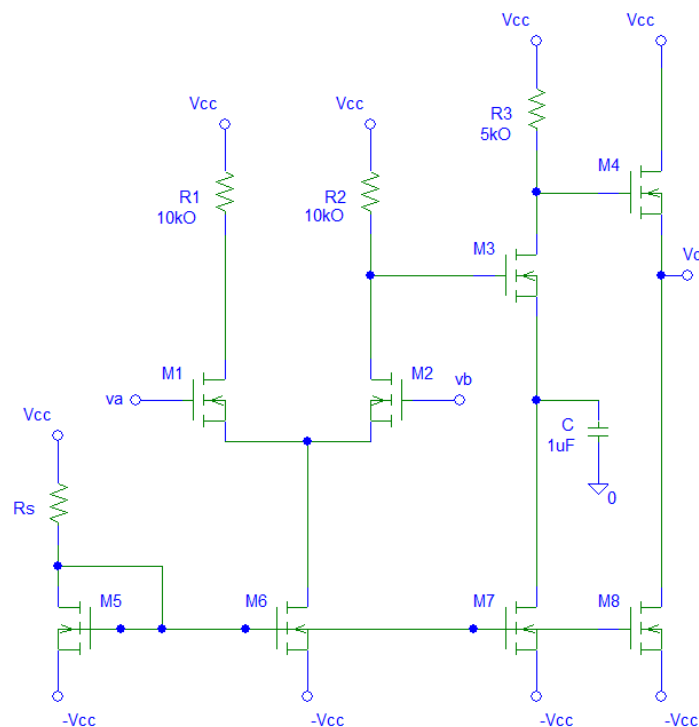


Nombre _____ DNI _____ GRUPO _____

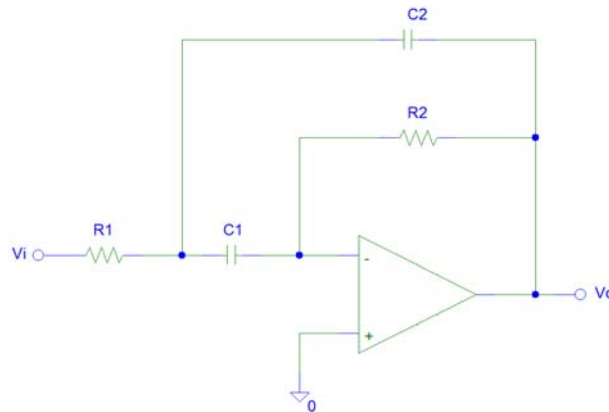
1.- El siguiente circuito representa un amplificador diferencial multietapa. Se pide:

- Diseñar la resistencia R_s para que la corriente de drenador de los transistores M1 y M2 sea de 1 mA. ¿Qué corriente circula por los transistores M3 y M4? (0.5 puntos)
- Calcular las ganancias diferencial y común en zona plana. Obtener la resistencia de entrada y de salida del sistema, y comentar brevemente la función de cada etapa básica. (2 puntos)
- Estimar la frecuencia inferior de corte. (1 punto)
- Admitiendo que la etapa compuesta por M3 es la que limita el ancho de banda del sistema, estimar la frecuencia superior de corte. (1.5 puntos)

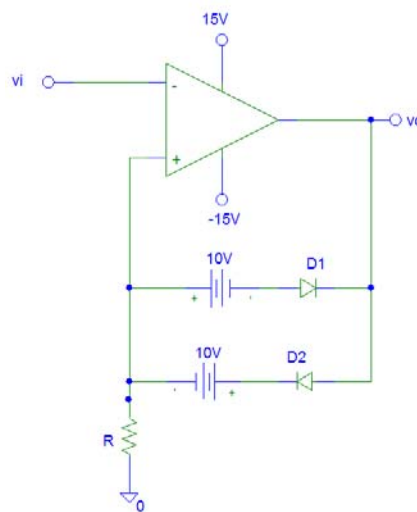
Datos: $V_{cc} = 15 \text{ V}$, $k_n = 20 \text{ mA/V}^2$, $V_t = 1.5 \text{ V}$, $V_A = 100 \text{ V}$, $C_{gd} = C_{gs} = 1 \text{ pF}$. Todos los transistores son iguales.



