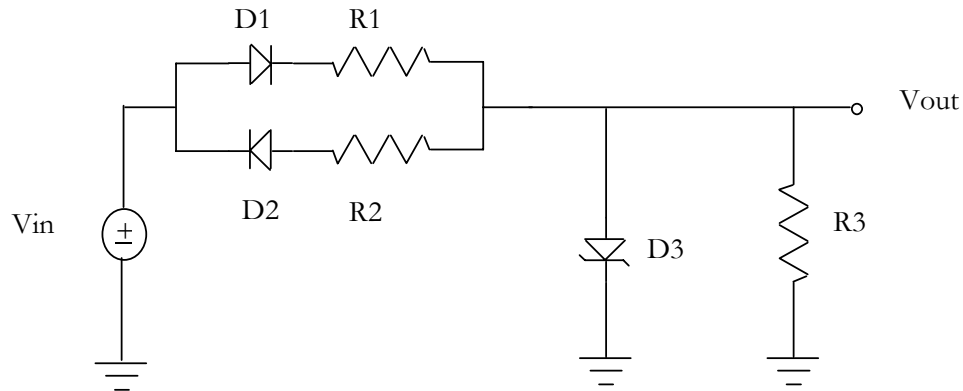


Circuiti con diodi e resistenze: Analisi e Progetto

Esercizio 1:

Calcolare e descrivere graficamente la caratteristica di trasferimento del seguente circuito:

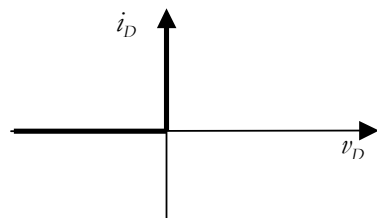


$$R1=10\text{ K}\Omega \quad R2=5\text{ K}\Omega \quad R3=5\text{ K}\Omega \quad V_{z3}=5\text{ V}$$

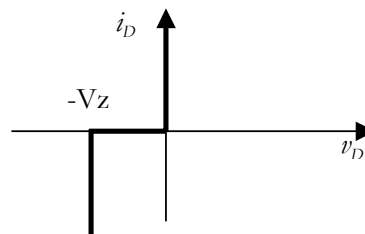
Svolgimento

Per i diodi vengono usati i modelli di figura:

Modello per il diodo ideale



Modello per il diodo zener



La tensione di uscita è presa su due rami posti in parallelo. Il ramo con il D3 assorbe corrente quando $|V_{out}| > V_Z$.

Per determinare la caratteristica ingresso-uscita si studia il valore che assume la tensione di uscita V_{out} al variare della tensione di ingresso V_{in} , poiché nel circuito sono presenti dei diodi è necessario determinare il loro stato.

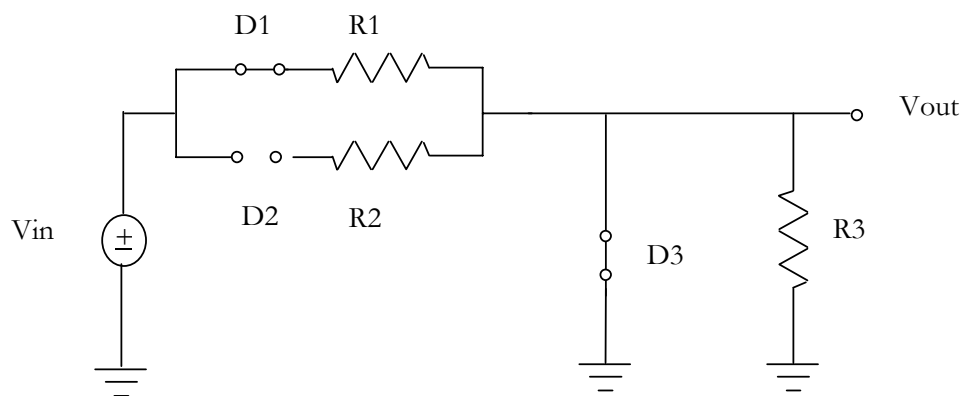
Tensioni di ingresso positive: $V_{in} \geq 0\text{ V}$

D1 polarizzazione diretta.

D2 polarizzazione inversa.

D3 polarizzazione diretta.

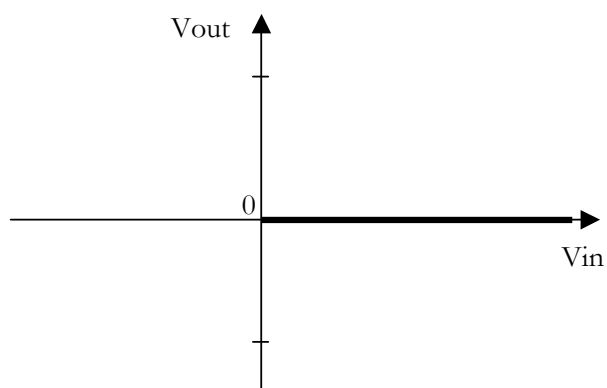
Il circuito equivalente finale è:



Si può notare che R3 viene cortocircuitata (infatti è fra due punti allo stesso potenziale per cui non ci scorre corrente) e la tensione di uscita vale:

$$V_{out} = 0V$$

La caratteristica ingresso-uscita è:

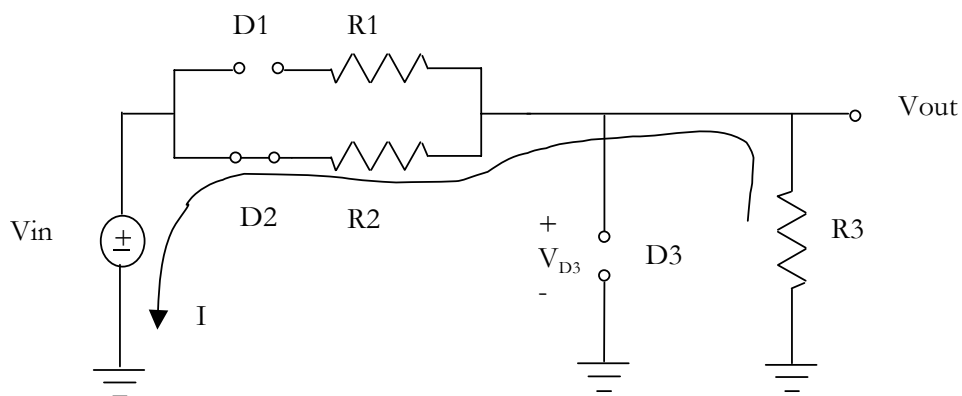


Tensioni di ingresso negative: $V_{in} \leq 0V$

D1 polarizzazione inversa.

D2 polarizzazione diretta.

D3 polarizzazione inversa.



Nel circuito equivalente finale è presente una maglia in cui scorre la corrente I e la tensione di uscita vale:

$$V_{out} = \frac{R_3}{R_3 + R_2} \cdot V_{in}$$

sostituendo i valori delle resistenze

$$V_{out} = \frac{5K\Omega}{5K\Omega + 5K\Omega} \cdot V_{in} = \frac{5}{10} \cdot V_{in} = \frac{1}{2} \cdot V_{in}$$

la caratteristica ingresso-uscita è una retta con pendenza $1/2$.

