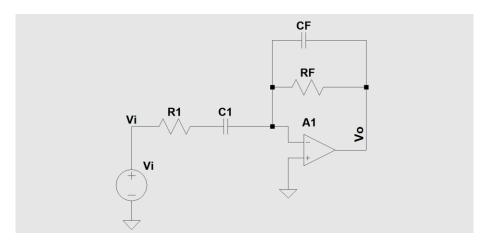
Fondamenti di Elettronica Ingegneria Informatica 2021-2022 seconda prova intermedia 17/12/2021. Tema B

Tre esercizi da risolvere in due ore e mezza. Scrivere nome e numero di matricola su tutti i fogli con le soluzioni e numerare le pagine. Riportare i risultati corrispondenti alle singole domande in una tabella.

Problema 1. Nel circuito in figura, A1 è un amplificatore operazionale ideale, $C_F = 150 \text{pF}$, $R_F = 10 \text{kohm}$, $C_1 = 800 \text{nF}$, $R_1 = 2 \text{kohm}$. Si chiede di:

- 1.1 Scrivere l'espressione della funzione di trasferimento del guadagno in tensione $A_{V}(s)$
- 1.2 Calcolare il guadagno a centro banda
- 1.3 Calcolare le frequenze di taglio
- 1.4 Disegnare il diagramma di Bode del guadagno in tensione



Il parallelo di R₂ e C₂ corrisponde ad un'impedenza Z₂ data da

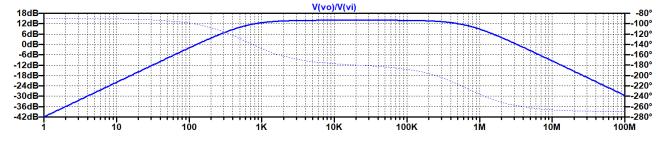
$$\begin{split} R_2 \ parallelo \ C_2 &= \frac{\frac{R_2}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{\frac{R_2}{j\omega C_2}}{\frac{1+j\omega R_2 C_2}{j\omega C_2}} = \frac{R_2}{1+j\omega R_2 C_2} = Z_2 \\ R_1 \ serie \ C_1 &= R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = \frac{1+j\omega R_1 C_1}{j\omega C_1} \\ |A| &= \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{R_2}{1+j\omega R_2 C_2} \frac{j\omega C_1}{1+j\omega R_1 C_1} = \frac{s/\omega_A}{\left(1+\frac{s}{\omega_2}\right)\left(1+\frac{s}{\omega_1}\right)} \end{split}$$

$$\omega_A = (R_2C_1)^{-1} = (10^4 \text{ x } 800 \text{ x } 10^{-9})^{-1} = 125 \text{ rad/s} = 19.90 \text{ Hz}$$

$$\omega_2 = (R_2C_2)^{-1} = (10^4 \text{ x } 150 \text{ x } 10^{-12})^{-1} = 666667 \text{ rad/s} = 106157 \text{ Hz}$$

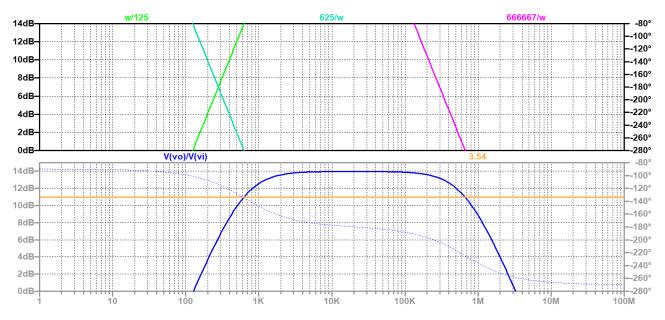
$$\omega_1 = (R_1C_1)^{-1} = (2x10^3 \times 800 \times 10^{-9})^{-1} = 625 \text{ rad/s} = 99.52 \text{ Hz}$$

$$A_v = -10/2 = -5 --> 13.98 \text{ dB}$$



L'asse x riporta i valori della pulsazione (rad/s) in scala logaritmica.