2.-a) Obtener la función de transferencia $H(s) = V_o/V_i$ del siguiente circuito y representar su diagrama de Bode en magnitud. ¿Qué función realiza este sistema? Expresar la salida en función de la entrada en el dominio temporal en los casos particulares de altas y bajas frecuencias. Evaluar el efecto de las corrientes parásitas de entrada de polarización y de *offset* en la señal de salida (2 puntos).



b) Buscar y representar la salida del siguiente circuito en función de la entrada. (2 puntos)



3.- Diseñar un filtro de Chebyshev de orden 5 paso alto no inversor, con una zona pasante de rizado máximo 2 dB, ganancia 10 y frecuencia de comienzo 2 kHz. Esquematizar de forma detallada el diagrama de Bode en magnitud del sistema. (1 punto)

EJERCICIO 1.

a) Diseñar Rs para $I_{D1} = I_{D2} = 1 \text{ mA}$

M1 y M2 forman un par diferencial con $V_{GS1} = V_{GS2} \rightarrow I_{D1} = I_{D2}$.

M5 y M6 forman un espejo de corriente que polariza el par diferencial. La corriente de esta fuente es $I_{D6} = I_{D1} + I_{D2} = 2\text{mA}$. Al ser un espejo con los transistores iguales, $I_{D5} = I_{D6}$.

$$I_{D5} = \frac{k_n}{2} (V_{GS5} - V_t)^2 = 2\text{mA} \rightarrow V_{GS5} = -13\text{V}$$
$$\frac{15 - V_{GS5}}{R_s} = 2\text{mA} \rightarrow R_s = 14\text{k}\Omega$$

Por M3 y M4 circula la corriente que fuerzan las fuentes de corriente compuestas por M7 y M8 junto con M5 (otros dos espejos de corriente). Al ser estas fuentes iguales a la primera, por ellas circula la misma corriente: $I_{D3} = I_{D4} = I_{D7} = I_{D8} = 2\text{mA}$.

b) Calcular las ganancias diferencial y común en zona plana.

Se tienen tres etapas en cascada: par diferencial (M1 y M2), fuente común (M3) y drenador común (M4). La señal entra a cada etapa por su terminal de fuente, por tanto $R_{i1} = R_{i2} = R_{i3} = \infty$. De esta forma, no hay divisor de tensión en el modelo en cuadripolos del circuito, y la ganancia final es directamente:

$$A_v = A_{v1} \cdot A_{v2} \cdot A_{v3}$$

Parámetros en pequeña señal:

$$g_{m1} = g_{m2} = \sqrt{2k_n I_{D1}} = 6.3\text{mA/V}$$
$$r_{o1} = r_{o2} = \frac{V_A}{I_{D1}} = 100\text{k}\Omega$$
$$g_{m3} = g_{m4} = 8.9\text{mA/V}$$
$$r_{o3} = r_{o4} = r_{o6} = r_{o7} = r_{o8} = 50\text{k}\Omega$$

Para ganancia diferencial $v_a = -v_b = v_i$.

$$A_{v1} = A_{d1} = \frac{-g_{m1}}{2} (r_{o1} \parallel R_{D1}) = 28.6$$
$$A_{v2} = -g_{m3} (r_{o3} \parallel R_{D3}) = 40.5$$
$$A_{v3} = \frac{g_{m4} r_{o4} R_{S4}}{R_{D4} + R_{S4} (1 + g_{m4} r_{o4}) + r_{o4}} = 0.995$$
$$A_v = 1153$$

Para ganancia común $v_a = v_b = v_i$.

$$A_{v1} = A_{cm1} = \frac{2g_{m1}R_{D1}r_{o1}}{2R_{D1} + R_I(1 + g_{m1}r_{o1}) + 2r_{o1}} \text{ con } R_I = r_{o6} \rightarrow A_{cm1} = 0.4$$

$$A_{v2} = 40.5$$

$$A_{v3} = 0.995$$

$$A_v = 16.12$$

Obtener la resistencia de entrada y de salida del sistema, y comentar brevemente la función de cada etapa básica.