(N.B. le unità di misure sono IMPORTANTI e devono essere SEMPRE specificate)

Il diodo $D3$ non assorbe corrente fino a che la tensione ai suoi capi non raggiunge il valore della tensione di zener, cioè fino a quando risulta $-5V \leq V_{D3}$. Dal circuito si ha che:

$$V_{D3} = V_{out}$$

$$-5V \leq V_{out} \Rightarrow V_{out} \geq -5V$$

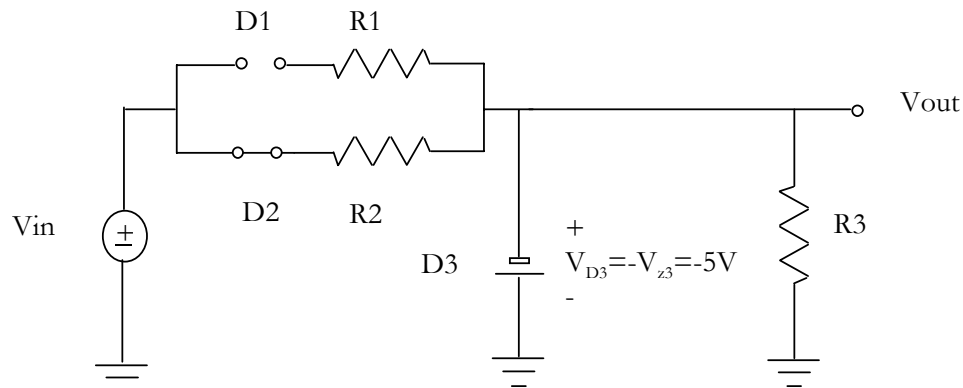
il valore limite della tensione di ingresso corrispondente è:

$$V_{out} = \frac{1}{2} V_{in} = -5V \Rightarrow V_{in} = -10V$$

Per tensioni $V_{in} \leq -10V$ il diodo $D3$ entra in zona zener, scorre corrente $i_{D3} \neq 0$ e la tensione ai suoi capi è fissata al valore:

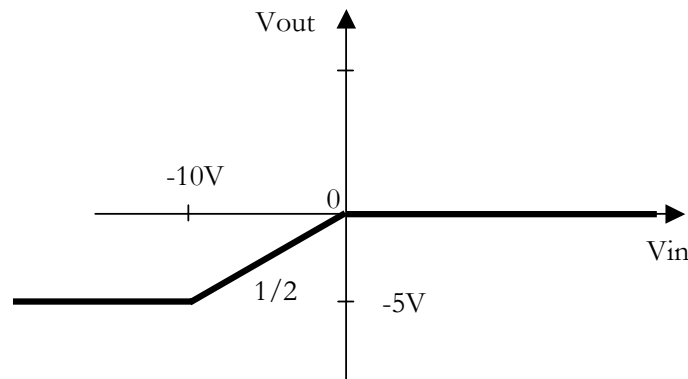
$$V_{D3} = -5V \Rightarrow V_{out} = -5V$$

Il circuito equivalente è il seguente



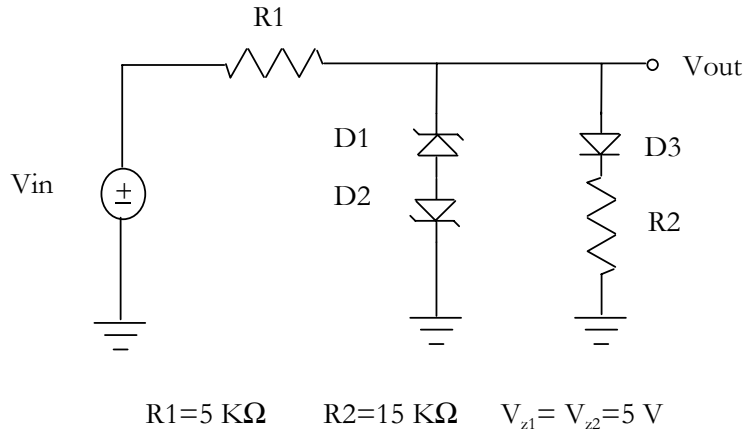
La caratteristica finale è:

(N.B. i grafici devono essere quotati correttamente e devono essere indicate le pendenze sulle rette corrispondenti).



Esercizio 2:

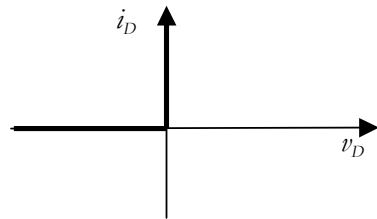
Calcolare e descrivere graficamente la caratteristica di trasferimento del seguente circuito:



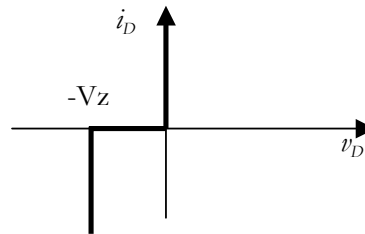
Svolgimento

Per i diodi vengono usati i modelli di figura:

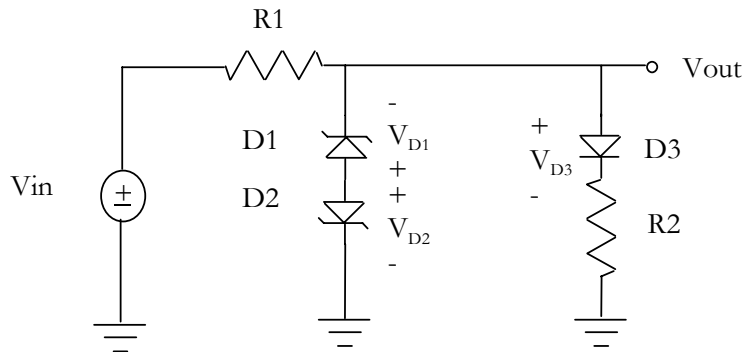
Modello per il diodo ideale



Modello per il diodo zener



La tensione di uscita è presa su due rami posti in parallelo. Il ramo con i diodi D1 e D2 assorbe corrente quando $|V_{out}| > V_Z$, nel secondo ramo (R_2 in serie con D3) scorre corrente solo per tensioni $V_{out} > 0$.



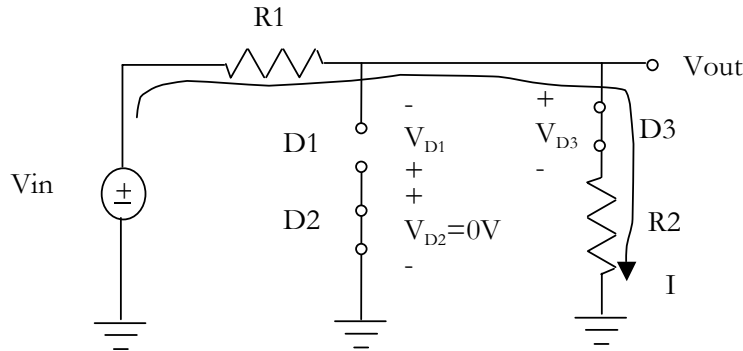
Per determinare la caratteristica ingresso-uscita si studia il valore che assume la tensione di uscita V_{out} al variare della tensione di ingresso V_{in} , poiché nel circuito sono presenti dei diodi è necessario determinare il loro stato.

Tensioni di ingresso positive: $V_{in} \geq 0V$

D1 polarizzazione inversa

D2 polarizzazione diretta

D3: polarizzazione diretta



Il circuito equivalente finale è un partitore di tensione e la tensione di uscita vale:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot V_{in}$$

sostituendo i valori delle resistenze

$$V_{out} = \frac{15K\Omega}{15K\Omega + 5K\Omega} \cdot V_{in} = \frac{15}{20} \cdot V_{in} = \frac{3}{4} \cdot V_{in}$$

la caratteristica ingresso-uscita è una retta con pendenza 3/4.

Il diodo D1 non assorbe corrente fino a che la tensione ai suoi capi non raggiunge il valore della tensione di zener, cioè fino a quando risulta $-5V \leq V_{D1}$. Dal circuito si ha che:

$$V_{D1} = -V_{out}$$

quindi la condizione diviene:

$$-5V \leq -V_{out} \Rightarrow V_{out} \leq 5V$$

il valore limite della tensione di ingresso è:

$$V_{out} = \frac{3}{4} \cdot V_{in} = 5V$$

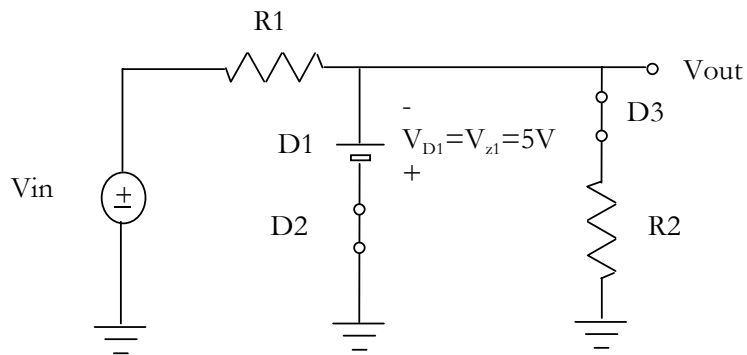
$$V_{in} = \frac{5 \cdot 4}{3} V = \frac{20}{3} V = 6.66V$$

