

1 Reti elettriche in regime lineare

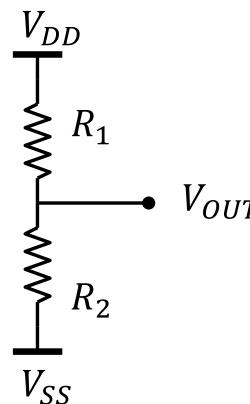
Esercizio 1.1

DATI: $R_1 = 1\Omega$, $R_2 = 3\Omega$, $V_I = 4V$, $V_{DD} = 2V$, $V_{SS} = -2V$

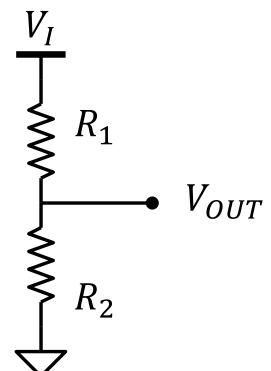
Calcolare la tensione V_{OUT} nei due circuiti in figura.

Soluzione

- $V_{OUT} = 1V$;
- $V_{OUT} = 3V$



(a)



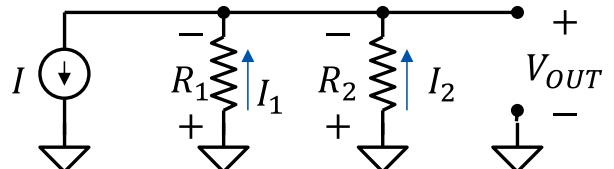
(b)

Esercizio 1.2

DATI: $R_1 = 1\Omega$, $R_2 = 2\Omega$, $I = 3A$

Calcolare:

- Le correnti attraverso le resistenze R_1 e R_2 ;
- La tensione V_{OUT} .



Soluzione

- $I_1 = 2A$; $I_2 = 1A$
- $V_{OUT} = -2V$

Esercizio 1.3

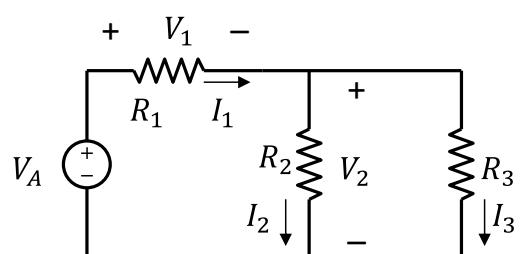
DATI: $R_1 = 4.7k\Omega$, $R_2 = 2.2k\Omega$, $R_3 = 18k\Omega$, $V_A = 10V$

Dato il circuito in figura calcolare:

- Le tensioni V_1 e V_2 ai capi delle resistenze R_1 e R_2 .
- Le correnti I_1 , I_2 e I_3 attraverso le resistenze R_1 , R_2 e R_3 .
- La potenza erogata dal generatore di tensione V_A .
- La potenza elettrica consumata dalle tre resistenze.

Soluzione

- $V_1 = 7.06V$, $V_2 = 2.94V$
- $I_1 = 1.5mA$, $I_2 = 1.34mA$, $I_3 = 0.16mA$
- $P_A = 15mW$
- $P_1 = 10.6mW$, $P_2 = 3.9mW$, $P_3 = 0.5mW$



Esercizio 1.4

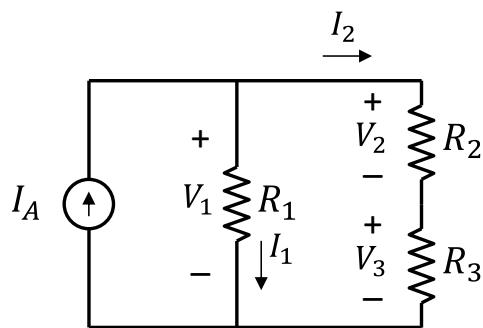
DATI: $R_1 = 4.7 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 2.2 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 3.6 \text{ k}\Omega$, $I_A = 5 \text{ mA}$

Dato il circuito in figura calcolare:

- Le correnti I_1 e I_2 attraverso le resistenze R_1 , R_2 .
- Le tensioni V_1 , V_2 e V_3 ai capi delle resistenze R_1 , R_2 e R_3 .
- La potenza erogata dal generatore di corrente I_A .
- La potenza elettrica consumata dalle tre resistenze.

