

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Eléctrica

# **Prelaboratorio N<sup>o</sup> 4: Respuesta en frecuencia**

Emerson Warhman  
C.I. 25.795.480  
8 de diciembre de 2024

En primer lugar identificamos la etapa del amplificador de diferencial en el diagrama del amplificador multietapas, la cual es la que contiene a los transistores  $Q1$  y  $Q2$ .

Ahora procedemos a calcular los puntos estáticos de operación, para ello tomamos los capacitores como circuitos abiertos, ya que estamos trabajando en DC y empezamos a calcular las corrientes en los transistores.

Asumiremos que la corriente que pasa por  $R5$  es 0.

Para calcular la corriente de base se usará el teorema de thevenin para sustituir  $R_1$  y  $R_2$  por una fuente y una resistencia que pasa por la base de  $Q_1$ .

Para calcular el valor de la resistencia equivalente de thevenin:

$$R_{th} = R_1 // R_2$$

cómo  $R_1 = R_2$

$$R_{th} = \frac{R_1}{2} = 50k\Omega$$

Ahora, calculamos el valor de la fuente de thevenin aplicando un divisor de voltaje:

$$V_{th} = \frac{R_2(V_{cc} - V_{EE})}{R_1 + R_2}$$

$$V_{th} = 10V$$

Ahora aplicando LK en la malla B-E ( $Q_4$ ):

$$V_{th} - R_{th}I_b - V_{be} - R_7(I_e) = 0$$

despejando  $I_b$ , tenemos

$$I_b = \frac{V_{th} - V_{be}}{R_{th} + (\beta + 1)R_7}$$

usando un  $\beta = 230$  entonces

$$I_b = 2,65\mu A$$

Ahora, para calcular  $I_c$ :

$$I_c = \beta I_b = 0,62mA$$

Y por último, para calcular  $V_{ce}$  aplicamos LK:

$$V_{cc} - I_c R_3 - I_e R_4 - V_{ce} - V_{ee} = 0$$

Despejando  $V_{ce}$  y aproximando  $I_c \approx I_e$ , tenemos

$$V_{ce} = V_{cc} - V_{ee} - I_c(R_4 + R_3)$$

$$V_{ce} = 7,79V$$

Como el circuito es simétrico, los voltajes y corrientes  $I_b$ ,  $I_e$ ,  $I_c$ ,  $V_{ce}$  y  $V_{be}$  son iguales.

Ahora, para la parte dinámica, calculamos los parámetros del transistor:

$$V_t = 26mV$$

$$gm = \frac{I_c}{V_t} = \frac{0,62mA}{26mV}$$

$$gm = 23,85 \times 10^{-3}$$

$$R_\pi = \frac{\beta}{gm} = \frac{230}{23,85 \times 10^{-3}}$$

$$R_\pi = 9,6k\Omega$$

Tomando el amplificador en su modo común, en primer lugar calculamos la impedancia de entrada, analizando el circuito obtenemos la expresión:

$$Z_c = R_1 || R_2 || (R_\pi + (1 + gmR_\pi)R_4)$$

sustituyendo los valores tenemos:

$$Z_c = 49K\Omega$$

Ahora la impedancia de salida es:

$$Z_o = gmR_\pi R_3$$

$$Z_o = 1M\Omega$$

Ahora la ganancia es:

$$A_c = -\frac{gmR_\pi R_3}{R_\pi + (1 + gmR_\pi)R_4}$$

$$A_c = 0,31$$

Ahora analizamos en modo diferencial:

$$Z_d = R_1 || R_2 || (2R_\pi + (1 + gmR_\pi)R_5)$$

$$Z_d = 43,99k\Omega$$

$Z_o$  es la misma que en modo común:

$$Z_o = 4,9K\Omega$$

Por último calculamos la ganancia en modo diferencial:

$$A_d = -\frac{gmR_\pi R_3}{2R_\pi + (1 + gmR_\pi)R_5}$$

$$A_d = -2,96$$

Procedemos a analizar la etapa elevadora (Etapa con  $Q_3$ ) aplicamos thevenin de manera que:

$$R_{th} = R_{15} || R_{10}$$

$$R_{th} = 29k\Omega$$

$$V_{th} = \frac{R_{15}}{R_{15} + R_{10}}(V_{cc} - V_{ee})$$

$$V_{th} = 2,61V$$

Aplicando LK en la malla del emisor:

$$V_{th} - V_{be} = R_{11}\beta I_b + R_{th}I_b$$

$$I_b = \frac{V_{th} - V_{be}}{R_{11}\beta + R_{th}}$$

usando un  $\beta = 230$

$$I_b = 10,03\mu A$$

$$I_c = \beta I_b$$

$$I_c = 2,37mA$$

Aplicando LK:

$$V_{ce} = V_{cc} - V_{ee} - I_e R_{11} - I_c R_{16}$$

$$V_{ce} = 2,27V$$

Haciendo el analisis AC, tenemos

$$gm = \frac{I_c}{V_t} = 0,09$$

$$R_\pi = \frac{\beta}{gm} = 2523$$

La impedancia de entrada es:

$$Z_i = R_{15} || R_{10} || r_\pi$$

$$z_i = 2,31k\Omega$$

$$Z_o = \frac{r_\pi + R_{15} || R_{10}}{1 + gm r_\pi}$$

$$Z_0 = 134$$

Ganancia:

$$A = \frac{gm r_\pi R_{16}}{r_\pi} = 49,61$$

Ahora la etapa del amplificador de potencia:

Obtenemos los puntos estáticos de operación, para ello tomamos los capacitores como circuitos abiertos, ya que estamos trabajando en DC y empezamos a calcular las corrientes en el transistor  $Q_4$ .

Asumiremos que las corrientes de base  $I_{bQ5}$  e  $I_{bQ6}$  son muy pequeñas en comparación con la corriente  $I_{R17}$  por tanto la tomaremos como despreciables.

Ahora aplicando LCK en el multiplicador de voltaje ( $Q_4$ ):

$$I_{RV1} + I_{cQ4} = I_{R17} \quad (1)$$

Si ahora asumimos  $I_{bQ4}$  despreciable:

$$I_{RV1} = \frac{V_{BEQ4}}{X R_{V1}} \quad (2)$$

Aplicando LVK tenemos:

$$V_{CEQ4} = I_{RV1} * R_v \quad (3)$$

Usando (2) y (3):

$$V_{CEQ4} = \frac{V_{BEQ4}}{X * R_{V1}} * R_v$$

$$V_{CEQ4} = \frac{V_{BEQ4}}{X} \quad (4)$$

Debido a que el amplificador es de clase AB el voltaje  $V_{CEQ4}$  tiene que ser dos veces el voltaje base emisor  $V_{be}$  para los transistores  $Q5$  y  $Q6$  estén lo más cerca posible de la zona activa y se pueda reducir el efecto crossover de la salida.

Aplicando LVK entre las dos referencias tenemos:

$$10V - R_{17} * I_{17} - 2V_{beQ4} - R_{12} * I_{17} + 10V = 0$$

despejando  $I_{17}$ :

$$I_{17} = \frac{20 - 2V_{beQ4}}{R_{17} + R_{12}} \quad (5)$$

Usando (1), (2) y (5) tenemos:

$$I_{cQ4} = \frac{20 - 2V_{beQ4}}{R_{17} + R_{12}} - \frac{2V_{beQ4}}{R_{V1}} \quad (6)$$