Las señales de entrada se aplican a las puertas de M1 y M2. Por tanto, la resistencia de entrada es siempre $R_i = \infty$. La resistencia de salida se corresponde con la de la última etapa:

$$R_o = R_{o3} = R_{s4} \parallel \left(\frac{R_{D4} + r_{o4}}{1 + g_{m4}r_{o4}} \right) = 111.8\Omega$$

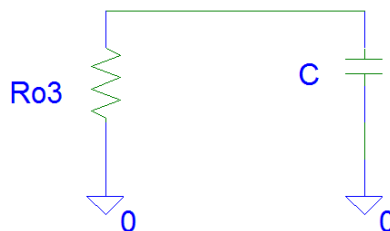
El amplificador está formado por tres etapas básicas. La primera es un par diferencial (M1 y M2), cuya función es amplificar la diferencia entre las señales de entrada, rechazando su modo común (media aritmética). La segunda es un fuente común (M3) cuya función aquí es la de dar ganancia al sistema. La tercera es un drenador común (M4) que se introduce para proporcionar una resistencia de salida baja.

c) Estimar la frecuencia inferior de corte.

La degradación de la ganancia a baja frecuencia (aparición de una frecuencia inferior de corte) se debe al efecto de condensadores de valor elevado. En este caso, solamente existe con esas condiciones el condensador externo "C" de $1\mu\text{F}$. Se aplica el método de las constante de tiempo en cortocircuito:

$$\omega_L = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} = \frac{1}{R_C C}$$

siendo R_C la resistencia equivalente asociada al condensador C. Para buscarla, se simplifica el circuito en la forma:



donde R_{o3} es la resistencia vista desde la fuente de M3 :

$$R_{o3} = R_{s3} \parallel \left(\frac{R_{D3} + r_{o3}}{1 + g_{m3}r_{o3}} \right) = 123\Omega$$

Entonces:

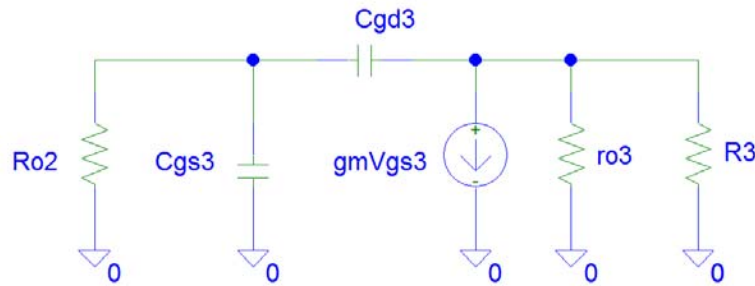
$$\omega_L = \frac{1}{C \cdot R_{O3}} = 8.13 \text{krad} / s \rightarrow f_L = 1.29 \text{kHz}.$$

d) Admitiendo que la etapa compuesta por M3 es la que limita el ancho de banda del sistema, estimar la frecuencia superior de corte.

Si M3 es la que limita el ancho de banda, se calcula la frecuencia superior de corte atendiendo únicamente a los polos que introduce esta etapa:

$$\omega_H = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \tau_i} = \frac{1}{R_{gs3}C_{gs3} + R_{gd3}C_{gd3}}$$

El circuito se simplifica en la forma:



siendo R_{o2} la resistencia de salida del par diferencial:

$$R_{o2} = r_{o2} \parallel R_{D2} = 9.1 \text{k}\Omega$$

Sobre el circuito anterior se obtiene:

$$R_{gs3} = R_{o2} = 9.1 \text{k}\Omega$$

$$R_{gd3} = R_{o2} + r_{o3} \parallel R_3 + g_{m3}(r_{o3} \parallel R_3) \cdot R_{o2} = 381.8 \text{k}\Omega$$

$$\omega_H = 2.55 \text{Mrad} / s \rightarrow f_H = 407.1 \text{kHz}.$$

EJERCICIO 2.

a) Obtener la función de transferencia $H(s) = V_o/V_i$ del siguiente circuito y representar su diagrama de Bode en magnitud. ¿Qué función realiza este sistema?