Soluzione

- $I_1 = 2.76 \text{ mA}$, $I_2 = 2.24 \text{ mA}$,
- $V_1 = 12.98 \text{ V}$, $V_2 = 4.92 \text{ V}$, $V_3 = 8.06 \text{ V}$,
- $P_A = 64.9 \text{ mW}$,
- $P_1 = 35.9 \text{ mW}$, $P_2 = 11 \text{ mW}$, $P_3 = 18 \text{ mW}$



Esercizio 1.5

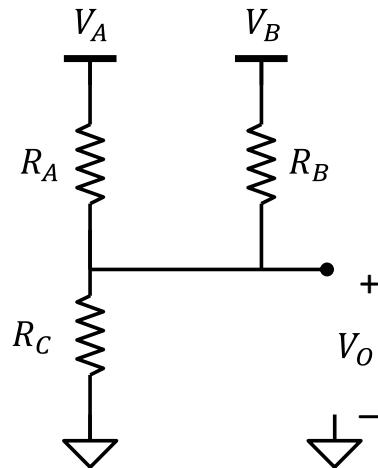
DATI: $R_A = 2 \text{ k}\Omega$, $R_B = 6 \text{ k}\Omega$, $R_C = 4 \text{ k}\Omega$.

Dato il circuito in figura:

- Trovare l'espressione di V_O in funzione di V_A e V_B
- Quanto vale il potenziale V_O
 - $V_A = 2 \text{ V}$ e $V_B = 0 \text{ V}$
 - $V_A = 0 \text{ V}$ e $V_B = -3 \text{ V}$
 - $V_A = 2 \text{ V}$ e $V_B = -3 \text{ V}$

Soluzione

- $$V_O = \frac{\frac{V_A + V_B}{R_A + R_B}}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}}$$
- a) $V_O = 1 \text{ V}$;
b) $V_O = -0.5 \text{ V}$;
c) $V_O = 0.5 \text{ V}$;



Esercizio 1.6

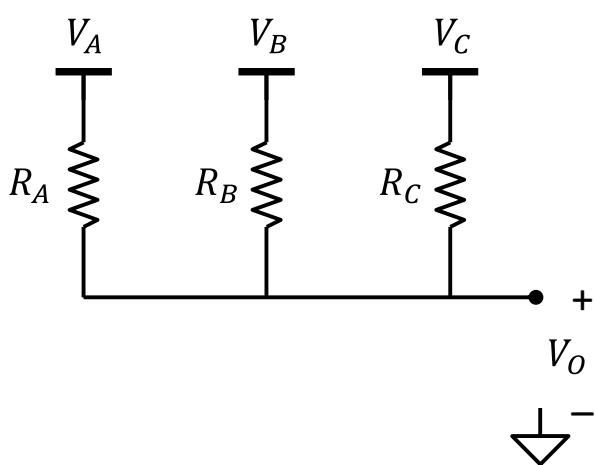
DATI: $R_A = 2 \text{ k}\Omega$, $R_B = 6 \text{ k}\Omega$, $R_C = 3 \text{ k}\Omega$.

Dato il circuito in figura:

- Trovare l'espressione di V_O in funzione di V_A e V_B
- Quanto vale il potenziale V_O con:
 - $V_A = -1 \text{ V}$, $V_B = 0 \text{ V}$, $V_C = 0 \text{ V}$
 - $V_A = 0 \text{ V}$, $V_B = 0 \text{ V}$, $V_C = -3 \text{ V}$
 - $V_A = -1 \text{ V}$, $V_B = 6 \text{ V}$, $V_C = 0 \text{ V}$
 - $V_A = -1 \text{ V}$, $V_B = 6 \text{ V}$, $V_C = -3 \text{ V}$

Soluzione

- $$V_O = \frac{\frac{V_A + V_B + V_C}{R_A + R_B + R_C}}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}}$$
- a) $V_O = -0.5 \text{ V}$;
b) $V_O = -1 \text{ V}$;
c) $V_O = 0.5 \text{ V}$;
d) $V_O = -0.5 \text{ V}$