Costruzione del diagramma di Bode



In alternativa

$$\begin{split} |A| &= \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2} \frac{j\omega C_1}{1 + j\omega R_1 C_1} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + j\omega R_2 C_2} \frac{j\omega R_1 C_1}{1 + j\omega R_1 C_1} = \frac{R_2}{R_1} \frac{\omega_2}{\omega_2 + j\omega} \frac{j\frac{\omega}{\omega_1}\omega_1}{\omega_1 + j\omega} = \frac{R_2}{R_1} \frac{s\omega_2}{(\omega_2 + s)(\omega_1 + s)} \\ &= \frac{R_2}{R_1} \frac{s}{(1 + \frac{s}{\omega_2})(\omega_1 + s)} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{(1 + \frac{s}{\omega_2})(\frac{\omega_1}{s} + 1)} \end{split}$$

La funzione di trasferimento corrisponde a quella di un filtro passa banda; il comportamento di tipo passa alto è dato dal termine $(\frac{\omega_1}{s}+1)$ al denominatore, quello passa basso è determinato dal termine $(1+\frac{s}{\omega_2})$.

Il guadagno a centro banda è R_2/R_1 = 5; 20log5=13.98 dB; ω_1 è la pulsazione di taglio inferiore, a 625 rad/s; ω_2 quella superiore a 666.67 krad/s. Al di sotto di ω_1 , il guadagno diminuisce di 20 dB/decade; quindi il guadagno diventa unitario (0 dB) in 14/20=0.7 decadi, in corrispondenza del valore di pulsazione ω_0 . Si ha $log\omega_1$ - $log\omega_0$ =0.7; $log\omega_0$ = $log\omega_1$ -0.7, cioè log(625)-0.7= $log\omega_0$ =2.095880 ovvero ω_0 = $10^{2.0958800}$ = 124.7 rad/s, che coincide approssimativamente, come deve, con il valore di ω_A precedentemente trovato. Alle alte frequenze, il guadagno diventa unitario per $log\omega_0$ +0.7=log(666667)+0.7=5.82391+0.7=6.52391, ovvero ω_0 =106.52391=3341250 rad/s.

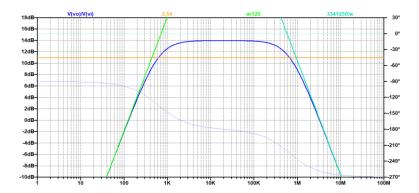
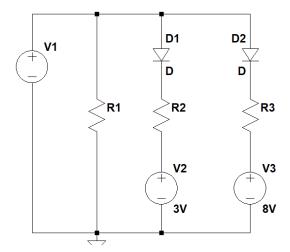


Diagramma di Bode del modulo del guadagno con sovrapposte le funzioni $|s/125|_{dB}$ e $|3341250/s|_{dB}$ che rappresentano il comportamento asintotico, assieme al guadagno a centro banda $20\log 5=13.98$ dB. La retta orizzontale arancione corrisponde ad una diminuzione del guadagno di 3dB rispetto al valore a centro banda, ovvero 11.98 dB ---> 3.54 V/V



Problema 2. Nel circuito in figura i due diodi hanno una tensione di ginocchio V_{γ} = 1V e resistenza parassita in serie R_f nulla. Le tre resistenze valgono R_1 =4k Ω , R_2 =2k Ω , R_3 =1kohm. La tensione V_1 varia tra -10V e +10V.

- 2.1 Identificare le condizioni di accensione per i due diodi
- 2.2 Scrivere l'espressione della corrente in R₁, R₂ e R₃ e graficare la corrente erogata da V₁ in funzione di V₁
- 2.3 Qual è la massima tensione inversa alla quale sono sottoposti D₁ e D₂ ?
- 2.1 D1 si accende per $V_1>4V$, V_2 per $V_1>9V$.
- 2.2 La corrente che scorre in R_1 è V_1/R_1 ; in R_2 è $(V_1-4)/R_2$ per $V_1>4V$; è 0 per $V_1<4V$; la corrente che scorre in R_3 è $(V_1-9)/R_3$ per $V_1>9V$; è 0 per $V_1<9V$.