(N.B. le unità di misure sono IMPORTANTI e devono essere SEMPRE specificate)

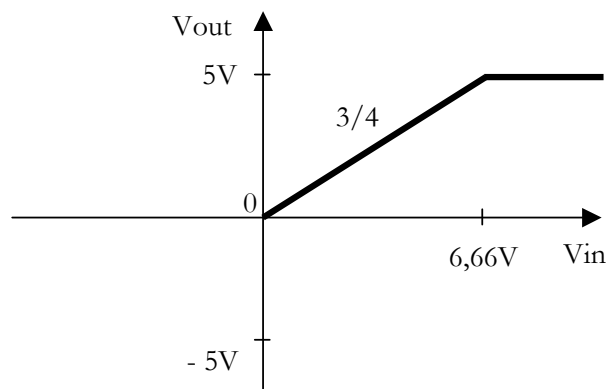
Per tensioni $V_{in} \geq 6.66V$ il diodo D1 entra in zona zener, scorre corrente $i_{D1} \neq 0$ e la tensione ai suoi capi è fissata al valore:

$$V_{D1} = -5V \Rightarrow V_{out} = 5V$$

e il circuito equivalente risulta :



La caratteristica ingresso-uscita diviene:

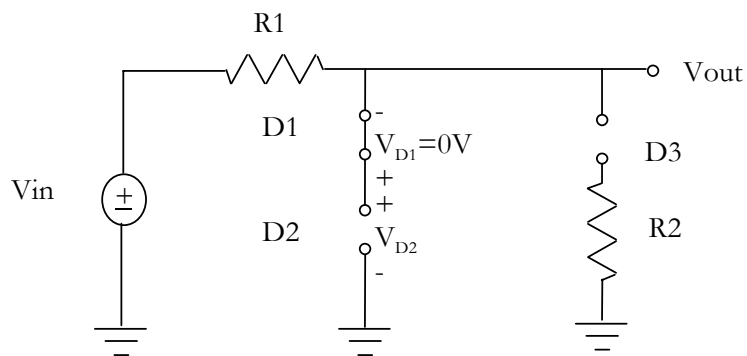


Tensioni di ingresso negative: $V_{in} \leq 0V$

D1 polarizzazione diretta.

D2 polarizzazione inversa

D3: polarizzazione inversa



Nel circuito non è presente una maglia, per cui non può scorrere corrente, la tensione di uscita è pari a:

$$V_{out} = V_{in}$$

La caratteristica ingresso-uscita è una retta con pendenza 1.

Il diodo D2 non assorbe corrente fino a che la tensione ai suoi capi non raggiunge il valore della tensione di zener, cioè fino a quando risulta $-5V \leq V_{D2}$. Dal circuito si ha che:

$$V_{D2} = V_{out}$$

$$-5V \leq V_{out} \Rightarrow V_{out} \geq -5V$$

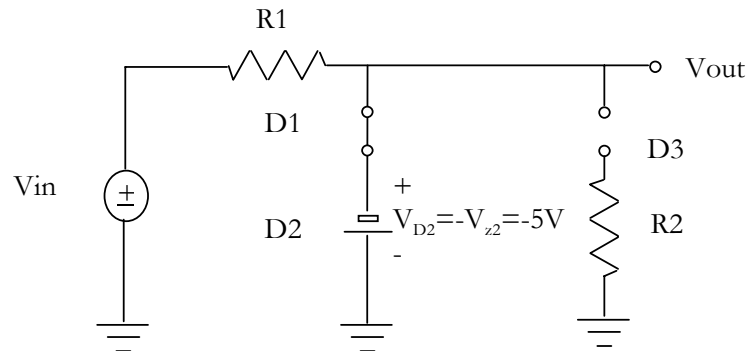
il valore limite della tensione di ingresso corrispondente è:

$$V_{in} = -5V$$

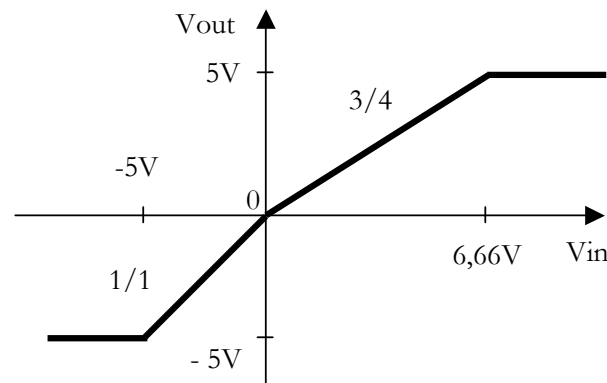
Per tensioni $V_{in} \leq -5V$ il diodo D2 entra in zona zener, scorre corrente $i_{D2} \neq 0$ e la tensione ai suoi capi è fissata al valore:

$$V_{D2} = -5V \Rightarrow V_{out} = -5V$$

Il circuito equivalente è il seguente:



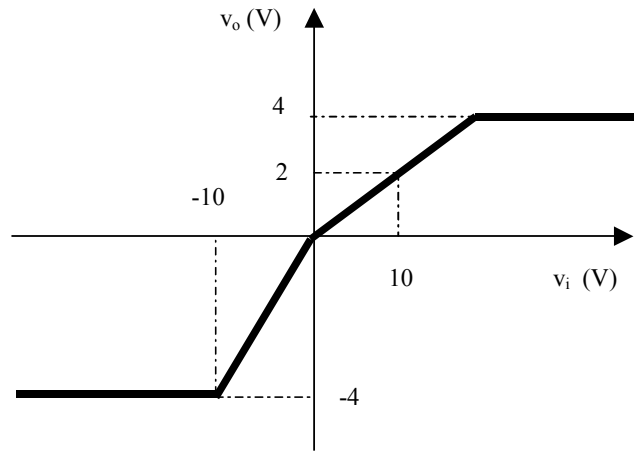
La caratteristica finale è:



(N.B. i grafici devono essere quotati correttamente e devono essere indicate le pendenze sulle rette corrispondenti).

Esercizio 3:

Disegnare e spiegare il funzionamento di un circuito a diodi che realizzi la seguente caratteristica di trasferimento.



Svolgimento

1° SOLUZIONE:

Analizziamo la caratteristica di trasferimento:

Il circuito da analizzare deve limitare la tensione di uscita positiva a 4V e negativa a -4V, inoltre il guadagno (pendenza della caratteristica di trasferimento) del circuito nella regione negativa è diverso da quella nella regione positiva ed in entrambi i casi diverso da 1.

Calcoliamo il guadagno nei due casi:

Il guadagno (pendenza della retta) nel semipiano negativo è data da:

$$\frac{0 - (-4)}{0 - (-10)} = \frac{2}{5}$$

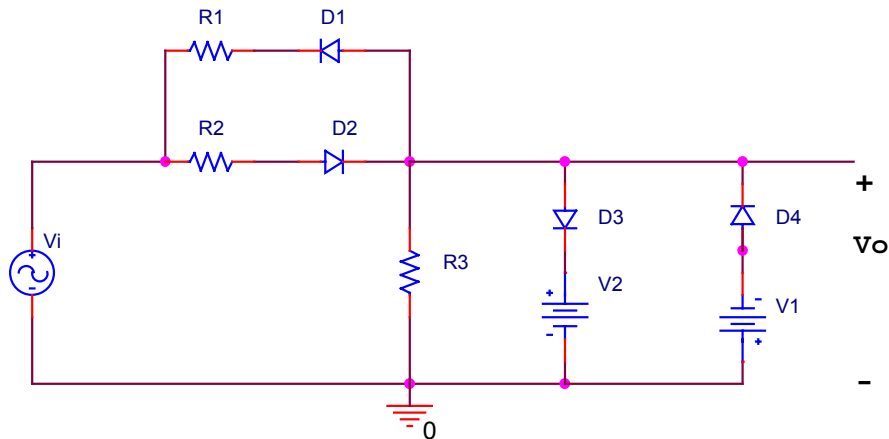
Il guadagno (pendenza della retta) nel semipiano positivo è data da:

$$\frac{0 - (-2)}{0 - (-10)} = \frac{1}{5}$$

La caratteristica di trasferimento può essere in questo caso divisa in quattro regioni diverse:

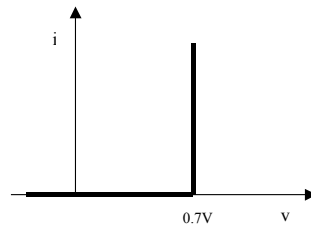
- la prima parte costante per $v_i < -10V$ e con $v_o = -4V$,
- la seconda parte con guadagno $\frac{2}{5}$ per $-10V < v_i < 0V$,
- la terza parte con guadagno $\frac{1}{5}$ per $0V < v_i < 20V$,
- la quarta parte costante per $v_i > 10V$ e con $v_o = 4V$.

Una possibile soluzione è la seguente:

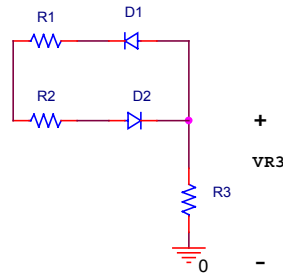


Tramite i diodi D1 e D2 possiamo regolare il guadagno nelle due regioni a pendenza non costante, mentre con i diodi D3 e D4 possiamo limitare la tensione v_o .

Consideriamo il modello a caduta costante del diodo:



consideriamo inizialmente:



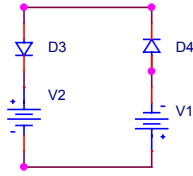
Il diodo D2 conduce quando la tensione di ingresso è positiva e supera la tensione di soglia, in questo caso la tensione v_{R3} è data dal partitore tra R2 ed R3. Nel caso in esame abbiamo visto che vogliamo un guadagno di $\frac{1}{5}$ per cui: $\frac{R3}{R2 + R3} = \frac{1}{5}$.

Il diodo D1 conduce quando la tensione di ingresso è negativa e supera la tensione di soglia, in questo caso la tensione v_{R3} è data dal partitore tra R1 ed R3. Nel caso in esame abbiamo visto che vogliamo un guadagno di $\frac{2}{5}$ per cui: $\frac{R3}{R1 + R3} = \frac{2}{5}$.

Risolvendo otteniamo: $R1 = 4R3$ e $R2 = \frac{3}{2}R3$.

Scegliendo $R3 = 1k\Omega$ otteniamo $R1 = 4k\Omega$, $R2 = 1.5k\Omega$.

Dobbiamo adesso occuparci delle due parti costanti della caratteristica di trasferimento:



Il diodo D3 conduce quando la tensione ai suoi capi supera la tensione di soglia quindi:

$v_{R3} - v_2 \geq 0.7V$ poiché vogliamo $v_o = 4V$ per $v_i \geq 20V$ ed abbiamo che $v_{R3} = \frac{1}{5} v_i$ otteniamo:

$$v_{R3} = \frac{1}{5} 20V = 4V$$

$4V - v_2 \geq 0.7V$ quindi $v_2 = 3.3V$.

Il diodo D4 conduce quando la tensione ai suoi capi supera la tensione di soglia quindi:

$(-v_1) - v_{R3} \geq 0.7V$ poiché vogliamo $v_o = -4V$ per $v_i \leq -10V$ ed abbiamo che $v_{R3} = \frac{2}{5} v_i$

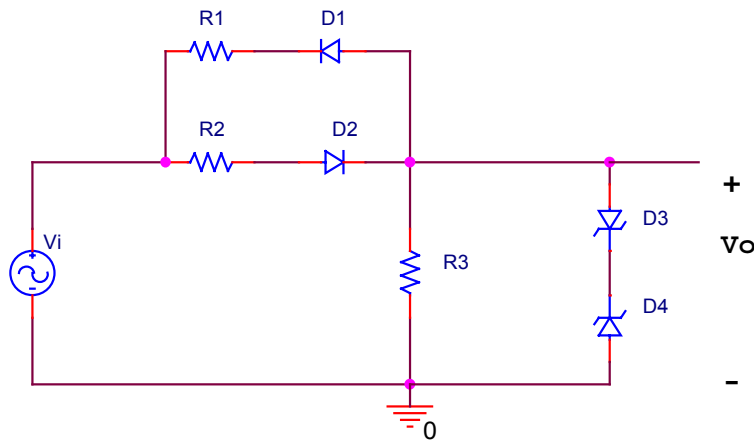
otteniamo:

$$v_{R3} = \frac{2}{5} (-10V) = -4V$$

$(-v_1) - (-4V) \geq 0.7V$ quindi $v_1 = 3.3V$ (notare che il generatore v_1 è posizionato in maniera opposta al generatore v_2).

II° SOLUZIONE:

Altra soluzione per realizzare la parte costante della caratteristica di trasferimento è quella di usare due diodi Zener come riportato nel circuito seguente:



Il diodo D3 conduce quando la tensione v_{R3} è positiva mentre il diodo D4 è in zona di breakdown, viceversa il diodo D4 conduce quando la tensione v_{R3} è negativa mentre il diodo D3 è in zona di breakdown. Quindi scegliendo opportunamente le tensioni di breakdown dei due diodi possiamo ottenere il risultato voluto.

Quando la tensione v_i è positiva abbiamo:

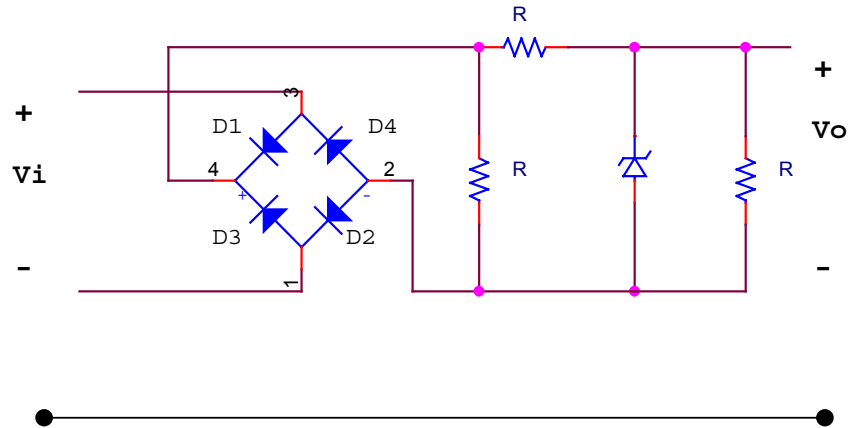
$v_o = V_{\text{sogliaD3}} + V_{\text{zD4}}$ poiché $v_o = 4V$ e $V_{\text{sogliaD3}} = 0.7V$ otteniamo $V_{\text{zD4}} = 3.3V$.

Quando la tensione v_i è negativa abbiamo:

$v_o = -(V_{\text{sogliaD4}} + V_{\text{zD3}})$ poiché $v_o = -4V$ e $V_{\text{sogliaD3}} = 0.7V$ otteniamo $V_{\text{zD3}} = 3.3V$.

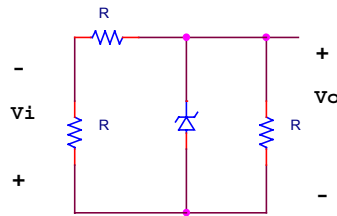
Esercizio 4:

Descrivere graficamente la caratteristica di trasferimento del seguente circuito, considerando i diodi ideali e la tensione di breakdown del diodo Zener di 5V.



Svolgimento

Consideriamo la v_i di ingresso negativa, in questo caso i diodi D3 e D4 sono in conduzione mentre i diodi D1 e D2 sono interdetti. Quindi il circuito diventa:



Quando il diodo Zener è interdetto la tensione di uscita è determinata dal partitore delle resistenze:

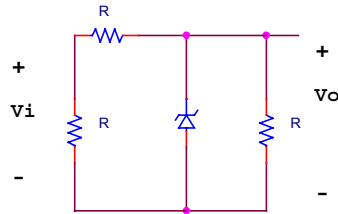
$$v_o = -\frac{R}{R+R} v_i = -\frac{1}{2} v_i$$

Quando la v_o supera la tensione V_z il diodo Zener è in breakdown e quindi la tensione di uscita $v_o = V_z$, ciò avviene quando $v_i = -2v_o = -2V_z = -10V$ (il segno negativo dipende da come è stato scelto il verso di v_i nel circuito sopra riportato).

Per la v_i negativa abbiamo quindi:

$$v_o = \begin{cases} V_z & v_i \leq -10V \\ \frac{1}{2} v_i & v_i > -10V \end{cases}$$

Consideriamo adesso la v_i di ingresso positiva, in questo caso i diodi D1 e D2 sono in conduzione mentre i diodi D3 e D4 sono interdetti. Quindi il circuito diventa:



Quando il diodo Zener è interdetto la tensione di uscita è determinata dal partitore delle resistenze:

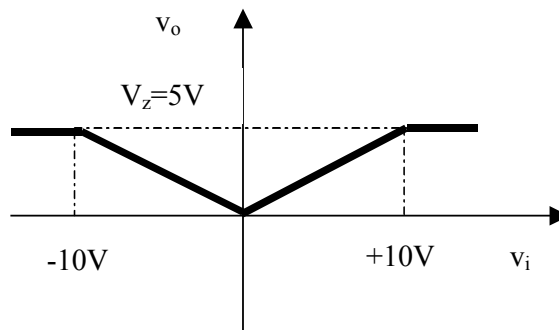
$$v_o = \frac{R}{R+R} v_i = \frac{1}{2} v_i$$

Quando la v_o supera la tensione V_z il diodo Zener è in breakdown e quindi la tensione di uscita $v_o = V_z$, ciò avviene quando $v_i = 2v_o = 2V_z = 10V$.

Per la v_i positiva abbiamo quindi:

$$v_o = \begin{cases} V_z & v_i \geq 10V \\ \frac{1}{2} v_i & v_i < 10V \end{cases}$$

Graficamente abbiamo:



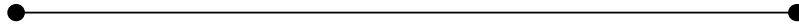
Potenza nel diodo

Esercizio 1

Un diodo a giunzione pn con tensione di breakdown pari a 10V può dissipare una potenza massima di 10mW.

Qual'è il massimo valore di corrente accettabile?

Se la corrente inversa scorre solo per il 30% del periodo di una tensione di ingresso ad onda quadra, quale corrente di picco può essere tollerato?



Svolgimento

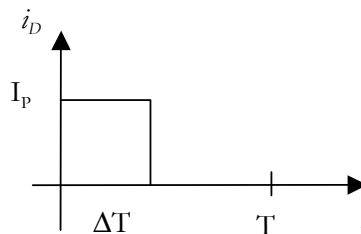
La tensione di breakdown (V_{BD}) è la massima tensione inversa che può sopportare un diodo prima che si inneschi il processo di rottura.

La potenza massima è il prodotto fra la tensione massima e la corrente massima che può scorrere nella giunzione pn, quindi risulta che la corrente massima è pari a:

$$I_{DC} = \frac{P_{MAX}}{V_{BD}} = \frac{10mW}{10V} = 1mA$$

(N.B. le unità di misure sono IMPORTANTI e devono essere SEMPRE specificate)

Se in ingresso viene fornita un'onda quadra di periodo T , e la corrente inversa scorre nel diodo solo per il 30% del periodo



Si ha che la corrente inversa scorre solo per la frazione di periodo ΔT

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{30}{100} = 0.3$$

$$\frac{I}{T} I_P \Delta T = I_{DC} = 1mA$$

$$I_P = I_{DC} \frac{T}{\Delta T} = \frac{I_{DC}}{0.3} = 3.33mA$$

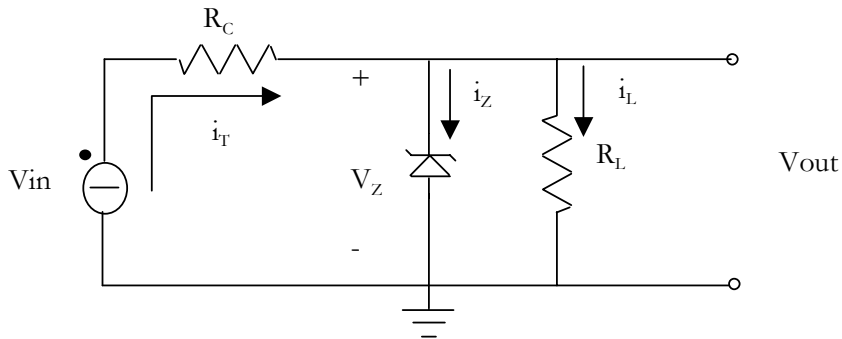
Regolatori di tensione

Esercizio 1

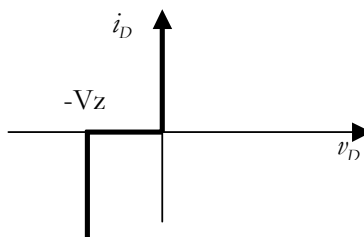
Si consideri un regolatore parallelo di tensione, basato su un diodo zener con tensione di breakdown pari a 10V e potenza massima dissipabile pari a 10mW. Assumendo che la resistenza di polarizzazione sia di 5K Ω e che la tensione di ingresso sia di 20V, trovare il valore massimo e minimo della resistenza di carico per cui la tensione di uscita può essere regolata.

Svolgimento

Il circuito del regolatore parallelo di tensione è il seguente, dove R_L è la resistenza di carico e R_C quella di polarizzazione (5K Ω):



Per un diodo zener (modello lineare a tratti), la tensione di breakdown (V_Z) è la massima tensione inversa che può cadere ai capi del diodo.



La potenza massima è il prodotto fra la tensione massima e la corrente massima che può scorrere nella giunzione pn, quindi risulta che la corrente massima è pari a:

$$i_{Z_MAX} = \frac{P_{MAX}}{V_{BD}} = \frac{10mW}{10V} = 1mA$$

mentre la corrente minima che può scorrere nel diodo in zona zener è nulla.

Il diodo zener deve regolare la tensione di uscita quindi lavorerà sempre in zona zener e la caduta di tensione sulla resistenza di carico è sempre pari a V_Z , quindi la corrente che vi scorre vale:

$$i_L = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{10V}{R_L}$$

Le equazioni di partenza per determinare la tensione massima e minima applicabile in ingresso sono:

$$V_{in} = R_C i_T + V_Z$$

$$i_T = i_Z + i_L$$

Valore massimo della resistenza di carico

Nel diodo zener scorre la massima corrente accettabile i_{Z_MAX} , nella resistenza di carico scorre la corrente i_L , sostituendo nella seconda delle equazioni di partenza si ricava il massimo valore che può assumere la corrente i_T :

$$i_T = i_{Z_MAX} + \frac{V_Z}{R_L} = 1mA + \frac{10}{R_L}$$

quindi dalla prima equazione di partenza si ottiene il valore massimo che può assumere la resistenza di carico per regolare comunque l'uscita

$$V_{in} = R_C \cdot \left(i_{Z_MAX} + \frac{V_Z}{R_L} \right) + V_Z$$

ricavando R_L si ottiene:

$$R_{L_MAX} = \frac{\frac{V_Z}{\frac{V_{in} - V_Z}{R_C} - i_Z}}{\frac{20V - 10V}{5K\Omega} - 1mA} = 10K\Omega$$

Valore minimo della resistenza di carico

Nel diodo zener scorre la minima corrente possibile

$$i_{Z_min} = 0A$$

per cui si la corrente i_T vale:

$$i_T = i_L = \frac{V_Z}{R_L}$$

Dalla prima equazione di partenza si ottiene il valore minimo che può assumere la resistenza di carico per regolare comunque l'uscita

$$V_{in} = R_C \cdot \frac{V_Z}{R_L} + V_Z$$

ricavando R_L si ottiene:

$$R_{L_min} = \frac{V_Z R_C}{\frac{V_{in} - V_Z}{R_C}} = \frac{10V \cdot 5K\Omega}{20V - 10V} = 5K\Omega$$

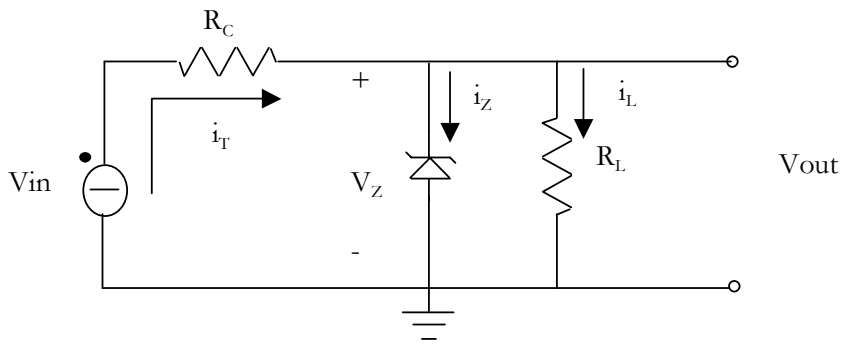
(N.B. le unità di misure sono IMPORTANTI e devono essere SEMPRE specificate)

Esercizio 2

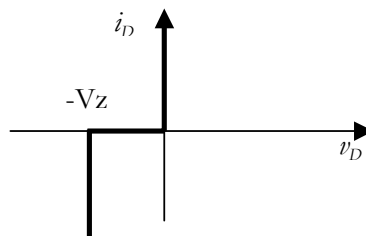
Si consideri un regolatore parallelo di tensione, basato su un diodo zener con tensione di breakdown pari a 10V e potenza massima dissipabile pari a 10mW. Assumendo che la resistenza di carico sia di 10K Ω , e che quella di polarizzazione sia di 5K Ω , trovare il valore massimo e minimo della tensione di ingresso per cui la tensione di uscita può essere regolata.

Svolgimento

Il circuito del regolatore parallelo di tensione è il seguente, dove R_L è la resistenza di carico (10K Ω) e R_C quella di polarizzazione (5K Ω):



Per un diodo zener (modello lineare a tratti), la tensione di breakdown (V_Z) è la massima tensione inversa che può cadere ai capi del diodo.



La potenza massima è il prodotto fra la tensione massima e la corrente massima che può scorrere nella giunzione pn, quindi risulta che la corrente massima è pari a:

$$i_{Z_MAX} = \frac{P_{MAX}}{V_{BD}} = \frac{10mW}{10V} = 1mA$$

mentre la corrente minima che può scorrere nel diodo in zona zener è nulla.

Il diodo zener deve regolare la tensione di uscita quindi lavorerà sempre in zona zener e la caduta di tensione sulla resistenza di carico è sempre pari a V_Z , quindi la corrente che vi scorre vale:

$$i_L = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{10V}{10k\Omega} = 1mA$$

Le equazioni di partenza per determinare la tensioni massima e minima applicabile in ingresso sono:

$$V_{in} = R_C i_T + V_Z$$

$$i_T = i_Z + i_L$$

Tensione massima in ingresso

Nel diodo zener scorre la massima corrente accettabile i_{Z_MAX} , nella resistenza di carico scorre la corrente $i_L = 1mA$ sostituendo nella seconda delle equazioni di partenza si ricava il massimo valore che può assumere la corrente i_T :

$$i_T = i_{Z_MAX} + \frac{V_Z}{R_L} = 1mA + 1mA = 2mA$$

quindi dalla prima equazione di partenza si ottiene il valore massimo che può assumere la tensione di ingresso per regolare comunque l'uscita

$$V_{in_MAX} = R_C i_T + V_Z = 5K\Omega \cdot 2mA + 10V = 20V$$

Tensione minima in ingresso

Nel diodo zener scorre la minima corrente possibile

$$i_{Z_min} = 0A$$

per cui si la corrente i_T vale:

$$i_T = i_L = \frac{V_Z}{R_L} = 1mA$$

Dalla prima equazione di partenza si ottiene il valore minimo che può assumere la tensione di ingresso per regolare comunque l'uscita

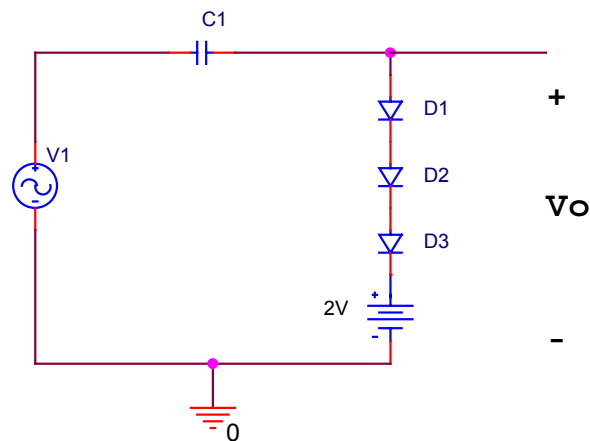
$$V_{in_min} = R_C i_T + V_Z = 5K\Omega \cdot 1mA + 10V = 15V$$

(N.B. le unità di misure sono IMPORTANTI e devono essere SEMPRE specificate)

Circuiti con diodi e condensatori

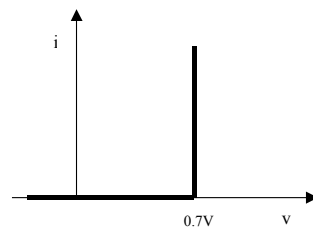
Esercizio 1

Spiegare il funzionamento del seguente circuito disegnando la tensione di uscita e supponendo che la tensione di ingresso sia sinusoidale con ampiezza V_p ed utilizzando il modello a caduta costante di $0.7V$ per i diodi in polarizzazione diretta.



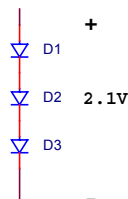
Svolgimento

Nel modello a caduta costante del diodo la caratteristica i-v è come la seguente:

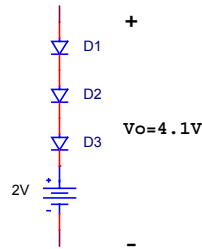


Analizziamo adesso il comportamento di v_o in transitorio con v_1 sinusoidale e condensatore scarico:

I diodi saranno in interdizione fin tanto che la tensione ai loro capi non supera $0.7V$. Essendo i tre diodi in serie è necessario che la tensione ai capi della serie stessa superi $0.7+0.7+0.7=2.1V$.



In serie con i diodi abbiamo anche un generatore di tensione costante di valore 2V. Affinché i diodi conducano è quindi necessario che la tensione v_o sia almeno $2.1+2=4.1V$.



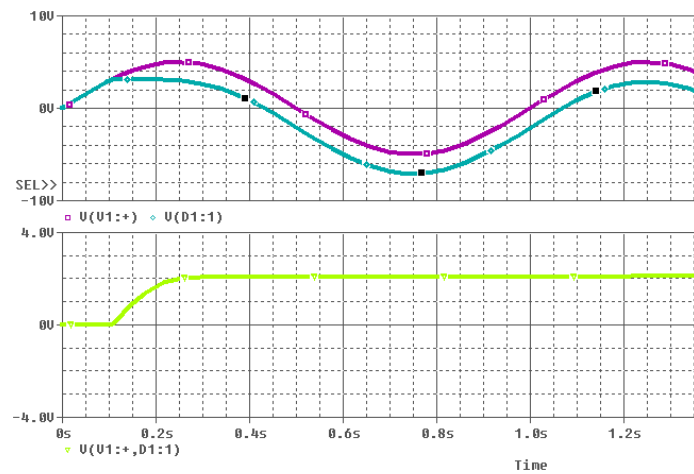
Supponiamo inizialmente il condensatore C_1 scarico.

All'istante $t=0^+$ la tensione v_1 è zero e comincia a salire, il condensatore è scarico e quindi la tensione ai capi della serie tra i diodi e il generatore di 2V è inferiore a 4.1V. I diodi sono interdetti. La tensione v_o segue la tensione di ingresso.

La tensione di ingresso continua a salire ed al momento in cui supera i 4.1V i diodi cominciano a condurre. La tensione v_o è costante e pari a 4.1V.

Sul condensatore, che fino ad ora era rimasto scarico (in quanto non scorreva corrente, diodi interdetti), comincia a scorrere corrente e quindi si carica. La tensione sul condensatore arriva fino a $v_{c1} = V_p - 4.1V$, infatti dopo questo punto i diodi si interdicono di nuovo in quanto la tensione ai loro capi scende sotto i 2.1V. Il condensatore non si scarica poiché è considerato ideale (capacità pura).

La tensione v_o segue adesso la tensione di ingresso con uno shift pari alla tensione sul condensatore C_1 .



legenda: v_1 =viola
 v_o =verde
 v_{c1} =verde chiaro

Domande teoriche

Esercizio 1

Spiegare il principio fisico della capacità di diffusione.