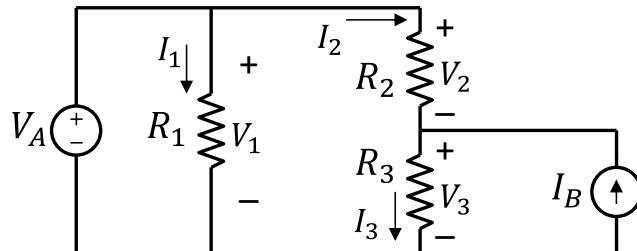


Esercizio 1.7

DATI: $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 4 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, $V_A = 5V$, $I_A = 5\text{mA}$.

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. Le tensioni V_1 , V_2 , V_3 e le correnti I_1 , I_2 , I_3 usando le leggi di kirchhoff e di ohm
2. Le tensioni V_1 , V_2 , V_3 e le correnti I_1 , I_2 , I_3 usando il metodo della sovrapposizione degli effetti.



Soluzione

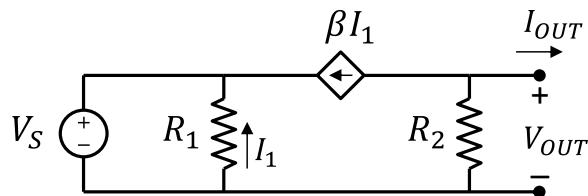
$$V_1 = 5V, I_1 = 5\text{mA},$$

$$V_2 = 0, I_2 = 0,$$

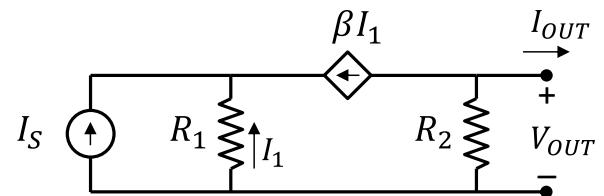
$$V_3 = 5V, I_3 = 5\text{mA}$$

Esercizio 1.8

Dati i due circuiti in figura ($\beta > 0$) calcolare per ciascuno i circuiti equivalenti di Thevenin e Norton.

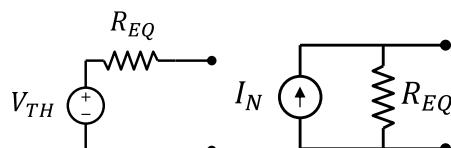


(A)



(B)

Soluzione



$$\text{A. } V_{TH} = \beta \frac{R_2}{R_1} V_S \quad I_N = \frac{\beta V_S}{R_1} \quad R_{EQ} = R_2$$

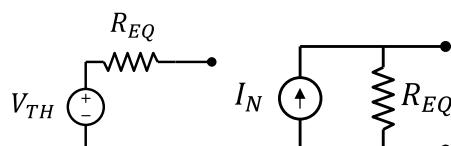
$$\text{B. } V_{TH} = \frac{\beta}{1+\beta} R_2 I_S \quad I_N = \frac{\beta}{1+\beta} I_S \quad R_{EQ} = R_2$$

Esercizio 1.9

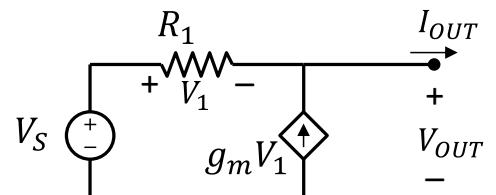
DATI: $R_1 = 100\text{k}\Omega$, $g_m = 2\text{mS}$

Dato il circuito in figura trovare le rappresentazioni equivalenti di Thevenin e Norton in funzione della tensione V_S .