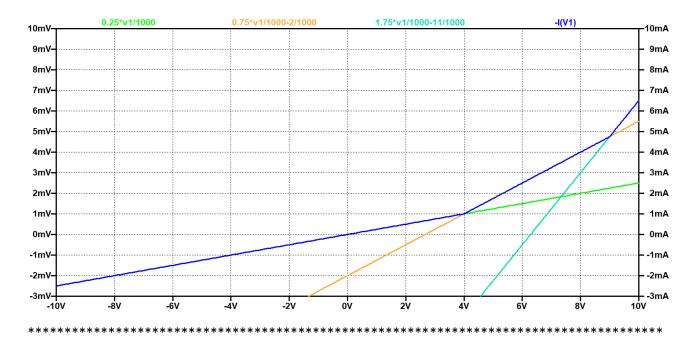
Quindi

$$I_{V1} = V_1/4 = 0.25V_1 \text{ [mA] } -10V < V_1 < 4V$$

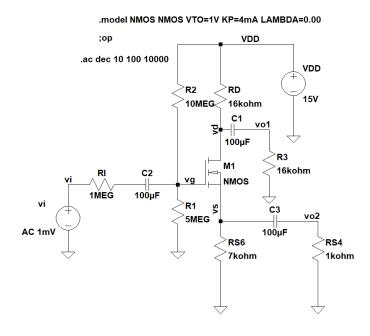
$$I_{V1} = V_1/4 + (V_1-4)/2 = 0.75V_1-2 \text{ [mA]} 4V < V_1 < 9V$$

$$I_{V1} = V_1/4 + (V_1-4)/2 + (V_1-9)/1 = 1.75V_1 - 11$$
 [mA] $9V < V_1 < 10V$

La massima tensione inversa cui è sottoposto D1 è -13V; quella di D2 è -18V.



Problema 3. Nell'amplificatore a elementi discreti mostrato in figura, il transistor MOSFET a canale n ha tensione di soglia $V_{Tn} = 1V$ e $k_n = 4mA/V^2$, $\lambda = 0$ V^{-1} . Il valore delle resistenze e dei condensatori è indicato in figura (si noti che MEG = M Ω)



3.1 Trovare i valori di V_{GSQ}, V_{DSQ} e I_{DQ} nel punto di lavoro. Verificare che il transistor si trovi in saturazione.

Calcolo la tensione V_G con il partitore di tensione R₁-R₂

$$V_G = V_{DD}R_1/(R_1+R_2) = 5*15/15 = 5V$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_G - I_D R_{S6} = 5V - (k_n/2)(V_{GS} - V_{Tn})^2 R_{S6} = 5V - 2*7*(V_{GS}^2 - 2V_{GS}V_{Tn} + V_{Tn}^2) = 5V - 14(V_{GS}^2 - 2V_{GS} + 1)$$

$$V_{GS} = 5 - 14 V_{GS}^2 + 28 V_{GS} - 14$$

$$0 = -14 V_{GS}^2 + 27 V_{GS} - 9$$

```
0 = 14 V_{GS}^2 - 27 V_{GS} + 9
```

$$V_{GS} = [27 + / - [(27^2 - 4*14*9)]^{1/2}]/28 = [27 + / - [(729 - 504]^{1/2}]/28 = [27 + / -15]/28] -> V_{GS} = 1.5V$$

$$I_{DQ} = k_n/2 (V_{GS} - V_{Tn})^2 = 2(0.5)^2 [mA] = 0.5mA$$

 $V_{DSQ} = V_{DD} - I_D(R_D + R_{S6}) = 15 - 0.5(23) = 15 - 11.5 = 3.5V > V_{GSQ} - V_{Tn} = 0.5V$. Il transistor è in saturazione.

3.2 Calcolare il corrispondente valore della transconduttanza g_m $g_m = k_n(V_{GS}-V_{Tn}) = 4(0.5) = 2 \text{ mA/V} = 2 \text{ mS}$

3.3 Qual è il massimo valore di R_D per il quale il transistor è ancora in saturazione ?

La corrente I_D dipende solo da V_{GS} (λ =0). Quindi per trovare la condizione di saturazione basta imporre $V_{DS} = V_{DD} - I_D R_{S6} - I_D R_D = V_{GS} - V_{Tn} --> 15 - 0.5*7 - 0.5*R_D = 0.5$ 15 - 3.5-0.5 = 0.5R_D; 11=0.5R_D; R_D =22 k Ω