Usando los datos y la ecuacion (6):

$$V_{beQ4} = 0,62V$$

$$R_{17} = R_{12} = 22k\omega$$

$$R_{V1} = 10k\omega$$

$$I_{cQ4} = \frac{20 - 2 * 0,62V}{22k\omega + 22k\omega} - \frac{2 * 0,62V}{10k\omega}$$

$$I_{cQ4} = 302,36\mu A$$

Tomando  $hfe_{Q4} = 230$

$$I_{bQ4} = I_{cQ4}/hfe \quad (7)$$

$$I_{bQ4} = 1,31\mu A$$

$$V_{ceQ4} = 2 * 0,62V = 1,24V$$

Ahora, volviendo a despreciar las corriente de base y aplicando LVK en la malla con los transistores

$$V_{ceQ4} - V_{beQ5} - I_{eQ5} * (R_{13} + R_{14}) - V_{beQ6} = 0$$

despejando  $I_{eQ5}$

$$I_{eQ5} = \frac{V_{ceQ4} - V_{beQ5} - V_{beQ6}}{R_{13} + R_{14}} \quad (8)$$

Tomando  $V_{beQ5} = V_{beQ4} = 0,62V$  y  $V_{beQ6} = 0,55V$ , entonces:

$$I_{eQ5} = \frac{1,24V - 0,62V - 0,55V}{10\omega + 10\omega}$$

$$I_{eQ5} = I_{eQ6} \approx I_{cQ5} \approx I_{cQ6} = 350\mu A$$

Basado en las I de emisor ahora calculamos las corrientes de base, asumiendo que  $hfe_{Q5} = 230$  y  $hfe_{Q6} = 150$

$$I_{bQ5} = I_{cQ5}/hfe = 350\mu A/230 = 1,52\mu A$$

$$I_{bQ6} = I_{cQ6}/hfe = 350\mu A/150 = 2,33\mu A$$

Se asume que  $V_{ceQ5} = V_{ceQ6}$ , por tanto:

$$10 - 2V_{ceQ5} - (R_{14} + R_{13}) * I_{eQ5} + 10 = 0$$

despejando  $V_{ceQ5}$  tenemos:

$$V_{ceQ5} = V_{ceQ6} = \frac{20 - (R_{14} + R_{13}) * I_{eQ5}}{2} \quad (9)$$

por tanto

$$V_{ceQ5} = V_{ceQ6} = \frac{20V - (10 + 10)\omega * 350\mu A}{2} = 9,99V$$

Respuesta en frecuencia:

Condensadores de baja frecuencia:

Los capacitores de baja serán C1, C2, C3, C5, C6 y C7. para obtener las frecuencias de corte usaremos:

$$\omega_{ci} = \frac{1}{C_i R_{eqC_i}}$$

Para  $C_1$  tenemos:

$$\omega_{C1} = \frac{1}{C_1 * R_{eqC1}} = \frac{1}{42K * 10^{-6}} = 23,34rad/s$$

Para  $C_2$  tenemos:

$$\omega_{C2} = \frac{1}{C_2 * R_{eqC2}} = \frac{1}{10K \times 10^{-6}} = 140,34 rad/s$$

Para  $C_3$  tenemos:

$$\omega_{C3} = \frac{1}{C_3 * R_{eqC3}} = \frac{1}{10K \times 10^{-6}} = 23,34 rad/s$$

Para  $C_5$  tenemos:

$$\omega_{C5} = \frac{1}{C_5 * R_{eqC5}} = \frac{1}{10K \times 10^{-6}} = 0,84 rad/s$$

Para  $C_6$  tenemos:

$$\omega_{C6} = \frac{1}{C_6 * R_{eqC6}} = \frac{1}{10K \times 10^{-6}} = 442,6 rad/s$$

Para  $C_7$  tenemos:

$$\omega_{C7} = \frac{1}{C_7 * R_{eqC7}} = \frac{1}{10K \times 10^{-6}} = 65,34 rad/s$$

sabiendo que:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T}$$

Capacitor	Velocidad angular	Frecuencia
C1	23.34 rad / s	3.401 Hz
C2	140.34 rad / s	21.002 Hz
C3	23.34 rad / s	3.561 Hz
C5	0.84 rad / s	0.14 Hz
C6	442.6 rad / s	70.414 Hz
C7	65.34 rad / s	9.013 Hz

La frecuencia de corte inferior es la mayor frecuencia entre todos los valores obtenidos, por lo tanto

$$f_L = 70,414 Hz$$