Soluzione



$$V_{TH} = V_S \quad I_N = \left(\frac{1}{R_1} + g_m \right) V_S \quad R_{EQ} = \left(\frac{1}{R_1} + g_m \right)^{-1} = 497.5\Omega$$



Esercizio 1.10

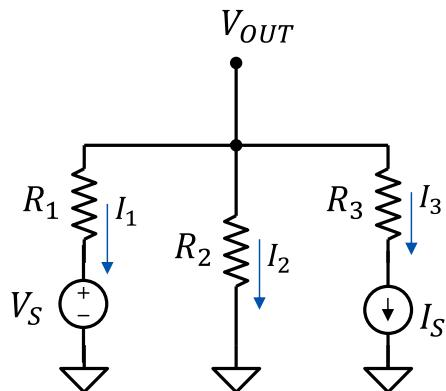
DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 3\text{k}\Omega$, $R_3 = 2\text{k}\Omega$, $V_S = 10\text{V}$, $I_S = 5\text{mA}$

Dato il circuito in figura calcolare la tensione V_{OUT} e le correnti I_1 , I_2 e I_3 usando:

1. Le leggi di kirchhoff
2. La sovrapposizione degli effetti
3. Il teorema di Thevenin
4. Il teorema di Norton

Soluzione

$$\begin{aligned} V_{OUT} &= 3.75\text{V}; \\ I_1 &= -6.25\text{mA}; \\ I_2 &= 1.25\text{mA}; \\ I_3 &= 5\text{mA}; \end{aligned}$$



Esercizio 1.11

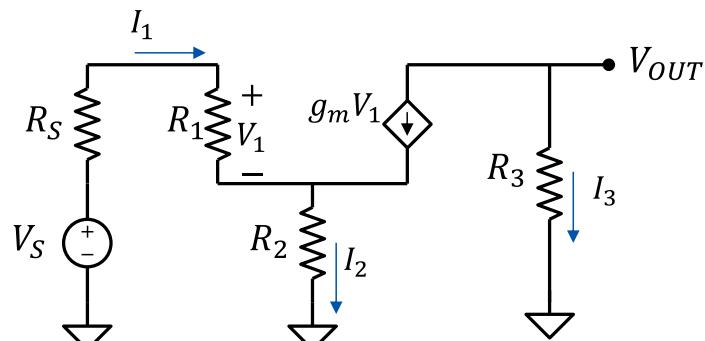
DATI: $R_S = 1\text{k}\Omega$, $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 2\text{k}\Omega$, $R_3 = 3\text{k}\Omega$, $V_S = 5\text{V}$, $g_m = 100\text{mS}$

Dato il circuito in figura:

1. Calcolare la tensione V_{OUT} e le correnti I_1 , I_2 e I_3 .
2. Trovare la rappresentazione equivalente di Thevenin e di Norton

Soluzione

1. $V_{OUT} = -7.35\text{V}$, $I_1 = 24.5\mu\text{A}$, $I_2 = 2.475\text{mA}$, $I_3 = -2.45\text{mA}$
2. $V_{TH} = -7.35$, $I_N = -2.45\text{mA}$, $R_{EQ} = 3\text{k}\Omega$

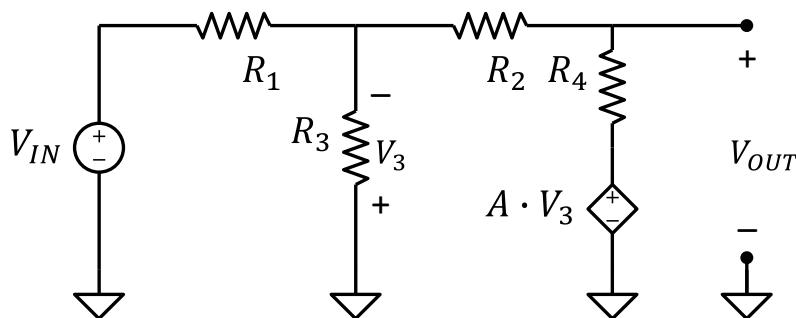


Esercizio 1.12

DATI: $V_{IN} = 1\text{V}$, $A = 99$, $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$, $R_3 = 99\text{k}\Omega$, $R_4 = 1\text{k}\Omega$.

Dato il circuito in figura calcolare:

1. La tensione V_{OUT} .
2. Se colleghiamo all'uscita una resistenza $R_L = 100\Omega$. Quanta potenza eroga il circuito a R_L ?



Soluzione

1. $V_{OUT} = -8.9\text{V}$
2. $P_L = 198.2\text{mW}$

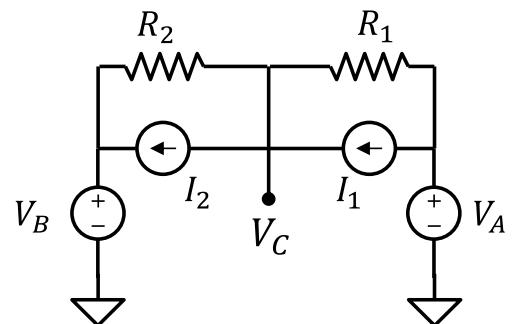
Esercizio 1.13

DATI: $I_1 = I_2 = 2\text{mA}$, $R_1 = 50\text{k}\Omega$, $R_2 = 100\text{k}\Omega$, $V_A = 3\text{V}$, $V_B = 12\text{V}$.

Dato il circuito in figura trovare il valore del potenziale V_C

Soluzione

$$V_C = 6\text{V}$$

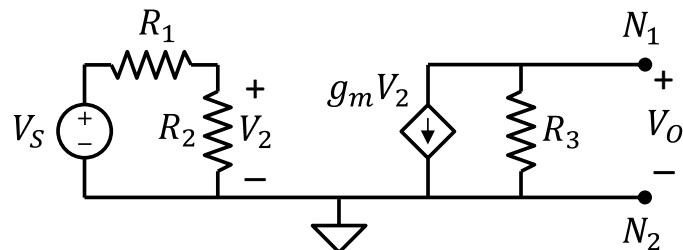


Esercizio 1.14

DATI: $R_1 = 5\text{k}\Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $R_3 = 4\text{k}\Omega$, $V_S = 5\text{V}$, $g_m = 1\text{mS}$.

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. La tensione V_O
2. La resistenza equivalente del circuito ai nodi N_1 e N_2



Soluzione

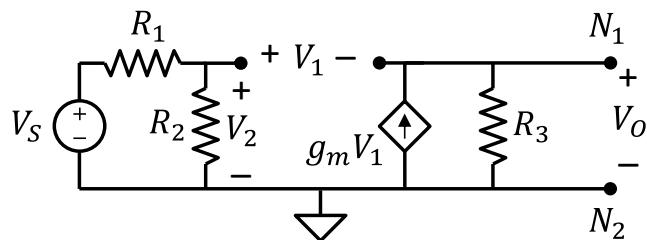
1. $V_O = -16\text{V}$
2. $R_{EQ} = 4\text{k}\Omega$

Esercizio 1.15

DATI: $R_1 = 5\text{k}\Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $R_3 = 10\text{k}\Omega$, $V_S = 5\text{V}$, $g_m = 0.7\text{mS}$.

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. La tensione V_O
2. La resistenza equivalente del circuito ai nodi N_1 e N_2



Soluzione

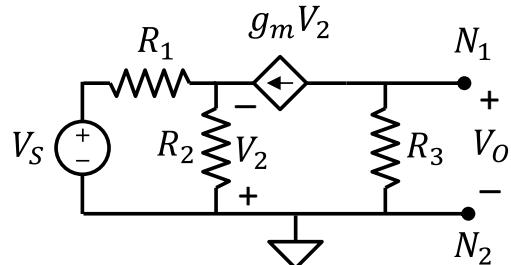
1. $V_O = 3.5\text{V}$
2. $R_{EQ} = 1.25\text{k}\Omega$

Esercizio 1.16

DATI: $R_1 = 5\text{k}\Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $R_3 = 50\text{k}\Omega$, $V_S = 1\text{V}$, $g_m = 1\text{mS}$.