Svolgimento

In polarizzazione diretta entra in gioco una capacità molto più grande della capacità di transizione della polarizzazione inversa. L'origine di tale capacità si trova nella carica iniettata e immagazzinata in prossimità della giunzione fuori dalla regione di svuotamento. Viene quindi introdotta una capacità definita come rapidità di variazione della carica iniettata con la tensione, detta *Capacità di diffusione*. (C_D)

Per fare un'analisi quantitativa di C_D consideriamo la carica immagazzinata dQ per una variazione di tensione dV e quindi:

$$C_D \equiv \frac{dQ}{dV}$$

e poiché $I = \frac{Q}{\tau}$ otteniamo:

$$C_D \equiv \frac{dQ}{dV} = \tau \frac{dI}{dV}$$

poiché la conduttanza differenziale del diodo è $g = \frac{dI}{dV} \cong \frac{I}{V_T}$ sostituendo otteniamo:

$$C_D = \frac{\tau I}{V_T}$$

dove V_T è la tensione termica e τ è la costante di proporzionalità detta tempo di transito e dipende dalle dimensioni e dal tipo di diodo.

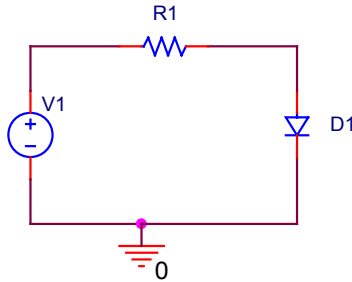
Esercizio 2

Spiegare il funzionamento del diodo in commutazione.

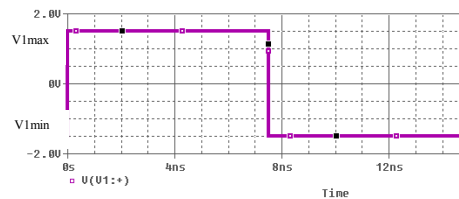
Svolgimento

Nell'analisi dei diodi si assume sempre che il passaggio tra gli stati di interdizione e di conduzione sia istantaneo, ciò in realtà non è vero.

Per analizzare il diodo in commutazione consideriamo il seguente circuito:



Supponiamo che la tensione V_1 abbia il seguente andamento:



Come è riportato nei grafici sottostanti, al tempo $t=0^+$ avremo un *transitorio di accensione*: la corrente cresce rapidamente mentre le capacità interne del diodo impediscono alla tensione di variare istantaneamente. La corrente presenta un picco iniziale ($i_D(t) = \frac{v_1(t)}{R_1}$) per poi stabilizzarsi quando la tensione raggiunge V_{on} . La corrente può essere espressa come:

$$i_D(t) = \frac{v_1(t) - v_D(t)}{R_1}$$

quando la tensione si stabilizza la corrente vale:

$$I_D = \frac{V_{1max} - V_{on}}{R_1}$$

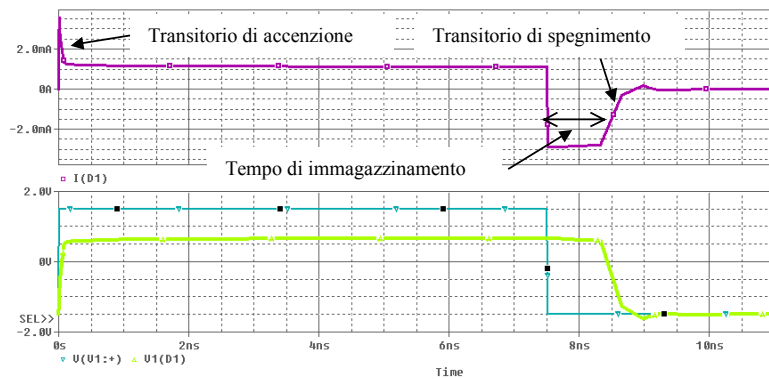
Quando la V_1 passa da V_{1max} a V_{1min} la corrente si inverte e raggiunge un valore molto maggiore di quello della corrente di saturazione inversa:

$$I_R = \frac{V_{1min} - V_d}{R_1}$$

Ciò è dovuto alla carica immagazzinata nel diodo che fa sì che la tensione non vari istantaneamente ma che ci sia un *transitorio di spegnimento*. La corrente rimane a tale valore per un tempo chiamato *tempo di immagazzinamento* τ_s durante il quale la carica del diodo viene rimossa. Una volta terminata la rimozione della carica la tensione V_d si porta a V_{1min} mentre la corrente va a I_s .

Quindi il tempo di accensione e di spegnimento sono dovuti alla carica e scarica delle capacità interne al diodo, mentre il tempo di immagazzinamento è dovuto al tempo di transito e al valore della corrente in polarizzazione diretta e di I_R inversa:

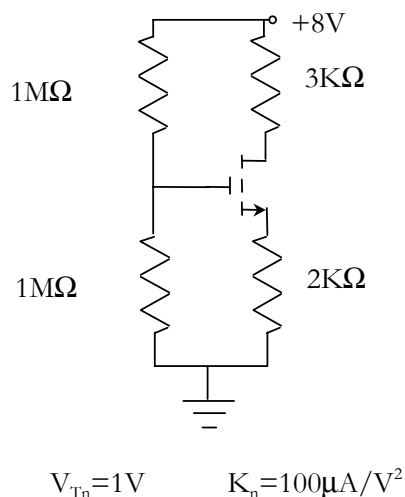
$$\tau_s = \tau \ln \left(1 - \frac{I_D}{I_R} \right)$$



Esercizi sui MOS: ricerca del punto di lavoro e progettazione

Esercizio 1

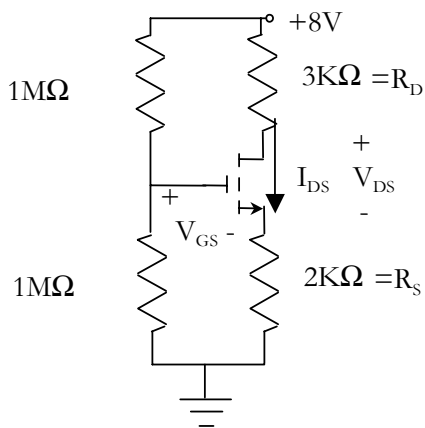
Dato il seguente circuito, trovare il punto di lavoro:



Svolgimento

Per determinare il punto di lavoro bisogna determinare la terna di valori:

$$V_{GS}, I_{DS}, V_{DS}$$



La tensione sul gate del MOS vale:

$$V_G = \frac{1M\Omega}{1M\Omega + 1M\Omega} \cdot 8V = 4V$$

per determinare il punto di lavoro suppongo che l'nMOS lavori in zona di saturazione, per cui la corrente, trascurando l'effetto di λ , vale:

$$I_{DS} = \frac{K_n}{2} (V_{GS} - V_{Tn})^2$$

le equazioni alle maglie sono

$$V_{DD} = (R_D + R_S)I_{DS} + V_{DS}$$

$$V_G = V_{GS} + R_S I_{DS}$$

dalla seconda equazione mi ricavo l'espressione di V_{GS} in funzione di I_{DS} e la sostituisco nell'espressione della corrente:

$$V_{GS} = V_G - R_S I_{DS}$$

$$I_{DS} = \frac{K_n}{2} (V_G - R_S I_{DS} - V_{Tn})^2$$

risolvendo l'equazione in funzione I_{DS} si ottiene la seguente equazione di secondo grado:

$$R_S^2 I_{DS}^2 - \frac{2}{K_n} I_{DS} - 2R_S (V_G - V_{Tn}) I_{DS} + (V_G - V_{Tn})^2 = 0$$

che ammette due soluzioni seguenti:

$$I_{DS_1} = 251 \mu A \quad I_{DS_2} = 3.9 mA$$

andando a sostituire nell'espressione di V_{DS} si ottengono due valori

$$V_{DS} = V_{DD} - (R_D + R_S) I_{DS}$$

$$V_{DS_1} = 6.7V \quad V_{DS_2} = -11V$$

la seconda soluzione non è accettabile in quanto si ha $V_{DS} < 0$ e l'nMOS risulterebbe OFF.

Quando la corrente vale:

$$I_{DS_1} = 251 \mu A$$

la tensione fra gate e source risulta:

$$V_{GS} = 3.49V$$

poiché $V_{GS} > V_{Tn}$ il l'nMOS è in conduzione.