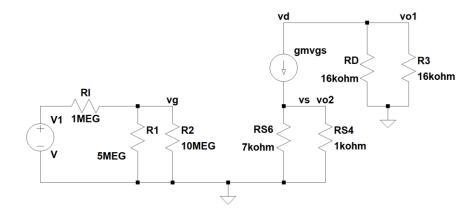
Valori simulati mediante SPICE

```
--- Operating Point ---
```

```
V(vd):
                        7
                                             voltage
V(vg):
                       5
                                             voltage
V(vs):
                     3.5
                                            voltage
V(vdd):
                     15
                                             voltage
                    1.12e-011
5e-010
                                          voltage
V(vo1):
V(n001):
                                             voltage
V(vi):
                  0voltage3.5e-013voltage0.0005device_current0device_current-3.51e-012device_current-0.0005device_current-3.5e-016device_current5e-016device_current-7e-016device_current-5e-016device_current1e-006device_current0.0005device_current1e-006device_current0.0005device_current0.0005device_currentdevice_currentdevice_current0.0005device_current
                     0
                                             voltage
V(vo2):
Id(M1):
Iq(M1):
Ib(M1):
Is(M1):
I(C3):
I(C2):
I(C1):
I(Ri):
I(R2):
I(Rs4):
I(Rs6):
I(R1):
                    0.0005
7e-016
                                             device current
I(Rd):
                                             device current
I(R3):
                     5e-016
I(Vi):
                                             device current
                      -0.000501
                                             device_current
I(Vdd):
Direct Newton iteration for .op point succeeded.
Semiconductor Device Operating Points:
                                    --- MOSFET Transistors ---
Name:
                      m1
```

Name: m1
Model: nmos
Id: 5.00e-04
Vgs: 1.50e+00
Vds: 3.50e+00
Vbs: 0.00e+00
Vth: 1.00e+00
Vdsat: 5.00e-01
Gm: 2.00e-03

3.4 Disegnare il circuito equivalente per piccolo segnale



3.5 Ricavare l'espressione di $A_{V1} = v_{01}/v_i$ e calcolarne il valore

Poniamo $R_1//R_2=R_{in}=5*10/15=50/15=3.33~M\Omega$

Poniamo $R_S = R_{S6} / / R_{S4} = 7*1/8 = 7/8 = 0.875 \text{ k}\Omega$

$$v_{gs} = v_g - v_s = v_g - g_m v_{gs} R_S$$

$$v_{gs} = v_g - g_m R_S v_{gs}$$

$$v_g = (1+g_mR_S)v_{gs}$$

$$v_{gs}=v_g/(1+g_mR_S)$$

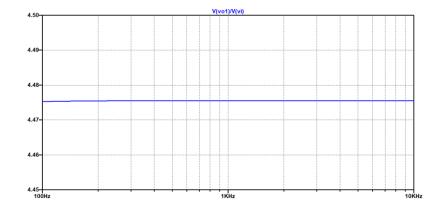
Poniamo $R_L=R_D//R_3=(16*16)/32=8 \text{ k}\Omega$

$$A_{v1} = v_{o1}/v_i = -g_m v_{gs} R_L = -g_m R_L (1/(1+g_m R_S)(v_g/v_i)$$

ma
$$v_g/v_i = R_{in}/R_i + R_{in} = 3.33/4.33 = 0.77$$

quindi
$$A_{v1} = -g_m R_L(1/(1+g_m R_s)(R_{in}/(R_i+R_{in}))$$

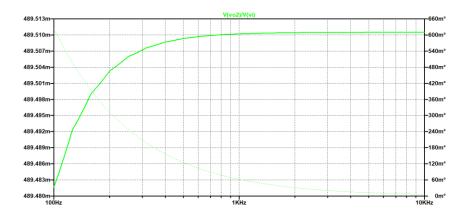
Il risultato della simulazione LTSpice è -4.475 come mostrato in figura



3.6 Ricavare l'espressione di $A_{V2} = v_{02}/v_i$ e calcolarne il valore

$$\begin{split} v_{o2} &= g_m v_{gs} R_S \\ A_{v2} &= v_{o2} / v_{i=} \left(v_{o2} / v_{gs} \right)^* (v_{gs} / v_g)^* (v_g / v_i) = & (g_m R_S)^* (1/(1 + g_m R_S)^* (R_{in} / (R_i + R_{in})) = 2^* 0.875^* 0.364^* 0.77 = 0.49 \text{ V/V} \end{split}$$

Il risultato della simulazione LTSpice è A_{v2}=0.489 V/V, come mostrato nella figura seguente