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. La tensione V_O
2. La resistenza equivalente del circuito ai nodi N_1 e N_2



Soluzione

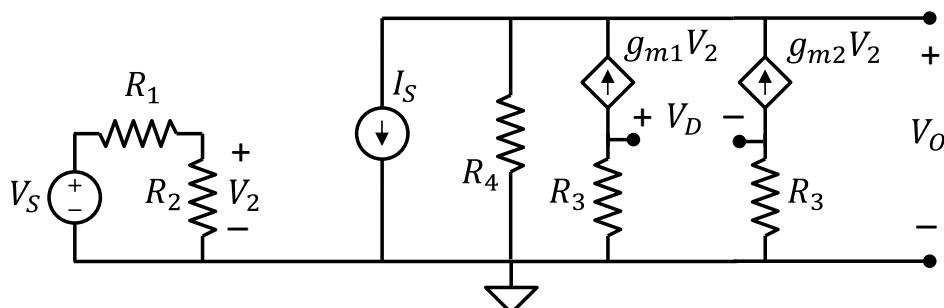
1. $V_O = 8\text{V}$
2. $R_{EQ} = 50\text{k}\Omega$

Esercizio 1.17

DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $R_3 = 5\text{k}\Omega$, $R_4 = 500\Omega$, $V_S = 3\text{V}$, $I_S = 5\text{mA}$, $g_{m1} = 2\text{mS}$, $g_{m2} = 3\text{mS}$.

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. La tensione V_O e la resistenza equivalente tra i relativi terminali
2. La tensione V_D e la resistenza equivalente tra i relativi terminali



Soluzione

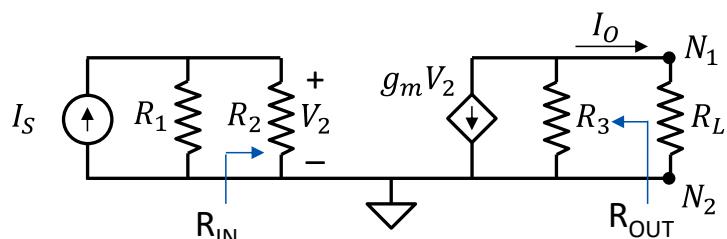
1. $V_O = 2.5\text{V}$, $R_{EQ} = 500\Omega$
2. $V_D = 10\text{V}$, $R_{EQ} = 10\text{k}\Omega$

Esercizio 1.18

DATI: $R_1 = 4.5\text{k}\Omega$, $R_2 = 0.5\text{k}\Omega$, $R_3 = 8\text{k}\Omega$, $R_L = 2\text{k}\Omega$, $I_S = 0.4\text{mA}$, $g_m = 5\text{mS}$.

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. La corrente I_O
2. La resistenza equivalente vista dall'uscita del circuito come indicato dalla freccia (R_{OUT})
3. La resistenza equivalente vista dall'ingresso del circuito come indicato dalla freccia (R_{IN})



Soluzione

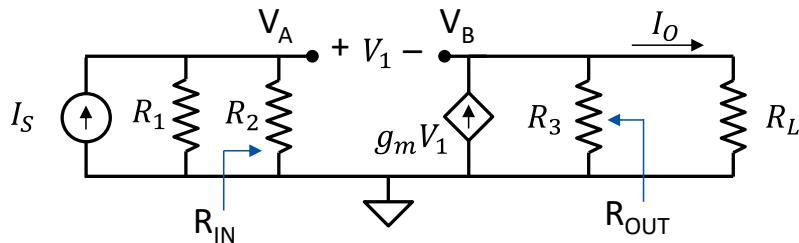
1. $I_O = -720\mu\text{A}$
2. $R_{OUT} = 8\text{k}\Omega$
3. $R_{IN} = 500\Omega$

Esercizio 1.19

DATI: $R_1 = 45\text{k}\Omega$, $R_2 = 5\text{k}\Omega$, $R_3 = 8\text{k}\Omega$, $R_L = 2\text{k}\Omega$, $I_S = 0.4\text{mA}$, $g_m = 5\text{mS}$.