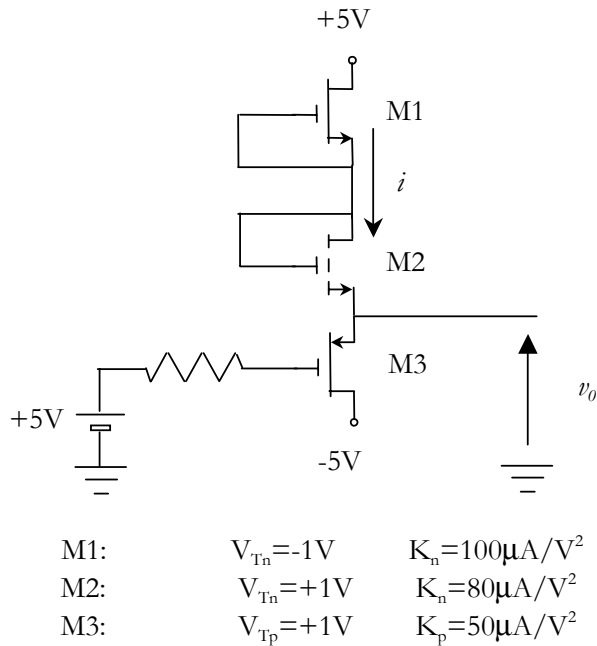
Verifico la condizione di saturazione dell'nMOS:

$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_{Tn} \quad 6.7 \geq 3.49 - 1 \quad \text{OK}$$

(N.B. bisogna SEMPRE controllare le condizioni di lavoro (stato ON o OFF) dei MOS e verificare le ipotesi di lavoro fatte: zona di interdizione, linearità o saturazione)

Esercizio 2

Trovare v_o e la corrente i del seguente circuito:



Svolgimento

Dal circuito si deduce che:

$$V_{G3} = 5V \quad V_{D3} = -5V \quad V_{GD3} = 10V$$

MOS M2 (nMOS ad arricchimento)

Il gate e il drain sono collegati insieme $V_{GD1} = 0V \Rightarrow V_{GS2} = V_{DS2}$ e la corrente che vi scorre:

$$I_{DS2} = \frac{k_{n2}}{2} (V_{DS2} - V_{Tn2})^2$$

MOS M1 (nMOS a svuotamento)

Il gate e il source sono collegati insieme $V_{GS1} = 0V$ suppongo che l'nMOS sia in zona di saturazione $V_{DS1} \geq V_{GS1} - V_{Tn1} \geq -V_{Tn1}$ per cui la corrente che vi scorre risulta:

$$I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{2} (-V_{Tn1})^2 = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{2} A = 50\mu A$$

$$I_{DS1} = i = 50\mu A$$

poiché $I_{DS2} = I_{DS1} = 50\mu A$, sostituendo nell'espressione di I_{DS2} mi ricavo il valore della tensione V_{DS2} :

$$50\mu A = \frac{k_{n2}}{2} (V_{DS2} - V_{Tn2})^2 \Rightarrow V_{DS2} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50\mu A}{80\mu A/V^2}} + V_{Tn2} = 2.11V$$

MOS M3 (pMOS a svuotamento)

Faccio l'ipotesi di saturazione (che alla fine deve essere verificata):

$$V_{SD3} \geq V_{SG3} + V_{Tp3}$$

$$I_{SD3} = \frac{k_{p3}}{2} (V_{SG3} + V_{Tp3})^2$$

poiché $I_{SD3} = I_{DS1} = 50 \mu A$ si ha (N.B. $V_{Tp} = +1V$ perché è a svuotamento)

$$V_{SG3} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50 \mu A}{50 \mu A / V^2}} - V_{Tp3} = (\sqrt{2} - 1) V = 0.414 V$$

verifico se il MOS è in conduzione, cioè deve risultare:

$$V_{SG3} \geq -V_{Tp}$$

$$0.414 V \geq -1 V \Rightarrow \text{OK.}$$

Per determinare la tensione di uscita v_0 considero che:

$$v_0 = V_{S3} \Rightarrow V_{SG3} = V_{S3} - V_{G3}$$

$$V_{S3} = V_{SG3} + V_{G3} = (0.414 + 5) V = 5.414 V$$

quindi si ha che le quantità incognite valgono:

$$i = 50 \mu A \quad v_0 = 5.414 V$$

bisogna verificare le ipotesi di saturazione che sono state fatte:

M3 in zona di saturazione: $V_{SD3} \geq V_{SG3} + V_{Tp3}$

$$V_{SD3} = V_{S3} - V_{D3} = (5.414 + 5) V = 10.414 V$$

$$V_{SG3} = V_{S3} - V_{G3} = (5.414 - 5) V = 0.414 V$$

$$10.414 V \geq (0.414 + 1) V \Rightarrow 10.414 V \geq 1.414 V \Rightarrow \text{OK.}$$

M1 in saturazione, mi calcolo la tensione V_{DS1} :

$$20 V = V_{DS1} + V_{DS2} + V_{SD3}$$

$$V_{DS1} = 20 V - 2.11 V - 10.414 V = 7.75 V$$

per cui il MOS M1 è in saturazione perché $7.75 V > 1$ OK.

(N.B. bisogna SEMPRE controllare le condizioni di lavoro (stato ON o OFF) dei MOS e verificare le ipotesi di lavoro fatte: zona di interdizione, linearità o saturazione)

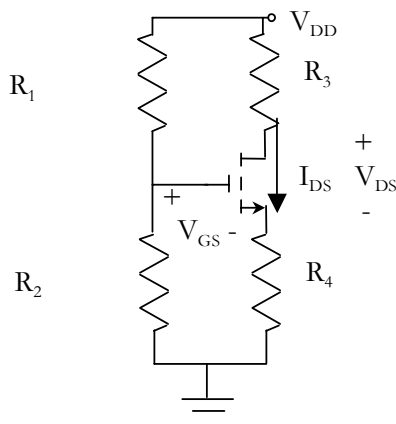
Esercizio 3

Progettare la rete di polarizzazione di un nMOS quando il suo punto di lavoro è:

$$V_{DSq} = 0.7 \text{ V} \quad V_{GSq} = 3 \text{ V} \quad \text{con una } V_{Tn} = 1 \text{ V} \quad k_n = 100 \mu\text{A/V}^2 \quad V_{DD} = 12 \text{ V}$$

Svolgimento

La rete di polarizzazione dell'nMOS è la seguente:



Poiché si ha $V_{DSq} = 0.7 \text{ V}$ $V_{GSq} = 3 \text{ V}$ $V_{Tn} = 1 \text{ V} \Rightarrow 0.7 \text{ V} \leq (3 - 1) \text{ V} = 2 \text{ V}$

Il MOS lavora in zona lineare, per cui la corrente risulta:

$$I_{DSq} = k_n \left(V_{GSq} - V_{Tn} - \frac{V_{DSq}}{2} \right) V_{DSq} = 100 \mu\text{A/V}^2 \cdot \left(3 - 1 - \frac{0.7}{2} \right) \cdot 0.7 \text{ V} = 115 \mu\text{A}$$

Per progettare la rete di polarizzazione bisogna determinare dei valori per le resistenze R_1 , R_2 , R_3 e R_4 . Le equazioni alle maglie sono

$$V_{DD} = (R_3 + R_4)I_{DS} + V_{DS}$$

$$\frac{R_2}{R_2 + R_1} V_{DD} = V_{GS} + R_4 I_{DS}$$

abbiamo due equazioni e quattro incognite, bisogna fissare due valori. nel caso in cui si scegliesse di fissare R_1 e R_2 bisogna scegliere valori abbastanza grandi (dell'ordine di $100 \text{ K}\Omega$) mentre fissando le altre due resistenze bisogna prendere valori più bassi (dell'ordine dei $\text{K}\Omega$).

Per semplicità fissiamo $R_1 = R_2 = 100 \text{ K}\Omega$ quindi risulta $V_G = \frac{V_{DD}}{2} = 6 \text{ V}$ dalla seconda equazione si ricava il valore di R_4 :

$$R_4 = \frac{(V_G - V_{GS})}{I_{DS}} = \frac{6 - 3}{115 \mu} \Omega = 26 \text{ K}\Omega$$

dalla prima equazione:

$$R_3 = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{I_{DS}} - R_4 = 72.26 \text{ K}\Omega$$