3.7 Calcolare il valore della resistenza di ingresso vista a valle del condensatore C2

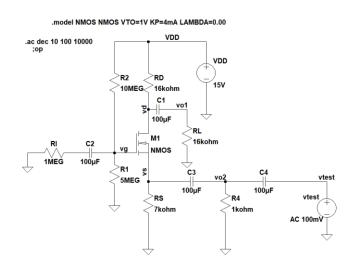
$$R_1//R_2=R_{in}=5*10/15=50/15=3.33~M\Omega$$

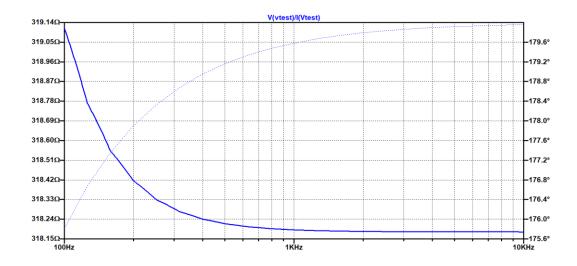
3.8 Calcolare il valore della resistenza di uscita vista da v_{o2} (inclusa R_{S4})

$$R_{out2} = 1/g_m//R_S = 1/2//0.875 \; [k\Omega] = 0.5//1.56 = 0.4375/(0.5 + 0.875) = 0.4375/1.375 = 318\Omega$$

che coincide con il risultato della simulazione LTSpice, come mostrato nelle figure seguenti

Il circuito per la valutazione tramite simulazione SPICE del valore della resistenza di uscita è mostrato in figura. Il valore ottenuto è Ω





3.9 Calcolare il valore della resistenza di uscita vista a monte del condensatore C1 (esclusa R3)

$$R_{\text{out1}} = R_{\text{D}} = 16 k \Omega$$

Caratteristiche degli amplificatori MOS

Source comune con R_s

$$R_{G} = R_{1}//R_{2}; R_{L} = R_{D}//R_{3}$$
 $A_{V} = -\frac{g_{m}R_{L}}{1 + g_{m}R_{S}} \frac{R_{G}}{R_{I} + R_{G}}$
 $R_{IN} = R_{G}$

$$v_g < 0.2(V_{GS} - V_T) (1+g_m R_S)$$

 $R_{OUT} = r_o (1 + g_m R_s) / / R_D$

Drain comune

$$R_{G} = R_{1}//R_{2}$$

$$R_{L} = R_{6}//R_{3}$$

$$A_{V} = \frac{g_{m}R_{L}}{1 + g_{m}R_{L}} \frac{R_{G}}{R_{I} + R_{G}}$$

$$R_{IN} = R_{G}$$

$$R_{OUT} = (1/g_{m})//R_{6} \cong 1/g_{m})$$

$$v_{g} < 0.2(V_{GS} - V_{T}) (1+g_{m}R_{L})$$

Source comune con R_S

$$R_{G} = R_{1}//R_{2}; R_{L} = R_{D}//R_{3}$$

$$A_{V} = -\frac{g_{m}R_{L}}{1+g_{m}R_{S}}\frac{R_{G}}{R_{I}+R_{G}}$$

$$R_{IN}=R_{G}$$

$$R_{OUT}=r_{o}(1+g_{m}R_{S})//R_{D}$$

$$R_{OUT}=r_{o}(1+g_{m}R_{S})/R_{D}$$

$$R_{OUT}=r_{o}(1+g_{m}R_{S})/R_{D}$$

$$R_{OUT}=r_{o}(1+g_{m}R_{S})/R_{D}$$

$$R_{OUT}=r_{o}(1+g_{m}R_{S})/R_{D}$$

$$R_{OUT}=r_{o}(1+g_{m}R_{S})/R_{D}$$

$$R_{OUT}=r_{o}(1+g_{m}R_{S})/R_{D}$$

$$R_{OUT}=r_{o}(1+g_{m}R_{S})/R_{D}$$

$$R_{OUT}=r_{o}(1+g_{m}R_{S})/R_{D}$$

 $v_g < 0.2(V_{GS} - V_T) (1+g_m R_{TH})$

NB: R₃ = resistenza di carico esterna; R₁ resistenza da G a massa R₂ resistenza da G a V_{DD} R₆ = resistenza di source negli schemi a drain comune e gate comune

