}\right)_3 (V_{SG3} - |V_{TP}|)^2$$

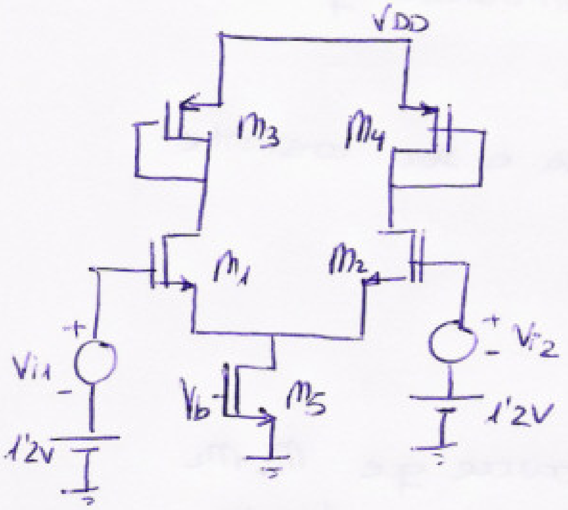
Asumimos $V_{DD} = 3V$. Calculamos k_p como $k_p = \mu_p C_{ox} = \mu_p \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}}$, y $V_{TP} = -0'8$

$$0'25 = 0'77(V_{SG3} - |-0'8|)^2 \rightarrow V_{SG3} = 1'37V$$

Hallamos el límite superior de la tensión de entrada: $V_{in,max} = 2'33V$

Los valores máximos permitidos para $V_{in,cm}$ son: $\boxed{1'17V < V_{in} < 2'33V}$

(b) Ahora calculamos la ganancia diferencial, con $V_{in,cm} = 1'2V$ y $V_{DD} = 3V$.



Se tiene que:

$$V_{O1} - V_{O2} = A_1 V_{i1} + A_2 V_{i2} =$$

$$= A_1 (V_{i1} - V_{i2}) + A_{cm} \left(\frac{V_{i1} + V_{i2}}{2} \right) =$$

$$= A_d V_{id} + A_{cm} V_{icm}$$

ganancia diferencial

Comprobamos que para $V_{DD} = 3V$ M_1, M_2, M_5 están en saturación.

$$V_{DS1} = V_{DD} - V_{SG3} - V_{S1}$$

$$V_{DS1} > V_{GS1} - V_{Tn} \rightarrow V_{DS1} > V_{in} - V_{S1} - V_{TN}$$

Calculamos el valor de V_{SG3} sabiendo que M_3 siempre está en saturación, a partir de la corriente por M_3:

$$I_{D3} = \frac{K_p}{2} \left(\frac{W}{L} \right)_p (V_{SG3} - |V_{TP}|)^2$$

El transistor M_5 está en saturación: $V_{S1} > V_b - V_{TN}$ como hemos visto anteriormente, y por tanto

$$I_{D3} = \frac{I_{SS}}{2} = 0'5mA$$

De aquí, obtenemos numéricamente $V_{SG3} = 1'37V$

Hemos comprobado que con $V_{DD} = 3V$ el amplificador se comporta como amplificador diferencial, ya que:

$$V_{DD} - V_{SG3} - \cancel{V_{S1}} > V_{in} - \cancel{V_{S1}} - V_{Tn}$$

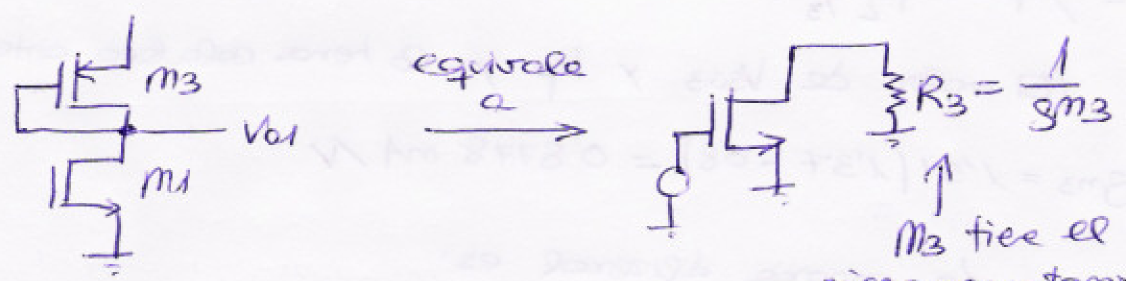
$$3 - 1'37 > \text{rango de entrada} - 0'7$$

Obtenemos la ganancia diferencial del circuito haciendo uso de su simetría:

$$A_d = \left.\frac{V_{OUT1} - V_{OUT2}}{V_{i1} - V_{i2}}\right|_{V_{icm}=0}$$

Si $V_i = V_{i1} = V_{i2}$, entonces $A_d = \dfrac{V_{OUT1} - V_{OUT2}}{2V_i}$

Los transistores M_3 y M_1:



M_3 tiene el mismo comportamiento que la resistencia: convertir variaciones de corriente en una variación de tensión.

Entonces, se tiene que:

$$V_{OUT1} = -g_{m1} R_3 V_i = -g_{m1} \frac{1}{g_{m3}} V_i$$

$$V_{OUT2} = -g_{m2} \frac{1}{g_{m4}} (-V_i)$$ → Hacemos un procedimiento similar para M_2 y M_4.

Como el circuito es simétrico, tenemos que: $g_{m1} = g_{m2}$ y que $g_{m3} = g_{m4}$

Con esto:

$$V_{OUT1} = -g_{m1} R_3 V_i = -g_{m1} \frac{1}{g_{m3}} V_i$$
$$V_{OUT2} = -g_{m1} \frac{1}{g_{m3}} (-V_i)$$

→ La salida diferencial:

$$V_{OUT1} - V_{OUT2} = -g_{m1} \frac{1}{g_{m3}} (2V_i)$$

La ganancia diferencial es, por tanto:

$$\boxed{A_d = -g_{m1}/g_{m3}}$$

Calculamos numéricamente la ganancia diferencial:

$$Ad = \frac{-g_{m1}}{g_{m3}}$$

$$g_{m1} = \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_1 (V_{GS1} - V_{Tn}) = g_{m2}$$

(El valor de V_{GS1} y K_n ya lo tenemos calculado anteriormente)

$$g_{m1} = 13'4\,(0'893 - 0'7) = 2'586\ mA/V$$

$$g_{m3} = \mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_3 (V_{SG3} - |V_{Tp}|) = g_{m4}$$

(El valor de V_{SG3} y K_p ya lo tenemos calculado anteriormente).

$$g_{m3} = 1'54\,(1'37 - 0'8) = 0'8778\ mA/V$$

La ganancia diferencial es:

$$Ad = \frac{-g_{m1}}{g_{m3}} = \frac{-2'586}{0'8778} = \boxed{-2'946}$$