Amplificador operacional con realimentación negativa $\rightarrow V^+ = V^- = 0$. Balance de corrientes en los nodos:

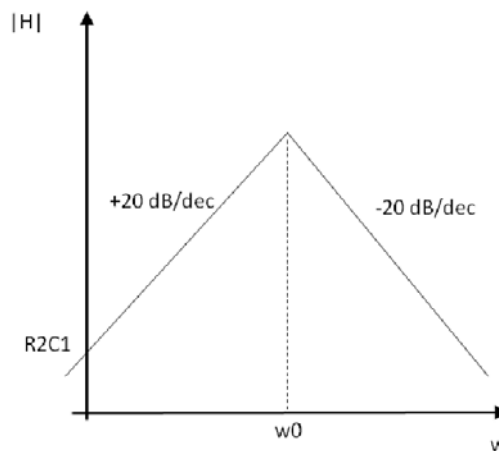
$$\frac{v_i - v_a}{R_1} = v_a C_1 s + (v_a - v_o) C_2 s$$

$$v_a C_1 s = -\frac{v_o}{R_2}$$

donde v_a es la tensión en el nodo de unión de R_1 , C_1 y C_2 . De este sistema se obtiene:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2 C_1 s}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + R_1 (C_1 + C_2) s + 1}$$

El diagrama de bode en magnitud de esta función de transferencia es:



con $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$. El circuito actúa como un filtro paso banda centrado en ω_0 .

Expresar la salida en función de la entrada en el dominio temporal en los casos particulares de altas y bajas frecuencias.

Para altas frecuencias, en la función de transferencia domina el término cuadrático en el denominador:

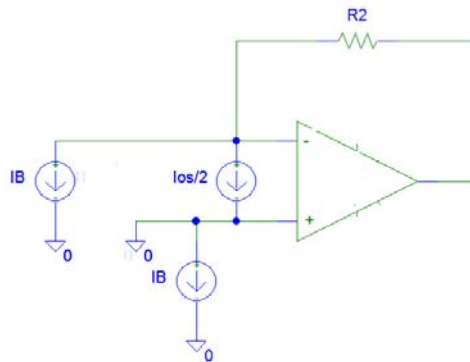
$$\frac{v_o}{v_i} \approx -\frac{R_2 C_1 s}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2} = -\frac{1}{R_1 C_2 s} \rightarrow v_o(t) \approx \frac{-1}{R_1 C_2} \int v_i dt$$

A bajas frecuencias el término que domina en el denominador es el término independiente:

$$\frac{v_o}{v_i} \approx -R_2 C_1 s \rightarrow v_o(t) \approx -R_2 C_1 \frac{dv_i}{dt}$$

Evaluar el efecto de las corrientes parásitas de entrada de polarización y de offset en la señal de salida.

El circuito equivalente añadiendo los efectos de las corrientes parásitas es:



Los condensadores quedan en abierto ya que las corrientes de polarización y offset son señales continuas. De este circuito se tiene:

$$v_o = R_2 \left(I_B + \frac{I_{os}}{2} \right)$$

b) Buscar y representar la salida del siguiente circuito en función de la entrada.

En el siguiente circuito el amplificador operacional tiene realimentación positiva o ninguna, dependiendo del estado de los diodos. En cualquier caso, la salida será:

$$v_o = \begin{cases} 15V, V^+ > V^- \\ -15V, V^+ < V^- \end{cases}$$

Si suponemos que puede existir la posibilidad de que los dos diodos estén en corte al mismo tiempo, se tendría:

$$v_{d1} = -10 - v_o = \begin{cases} -25V \\ 5V > v_\gamma \end{cases}$$

$$v_{d2} = v_o - 10 = \begin{cases} 5V > v_\gamma \\ -25V \end{cases}$$

Por tanto, para cualquiera de los dos valores posibles de la salida, siempre va a haber un diodo en conducción, y no existe la posibilidad de que ambos estén en corte simultáneamente.

Para determinar el valor de la salida, hay que comparar los valores de V^+ y V^- . En este caso, $V^- = v_i$, y V^+ dependerá de la rama de realimentación que conduzca.

Se hace un barrido positivo de la señal: al partir de $v_i = -\infty$ se tiene que $V^- = -\infty < V^+$ y $v_o = 15V$. En este caso, es el diodo D2 el que conduce, y $V^+ = v_o - v_T - 10 = 4.3V$. Si la señal de entrada v_i empieza a crecer, no cambiará la salida hasta que llegue a este valor, a partir del cual $V^+ < V^- \rightarrow v_o = -15V$.

Si ahora se sigue el proceso contrario, y la señal de entrada hace un barrido negativo, al empezar la salida en el valor bajo de $-15V$, es la rama del diodo D1 la que conduce, y entonces $V^+ = v_o + v_T + 10 = -4.3V$. La salida no volverá a cambiar hasta que la entrada pase por este valor.

Se trata de un disparador de Schmitt cuya salida es:

