Fondamenti di Elettronica per allievi INFORMATICI - AA 2007/2008
Parte I – 1° appello – 29 Febbraio 2008

Indicare chiaramente la domanda a cui si sta rispondendo. Ad esempio 1a) …

Esercizio 1

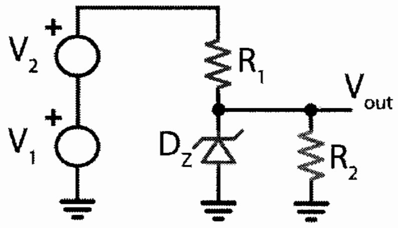
Si consideri il circuito in figura basato su un diodo Zener con $V_Z = 5V$.

Sia $V_1 = 0V$ e $V_2 = 6V \cdot \sin(2\pi ft)$ con f = 1 kHz.

a) Si disegni in un grafico quotato l'andamento nel tempo della tensione Vout.
b) Calcolare la massima potenza dissipata da R_1.

Sia ora $V_1 = 12V$ e $V_2 = 6V \cdot \sin(2\pi ft)$ con f = 1 kHz.

c) Si disegni in un grafico quotato l'andamento nel tempo della tensione Vout.
d) Calcolare la massima potenza dissipata da R_1.
e) Qual è il valore minimo di R_2 che mantiene sempre acceso il diodo Zener?

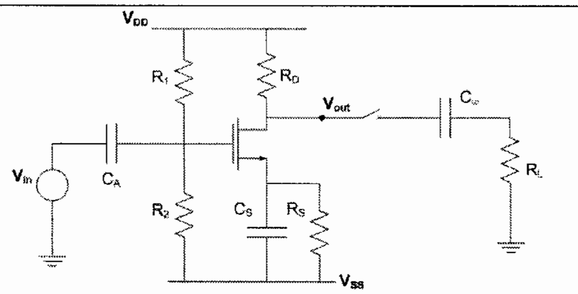


Dati: $R_1 = 1\ k\Omega$, $R_2 = 2\ k\Omega$

Esercizio 2

Si consideri il circuito a transistore MOS in figura.

a) Polarizzare il circuito, verificando la condizione di saturazione per il transistore MOS.
b) Calcolare la carica statica nel canale del transistore.
c) Calcolare il guadagno del circuito G=Vout/Vin e tracciare il diagramma di Bode del modulo e della fase.
d) Viene applicato in ingresso un segnale $V_{in}=0.5V*\sin(2\pi ft)$. Se f=10kHz, il transistore esce dalla condizione di saturazione? E a f=1MHz?
e) Chiudendo l'interruttore sul nodo di uscita, si collega un circuito utilizzatore con resistenza equivalente $R_L=200\Omega$. Calcolare la corrente massima assorbita dall'utilizzatore nel secondo dei due casi del punto precedente (N.B. C_∞ condensatore con capacità infinita).

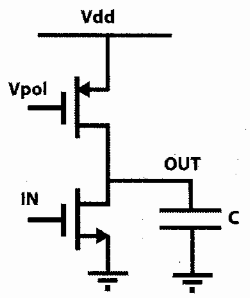


V_T=1V, k=1mA/V^2, V_{DD}=-V_{SS}=6V, R_1=4kΩ, R_2=8kΩ, R_D=4kΩ, R_S=6kΩ, C_A=500nF, C_S=1.2nF, C_{MOS}=2fF.

Esercizio 3

Si consideri il circuito in figura.

a) Determinare il livello di tensione Vout quando Vin=0V. Volendo un'uscita con tensione pari a 0.5V quando in ingresso viene applicata una tensione di 5V: in che condizione lavorerà il MOS n? Dimensionare opportunamente il W/L del mos n.
b) Calcolare il tempo di salita 10-90% dell'escursione dell'uscita quando l'ingresso passa da 5V a 0V.
c) Calcolare la potenza statica dissipata dalla porta con Vin=0V e Vin=5V.
d) Scrivere l'espressione analitica della potenza dinamica dissipata, e calcolarla, quando all'ingresso è applicata un'onda quadra 0-5V con frequenza pari a 1MHz.

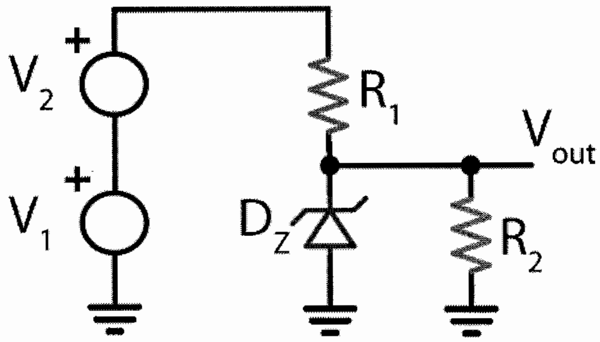


Vdd=5V,Vpol=0V, $|Vt_n|=|Vt_p|$=1V, $1/2\mu_p Cox$=0.3mA/V^2 ,$1/2\mu_n Cox$=1mA/V^2 , C=10pF, $(W/L)_p$=5

FdE - Appello del 28 febbraio 2008

PARTE I^a - Traccia soluzione

Es. 1



$R_1 = 1\ k\Omega$, $R_2 = 2\ k\Omega$

Si consideri il circuito in figura basato su un diodo Zener con $V_Z = 5V$.

Sia $V_1 = 0V$ e $V_2 = 6V\cdot\sin(2\pi ft)$ con f = 1 kHz.

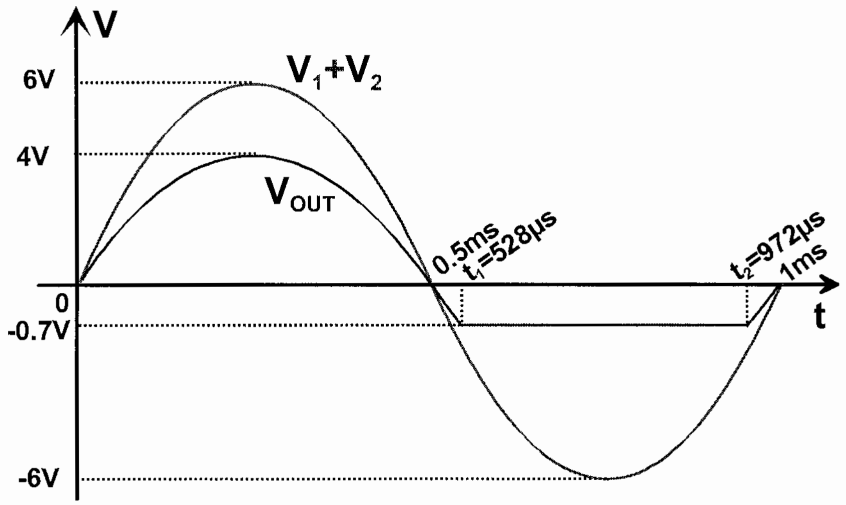
a. Si disegni in un grafico quotato l'andamento nel tempo della tensione V_{out}.
b. Calcolare la massima potenza dissipata da R_1.

Sia ora $V_1 = 12V$ e $V_2 = 6V\cdot\sin(2\pi ft)$ con f = 1 kHz.

c. Si disegni in un grafico quotato l'andamento nel tempo della tensione V_{out}.
d. Calcolare la massima potenza dissipata da R_1.
e. Qual è il valore minimo di R_2 che mantiene sempre acceso il diodo Zener?

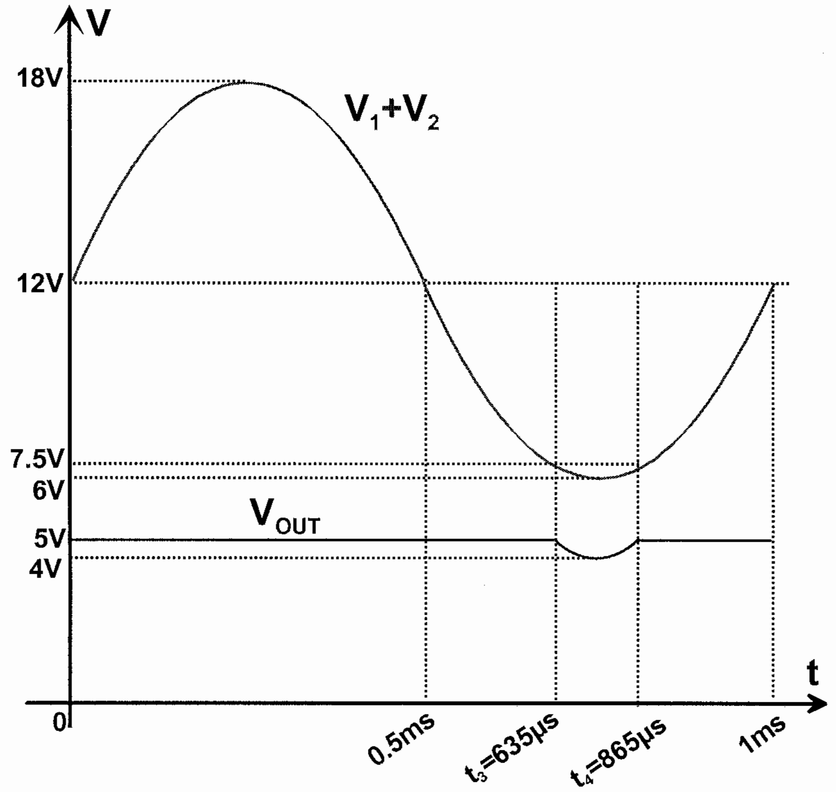
Soluzione:

a. Durante la semionda positiva la massima tensione in inversa che si può avere ai capi del diodo è $6V\cdot(R_2)/(R_1+R_2) = 4V$. Quindi il diodo Zener non si accende.
   Durante la semionda negativa, la minima tensione V_{out} potrebbe arrivare a $-6V\cdot(R_2)/(R_1+R_2) = -4V$, quindi il diodo si accende in diretta (avendo il catodo ad un potenziale minore rispetto all'anodo) e limita la tensione di uscita a -0.7V.
   t_1: $T = 1/f = 1$ ms, $4V\cdot\sin(2\pi f\cdot t^*) = 0.7V$, da cui $t_1 = t^* + T/2 = 528\ \mu s$
   t_2: $t_2 = T - t^* = 972\ \mu s$



b. R_1 dissipa la massima potenza durante la semionda negativa. La massima tensione su R_1 (in valore assoluto) è $6V - 0.7V = 5.3V$, quindi la massima potenza dissipata è $P_{R1,max} = (5.3V)^2/R_1 = 28.02$ mW.
c. Durante la semionda positiva la massima tensione che si può avere in inversa ai capi del diodo è $(12V+6V)\cdot(R_2)/(R_1+R_2) = 12V$. Quindi il diodo Zener si accende e fissa la Vout a $V_Z = 5V$.

Durante la semionda negativa, la minima tensione V_{out} che si potrebbe raggiungere è $(12V-6V)\cdot(R_2)/(R_1+R_2) = 4V$. Quindi il diodo non si accende in diretta.
t_3: $T = 1/f = 1$ ms, $(12V - 6V\cdot\sin(2\pi f\cdot t'))\cdot(R_2)/(R_1+R_2) = 5V$, da cui $t_3 = t' + T/2 = 635$ µs
t_4: $t_4 = T - t' = 865$ µs



d. R_1 dissipa la massima potenza durante la semionda positiva. La massima tensione su R_1 (in valore assoluto) è $18V - 5V = 13V$, quindi la massima potenza dissipata è $P_{R1,max} = (13V)^2/R_1 = 169$ mW.
e. Affinchè il diodo Zener sia sempre acceso, è necessario che $(12V-6V)\cdot(R_2)/(R_1+R_2) > 5V$, da cui segue $R_2 > 5k\Omega$.

Parte I^a

Esercizio 2

a) $V_G = V_{SS} + \frac{V_{DD} - V_{SS}}{R_1 + R_2} R_2 = -6V + \frac{12}{12} \cdot 8 = +2V$

$$\begin{cases} I_D = k\,(V_G - V_S - V_t)^2 \\ V_S = V_{SS} + I_D \cdot R_S \end{cases} \qquad \begin{aligned} I_D &= k\,(V_G - V_t - V_{SS} - I_D \cdot R_S)^2 \\ I_D &= 10^{-3}\,(2 - 1 + 6 - I_D \cdot 6 \cdot 10^3)^2 \end{aligned}$$

$I_D = 10^{-3}\,(7 - 6 \cdot 10^3 I_D)^2 \qquad I_D = 49 \cdot 10^{-3} + 36 \cdot 10^3 I_D^2 - 84\, I_D$

$36 \cdot 10^3 I_D^2 - 85\, I_D + 49 \cdot 10^{-3} = 0$

$$I_D = \frac{85 \pm \sqrt{85^2 - 4 \cdot 49 \cdot 36}}{72 \cdot 10^3} = \frac{85 \pm \sqrt{7225 - 7056}}{72 \cdot 10^3} =$$

$$= \frac{85 \pm 13}{72 \cdot 10^3} = \begin{cases} 1{,}36\ mA\ (V_S = 2{,}16\ V)\ \text{NO} \\ 1\ mA\ (V_S = 0V)\ \text{OK} \end{cases}$$

$V_D = 2V \qquad V_{DS} = 2V > V_{GS} - V_t = 1\ V$ ok, MOS saturo

$g_m = 2K\, V_{OD} = 2 \cdot 1 \cdot 1 = 2\ mA/V \qquad \frac{1}{g_m} = 500\ \Omega$

b) $Q_{ch\,sat} = C_{CH}|_{V_{DS}=0} \cdot \frac{1}{2} \cdot V_{OD} =$ (La carica nel canale del MOS saturo è la metà della carica di canale $= C_{MOS} \cdot V_{OD}$)

$= \frac{C_{MOS}}{2} \cdot (V_{GS} - V_t) = 10^{-15} \cdot 1$

$= 1\ f$ Coulomb

c) C_A introduce uno zero nell'origine e un polo $f_{p1} = \frac{\omega_{p1}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \tau_{CA}}$

dove $\tau_{CA} = C_A \cdot R_1 // R_2 = 0{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{32 \cdot 10^3}{12} = 1{,}33\ ms$

$f_{p1} = \frac{1}{2\pi \tau_{CA}} = 0{,}12 \cdot 10^3 \simeq 120\ Hz$

Prima che intervenga lo zero di C_S il circuito guadagna $\sim -\frac{R_D}{R_S}$

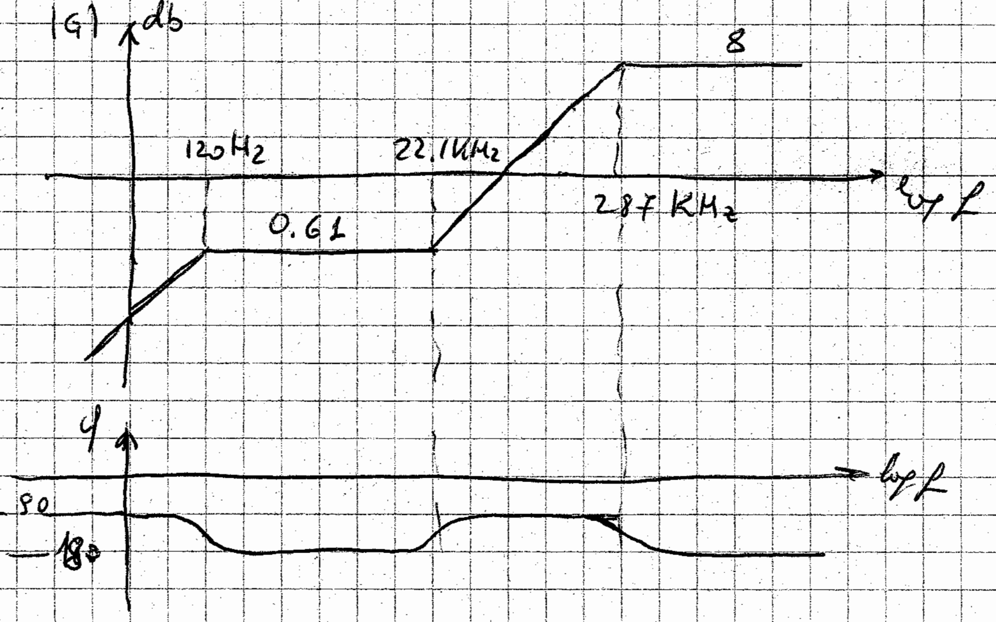
più precisamente $G_1 = -\frac{R_D}{R_S + \frac{1}{g_m}} = -0{,}615 \simeq -0{,}6$

Dopo il polo di C_S il circuito guadagna $G_2 = -g_m R_D = -8$

Calcoliamo polo e zero di C_S: $f_{pC_S} = \frac{1}{2\pi C_S (R_S // 1/g_m)} = 28\ kHz$

$$f_{z C_S} = \frac{1}{2\pi C_S R_S} = 22,1\ KHz$$

Diagramma di Bode di modulo e fase



d) ~~Alla~~ $f = 10\ KHz$ il guadagno $= -0.61 = G_1$

Alla $f = 1\ MHz$ il guadagno $= -8 = G_2$

Perché ci sia saturazione occorre che sia verificata la condizione $V_{ds} > V_{gs} - V_t$

dove $V_{ds} = V_d - V_s$ e $V_{gs} = V_g - V_s$

e V_d, V_g e V_s rappresentano le tensioni totali di drain, gate e source (polarizzazione + segnale): $V_d = V_D + G v_{in}$ e $V_g = V_G + v_{in}$. In questo caso poi $V_G = V_D \ (= 2V)$

Allora, la cd $V_{ds} > V_{gs} - V_t$ diventa

$$V_d - \cancel{V_s} > V_g - \cancel{V_s} - V_t \quad \text{cioè} \quad \cancel{V_D} + G v_{in} > \cancel{V_G} + v_{in} - V_t$$

G può assumere i due valori trovati prima $G_1 = -0.61$ e $G_2 = -8$

Quindi occorre verificare la condizione

$(v_{in} = 0.5 \sin 2\pi f t)$ $\quad v_{in} < \frac{V_t}{1 - G_{1,2}} =$ $\frac{1}{1+0.61} = 0.62$ cd verificata; $\frac{1}{1+8} = 0.11$ cd non verificata

e) $i_L = \frac{v_{out}}{R_L} = \frac{G v_i}{R_L}$ dove $G = -g_m R_D // R_L$ quindi $i_L = -\frac{g_m}{\cancel{R_L}} \frac{R_D \cancel{R_L}}{R_D + R_L} v_i = 0.35\,mA$

PARTE I^a

Esercizio 3

a) Per $V_{in} = 0\,V$ il MOS n è spento, il p conduce sempre, quindi

$$V_{out} = V_{dd} = 5\,V$$

Per $V_{in} = 5\,V$ il MOS n è in conduzione $(V_{GS} = 5\,V > V_t = 1)$ ed è forzato a portare la corrente del MOS p quando il condensatore C ha raggiunto lo stato stazionario finale.

$$I_{d\,MOS_p} = K\left(|V_{GS}| - |V_{t_p}|\right)^2 = \frac{1}{2}\mu_p C_{ox}\left(\frac{W}{L}\right)_p \left(5V - 1V\right)^2 =$$

$$= 0.3 \cdot 5 \cdot (4)^2 = 24\,mA$$

Occorre dunque che $R_{DS_{ON}\,MOS_n} = \frac{0.5}{24\cdot 10^{-3}} = 20{,}8\,\Omega$

Essendo $R_{DS_{ON}} = \frac{1}{2K_n V_{OD}} = \frac{1}{2\left(\frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\right)\left(\frac{W}{L}\right)_n V_{OD}} =$

$$= \frac{1}{2\cdot 10^{-3}\left(\frac{A}{V^2}\right)\cdot\frac{W}{L}\cdot(5-1)} = 125\cdot\frac{L}{W}\,[ohm]$$

Quindi, uguagliando $\left(\frac{W}{L}\right)_n = \frac{125}{20{,}8} \simeq 6$.

b) Quando V_{out} passa da $0.5\,V$ a $5\,V$ il pMOS lavora in saturazione fino a quando $|V_{GD}| \le |V_t|$, ma $V_{out} = |V_{GD}|$, quindi $V_{out} \le 1\,V$, poi lavora in zona Ohmica. Siccome il tempo di salita misura l'intervallo di tempo tra $0.95\,V$ e $4{,}55\,V$ dell'uscita, possiamo approssimare che il pMOS lavori sempre in zona ohmica, trascurando i primi $50\,mV$ in cui lavora in saturazione.

La legge temporale che segue l'uscita è quindi

$$V_{out}(t) = 0{,}5V + 4{,}5V\left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad \text{con } \tau = R_{PMOS}\cdot C$$

$t_2 = t_{90\%}$ $\quad 4{,}05 = 4{,}5\left(1 - e^{-t_2/\tau}\right)$ $\qquad$ e $R_{PMOS} = \frac{|V_{DS}|_{sat}}{I_{D\,sat}} = \frac{4V}{24mA} =$

$t_1 = t_{10\%}$ $\quad 0{,}45 = 4{,}5\left(1 - e^{-t_1/\tau}\right)$ $\qquad = 166\,\Omega$

da cui $\quad t_2 - t_1 = 2.2\,\tau = 3.66\,ns$ $\qquad$ quindi $\tau = 1.66\,ns$

c) Potenza statica : per $V_{in} = 0$ $\quad P_{st} = 0\,W$ (nMos spento!)

per $V_{in} = 5V$ $\quad P_{st} = V_{dd} \times I_d = 120\,mW$

d) Il condensatore C si carica e si scarica tra 0.5 e 5 V. La carica che si sposta è data da $Q = C \cdot 4.5\,V = 45 \cdot 10^{-12}\,pC$.
Questa carica viene spostata dal generatore di 5 V, quindi l'energia messa in gioco dal generatore è $E = Q \cdot 5 = 225\,pJ$
La potenza dinamica è quindi $P = E \cdot f = 225\,\mu W$

Fondamenti di Elettronica per allievi INFORMATICI - AA 2007/2008
Parte II – 1° appello – 29 Febbraio 2008

Indicare chiaramente la domanda a cui si sta rispondendo. Ad esempio 1a) …

Esercizio 1

Si consideri lo stadio di amplificazione in figura (trascurare C_2 nei punti a), b) e c)):

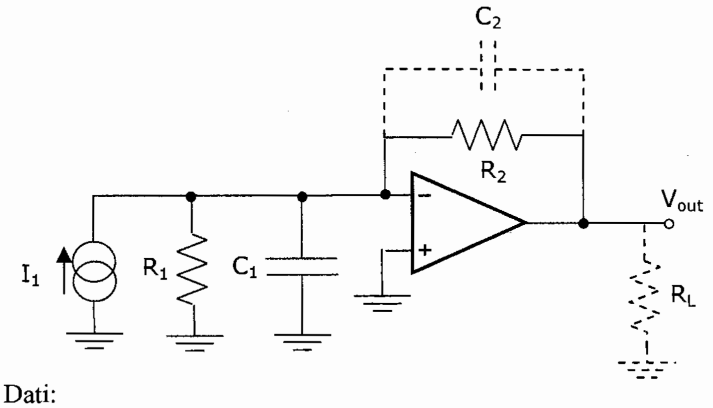
a) Sia $I_1(t)$ un gradino di ampiezza 10 μA. Assumendo l'A.O. ideale scrivere l'espressione di $V_{out}(t)$ e rappresentarne graficamente l'andamento.

b) Sia R_L=100 Ω la resistenza di carico dello stadio. b1) Calcolare la corrente (i_0) erogata dall'A.O. con un gradino di ingresso di 10μA. b2) Determinare la massima ampiezza del gradino in ingresso compatibile con la limitazione $i_0|_{max}$=1mA.

c) Calcolare il margine di fase dell'amplificatore.

d) Inserire la capacità C_2 e determinarne il valore che garantisca un margine di fase di 90 gradi.

e) Mantenendo il valore trovato di C_2 e assumendo l'A.O. ideale, calcolare l'espressione della risposta $V_{out}(t)$ ad un gradino di ingresso di 10 μA e rappresentarne graficamente l'andamento.



Dati:
R_1=1 kΩ, R_2=50 kΩ, C_1=10 nF
A_0=100 dB, GBWP=10 MHz

Esercizio 2

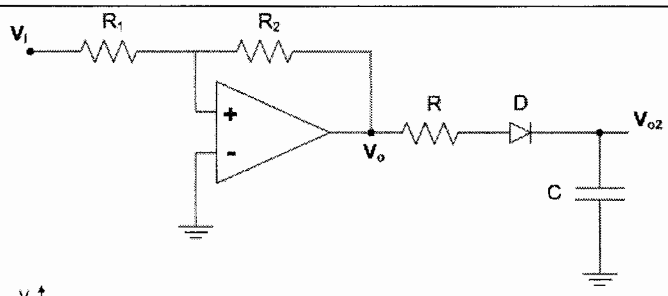
Si consideri lo stadio ad operazionale in figura, in cui vale:
V_{OH}=-V_{OL}=4V, R_1=2kΩ, R_2=8kΩ, R=3kΩ, C=90nF, V_D=0.7V.

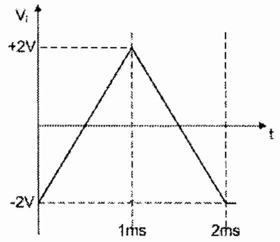
a) Tracciare la caratteristica ingresso/uscita Vo/Vi, sapendo che la dinamica di uscita dell'operazionale va da V_{OL} a V_{OH}.

b) Si calcoli l'effetto sulla caratteristica ingresso/uscita di un offset in ingresso dell'operazionale Vos=100mV.

c) Assumendo il condensatore C inizialmente scarico, tracciare le risposte temporali quotate V_O e V_{O2} al segnale in ingresso Vi rappresentato in figura. Calcolare la carica sul condensatore a fine ciclo (t=2ms).

d) Se la corrente massima erogabile dall'operazionale è 1mA, la risposta considerata al punto precedente è ancora valida?





Esercizio 3

Si consideri il circuito a lato:

a) Volendo che l'ADC converta solo il segnale prodotto dal generatore V_d, scegliereste R_x=KR_1 oppure R_x=KR_2? Giustificare la risposta.

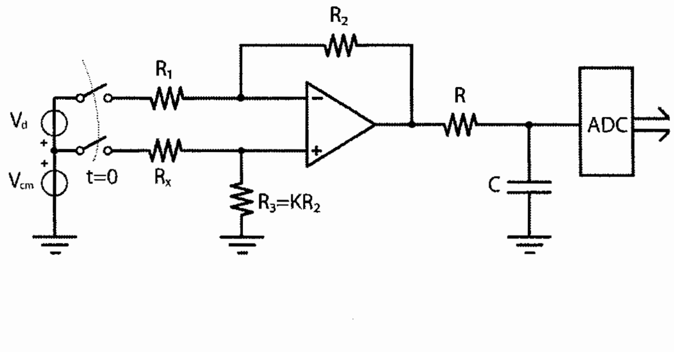
b) Assumendo 0<V_d<10V e R_x=R_1=R_2=R_3=10kΩ, determinare la dinamica di ingresso dell'ADC, il numero dei bit (risoluzione richiesta 1 parte su 500) e il valore dell'LSB riferito all'ingresso.

c) Assumendo RC=$(2\pi)^{-1}$ ms, quanto occorre ritardare l'inizio della conversione dalla chiusura degli switch di ingresso?

d) Supponendo che a V_d sia sovrapposto un disturbo sinusoidale V_n=0.1Vsin(2π10kHz t), il codice di uscita dell'ADC risente o no di tale disturbo [RC=$(2\pi)^{-1}$ms]? Giustificare la risposta.

e) Se si utilizzasse un ADC a doppia rampa con tempo di integrazione di 0.3ms, si potrebbe eliminare la rete RC, senza che il codice di uscita risenta del disturbo del punto d)? Giustificare la risposta.

f) Esprimere in LSB l'errore dovuto a V_{cm}=10V (Assumere per l'A.O. un CMRR=60dB e le R del punto b).

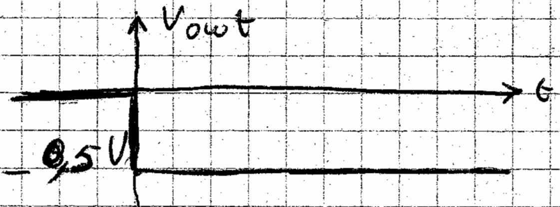


FdE - Appello del 28 febbraio 2008

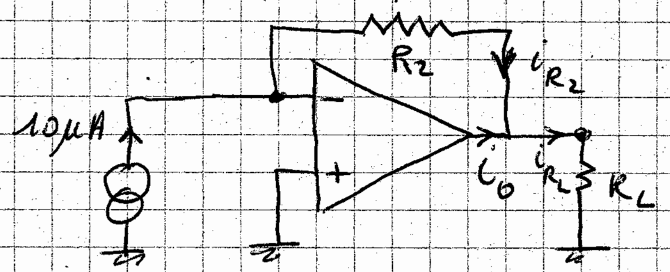
Parte II^a - Traccia soluzione

1a) $V_{out}(t) = -R_2\, I_1(t) = -R_2 \cdot 10\,\mu A\; 1(t) = -0.5\,V \cdot 1(t)$

dove $1(t)$ è il gradino di ampiezza unitaria.



1b1)



$i_{R_L} = i_0 + i_{R_2}$

$i_0 = i_{R_L} - i_{R_2}$

$i_{R_L} = \frac{V_{out}}{R_L}$ $\quad i_{R_2} = 10\,\mu A$

$i_{R_L} = -\frac{0.5}{100} = -5\,mA$

Quindi $i_0 \simeq -5\,mA$ $\left(\simeq -\frac{R_2}{R_L} I_1(t)\right)$

1b2) Essendo, in quanto visto prima $|I_0| \simeq \left|-\frac{R_2}{R_L} I_1(t)\right|$, imponendo $|i_0|_{max} \leq 1\,mA$ si ricava I_{1max}

$$I_{1max} = \frac{R_L}{R_2}\, i_{0max} = \frac{100}{50 \cdot 10^3} \cdot 10^{-3} = 2\,\mu A$$

1c) $A_0 = 10^5$ $\quad$ GBWP $= 10\,MHz$ $\quad f_0 = \frac{GBWP}{A_0} = 100\,Hz$

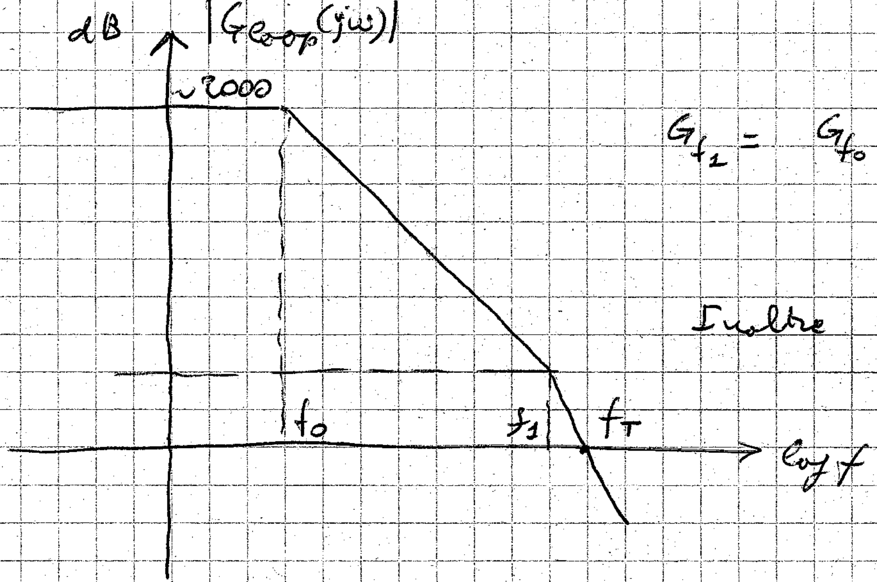
$G_{loop} = -A(s) \cdot \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$ dove $Z_1 = R_1 \,//\, C_1 = \frac{R_1}{1 + sR_1C_1}$

$Z_2 = R_2$

e quindi $\frac{Z_1}{Z_1+Z_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2(1+sR_1C_1)} = \frac{R_1}{R_1+R_2} \cdot \frac{1}{1 + sR_1//R_2\,C_1}$

$G_{loop}(0) = -\frac{A_0 R_1}{R_1+R_2} = -\frac{10^5 \cdot 10^3}{51 \cdot 10^3} \simeq -2000$

$G(s)$ ha due poli, uno introdotto da $A(s)$ alla frequenza $f_0 = 100\,Hz$, l'altro $f_1 = \frac{1}{2\pi\, R_1//R_2\, C_1} = 15,9\,kHz$



$$G_{f_1} = G_{f_0} \cdot f_0 / f_1 \simeq \frac{2000 \cdot 100}{15.9 \cdot 10^3} \simeq$$

$$\simeq 12.57$$

Inoltre $1 \cdot f_T^2 = 12.57 \cdot f_1^2$

da cui

$$f_T = \sqrt{12.57} \cdot f_1 \simeq 56.4 \text{ KHz}$$

La fase di $G_{loop}(j\omega)$ a f_T vale

$$\varphi\Big|_{f_T} = -180 - 90 \underbrace{- \operatorname{arctg} \frac{f_T}{f_1}}_{\simeq 74.2^\circ} = -344.2^\circ$$

Da cui il margine di fase $\varphi_m = 360^\circ - 344.2 \simeq 15.8^\circ$

1d) Per avere un margine di fase di 90 gradi, $G_{loop}(j\omega)$ deve avere un solo polo. Dato che C_2 introduce uno zero e sposta il polo f_1, facciamo in modo di cancellare il polo spostato con lo zero.

$$G_{loop}(s) = -A(s) \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} = -A(s) \frac{1 + sR_2C_2}{1 + s(R_1 // R_2)(C_1 + C_2)}$$

Imponiamo $R_2 C_2 \simeq \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}(C_1 + C_2) \simeq R_1 (C_1 + C_2)$ $(R_1 \ll R_2)$

Quindi $C_2 = C_1 \frac{R_1}{R_2 - R_1} \simeq 10\,nF \cdot \frac{1K}{49K} \simeq 0.2\,nF$

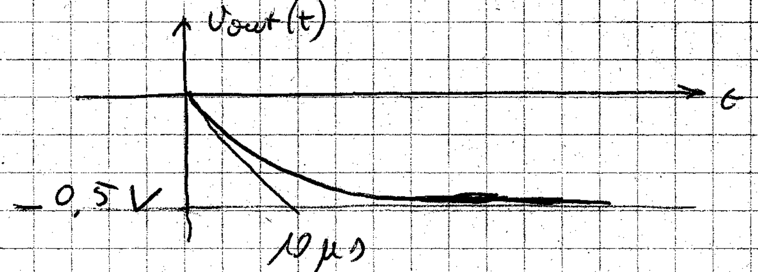
In questo modo $f_z = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = f_1^* = \frac{1}{2\pi\, R_1 // R_2\, (C_1 + C_2)} \simeq 15.9 \text{ KHz}$

e abbiamo cancellato il polo con lo zero, ottenendo un $\varphi_m = 90^\circ$

1e) $\frac{V_{out}(s)}{I_1(s)} = -Z_2 = -\frac{R_2}{1+sR_2C_2}$ polo di Z_2 $f_2 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = 15{,}9\,kHz$

$\tau = R_2 C_2 = 10\,\mu s$

$v_{out}(t) = -0{,}5V\left(1-e^{-t/\tau}\right)$

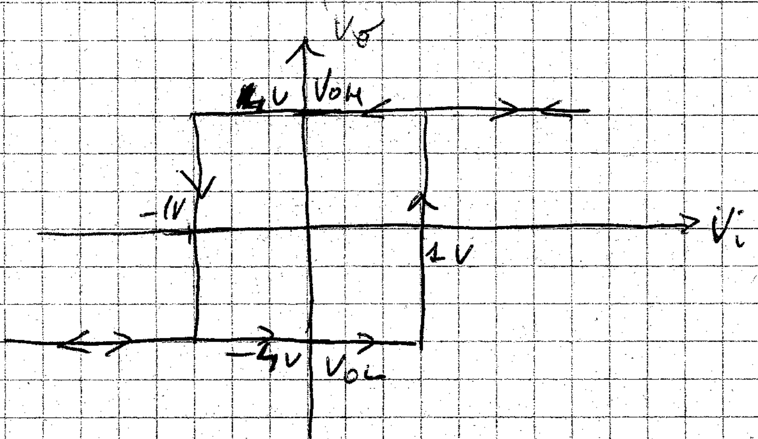


2a) Assumiamo che $V_0 = V_{OH}$, allora deve essere $v^+ > 0$, cioè

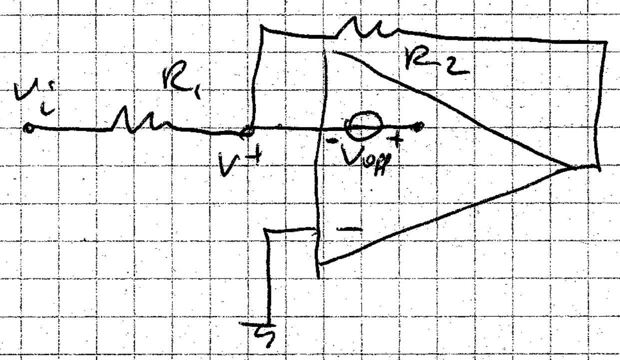
$$v^+ = v_i + \frac{V_{OH}-v_i}{R_1+R_2}\cdot R_1 > 0$$

Il che implica $v_i \geq -\frac{V_{OH}R_1}{R_2} = -1V$

Viceversa $V_0 = V_{OL}$ se $V_i \leq -\frac{V_{OL}}{R_2}R_1 = 1V$



2b) Modellando V_{off} come nel disegno, si avrebbe



$V_0 = V_{OH}$ se $V^+ + V_{off} > 0$

da cui

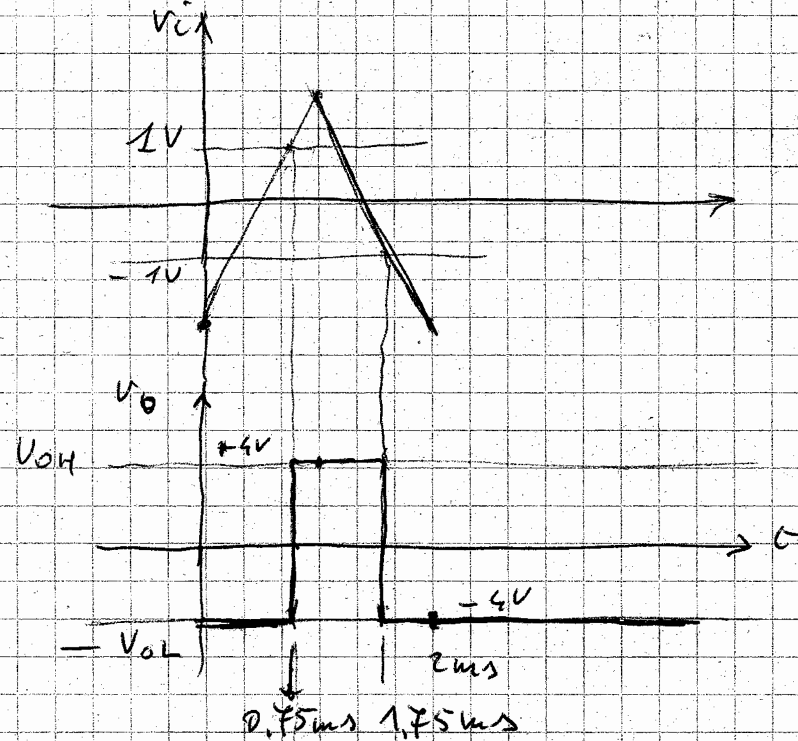
$$V_i > -\frac{V_{OH}R_1}{R_2} - V_{off}\frac{R_1+R_2}{R_2}$$

$$= -1{,}125\,V$$

Analogamente, per $V_o = V_{OL}$ $V_i < -\frac{V_{OL} R_1}{R_2} - V_{OH}\frac{R_1+R_2}{R_2} = +0{,}875V$

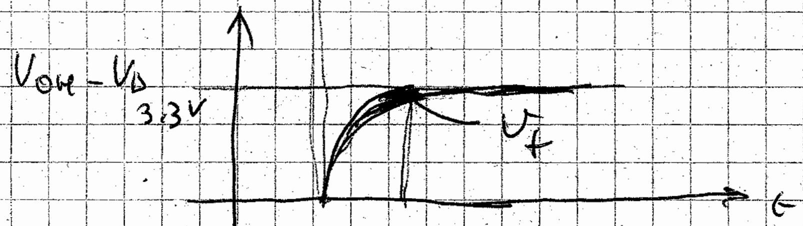
L'offset trasla rigidamente la caratteristica verso sinistra di 0,125 V

2c)



Il condensatore si carica quando $V_o = V_{OH}$ e il diodo è acceso, quindi per un tempo pari a 1ms, con costante di tempo RC e con tensione $= V_{OH} - V_D$. Quindi la legge di carica è

$$v(t) = (V_{OH}-V_D)\left(1-e^{-t/\tau}\right) \qquad \tau = RC = 270\,\mu s$$



$$V_f = v(1ms) = 3.3\left(1-e^{-\frac{1000}{270}}\right) = 3.3(\underbrace{1-0.025}_{0.975}) = 3.22V$$

$$Q_{finale} = 3.22 \cdot C = 290 \text{ nCoulomb}$$

2d) $I_{max} = C\left.\frac{dv}{dt}\right|_{t=0} = C\cdot\left(\frac{V_{OH}-V_D}{\tau}\right) = \frac{90\cdot10^{-9}\cdot 3.3}{270\cdot10^{-6}} = 1.1\times10^{-3}$
$= 1.1mA$

Troppo grande per l'A.O.

3a) Bisogna porre $R_x = K R_1$, in modo che

$$V_o = -V_d\left(-\frac{R_2}{R_1}\right) + V_{cm}\left(\frac{R_3}{R_x+R_3}\;\frac{R_1+R_2}{R_1} - \frac{R_2}{R_1}\right) = V_d\,\frac{R_2}{R_1}$$

3b) Dinamica ADC $0 \div 10\,V$; $n = 9$; $LSB_{Rif.\,ing} \simeq 20\,mV$ $(19{,}53\,mV)$

3c) Posto T = ritardo e detta $v_c(t)$ la tensione di ingresso dell'ADC, pongo la condizione

$$V_{FS\,ADC} - v_c(T) \leq LSB \simeq 20\,mV$$

dove $V_{FS\,ADC} = 10\,V$ $\quad v_c(T) = V_{FS\,ADC}\left(1 - e^{-T/\tau}\right)$

$$e \quad \tau = RC = \frac{1}{2\pi}\,ms$$

da cui $T = -\tau \ln 2\cdot 10^{-3} = \dfrac{6.215}{2\pi} \simeq 1\,ms$ (valore esatto $0{,}989\,ms$)

↳ ($0{,}992\,ms$ con $LSB = 19{,}53\,mV$)

3d) Il polo di RC è $f_p = 1\,KHz$, quindi la sinusoide a $10\,KHz$ è attenuata di un fattore 10. La sua ampiezza risulta perciò di $10\,mV$ all'ingresso dell'ADC, pari a $0.5\,LSB$ circa.

3e) Si, il disturbo verrebbe integrato per tre periodi interi e quindi sparirebbe in uscita.

3f) La tensione di modo comune all'ingresso dell'A.O. risulta

$$V_{CM\,AO} = V_{cm}\,\frac{R_3}{R_x+R_3} = \frac{V_{cm}}{2} = 5\,V$$

$$\text{Errore} = \frac{V_{CM\,AO}}{CMRR} = \frac{5}{10^3} = 5\,mV$$ che, riportato all'ingresso

vale $10\,mV \simeq \dfrac{LSB}{2}$