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. La corrente I_O
2. La resistenza equivalente vista dall'uscita del circuito come indicato dalla freccia (R_{OUT})
3. La resistenza equivalente vista dall'ingresso del circuito come indicato dalla freccia (R_{IN})



Soluzione

1. $I_O = 0.8\text{mA}$
2. $R_{OUT} = 195\Omega$
3. $R_{IN} = 5\text{k}\Omega$

Esercizio 1.20

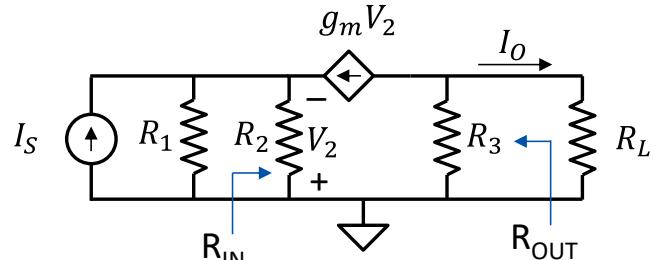
DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 2.5\text{k}\Omega$, $R_3 = 9\text{k}\Omega$, $R_L = 1\text{k}\Omega$, $I_S = 2\text{mA}$, $g_m = 1.5\text{mS}$.

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. La corrente I_O
2. La resistenza equivalente vista dall'uscita del circuito come indicato dalla freccia (R_{OUT})
3. La resistenza equivalente vista dall'ingresso del circuito come indicato dalla freccia (R_{IN})

Soluzione

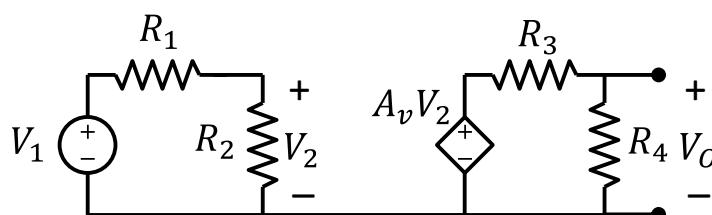
1. $I_O = 1.35\text{mA}$
2. $R_{OUT} = 9\text{k}\Omega$
3. $R_{IN} = 526.3\Omega$



Esercizio 1.21

DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 40\text{k}\Omega$, $R_3 = 500\Omega$, $R_4 = 4.5\text{k}\Omega$, $V_1 = 0.25\text{V}$, $A_v = 10$.

Dato il circuito in figura, calcolare la tensione V_O .



Soluzione

$$V_O = 1.8\text{V}$$

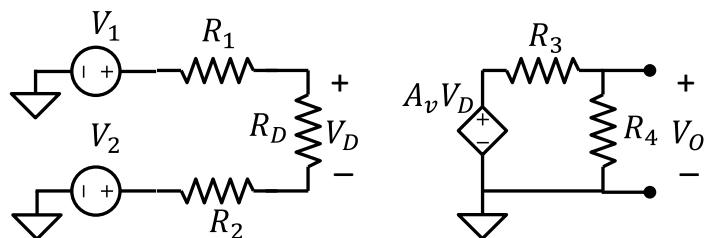
Esercizio 1.22

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 2\text{k}\Omega$, $R_D = 5\text{k}\Omega$, $R_3 = 200\Omega$,
 $R_4 = 800\Omega$, $V_1 = 1.5\text{V}$, $V_2 = -0.5\text{V}$, $A_v = -5$.

Dato il circuito in figura, calcolare la tensione V_O .

Soluzione

$$V_O = -5\text{V}$$



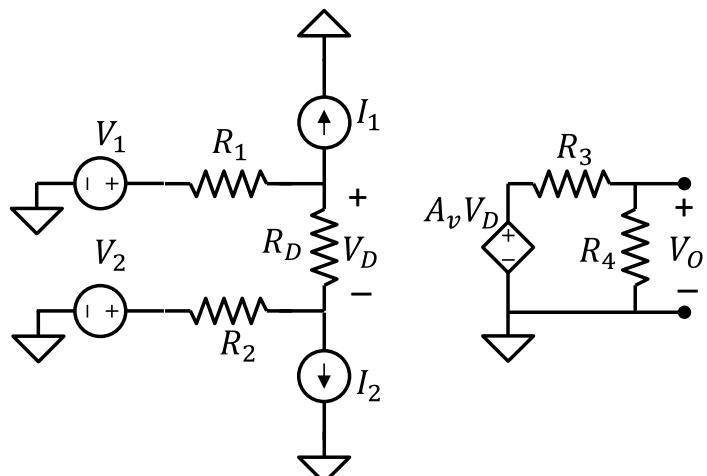
Esercizio 1.23

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 2\text{k}\Omega$, $R_D = 5\text{k}\Omega$, $R_3 = 2\text{k}\Omega$,
 $R_4 = 6\text{k}\Omega$, $V_1 = 2\text{V}$, $V_2 = -4\text{V}$, $I_1 = I_2 = 0.4\text{mA}$, $A_v = 4$.

Dato il circuito in figura, calcolare la tensione V_O .

Soluzione

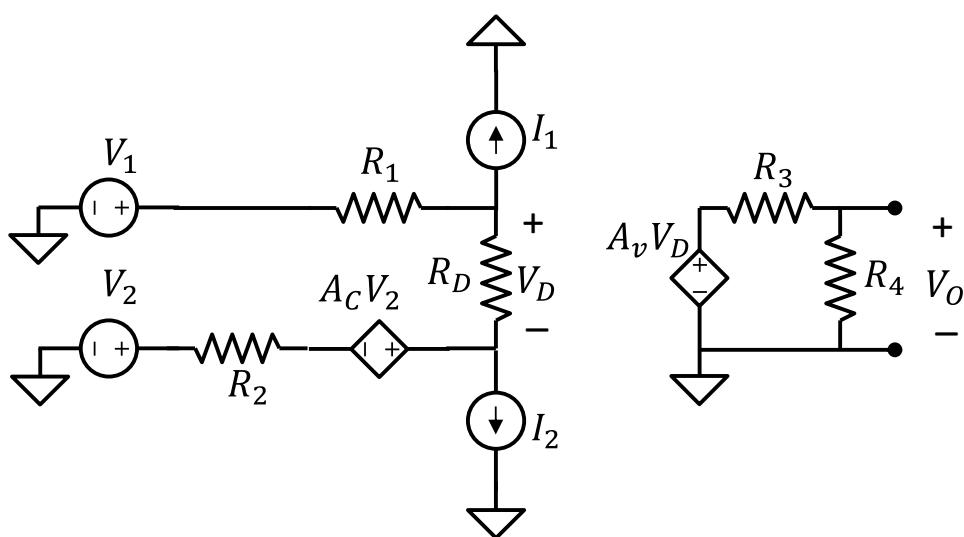
$$V_O = 12\text{V}$$



Esercizio 1.24

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 2\text{k}\Omega$, $R_D = 5\text{k}\Omega$, $R_3 = 4\text{k}\Omega$, $R_4 = 4\text{k}\Omega$,
 $V_1 = 2\text{V}$, $V_2 = -4\text{V}$, $I_1 = 0.4\text{mA}$, $I_2 = -0.2\text{mA}$,
 $A_v = 4$, $A_c = 0.5$.

Dato il circuito in figura, calcolare la tensione V_O .



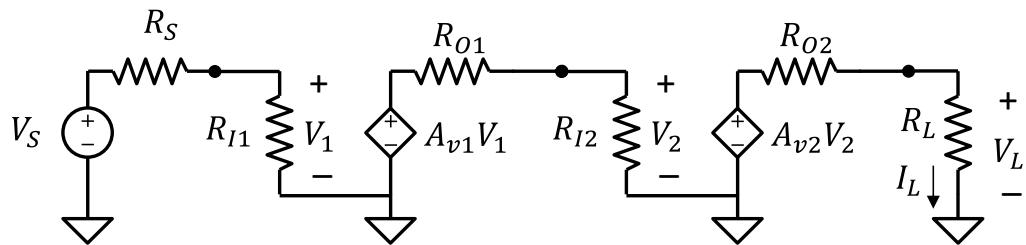
Soluzione

$$V_O = 9\text{V}$$

Esercizio 1.25

DATI: $R_S = 1\text{k}\Omega$, $R_{I1} = 9\text{k}\Omega$, $R_{O1} = 2\text{k}\Omega$, $R_{I2} = 4\text{k}\Omega$, $R_{O2} = 100\Omega$, $R_L = 1.1\text{k}\Omega$, $A_{v1} = -10$, $A_{v2} = 2$, $V_S = 1\text{V}$.

Dato il circuito in figura, calcolare la tensione ai capi di R_L e la corrente attraverso R_L .



Soluzione

$$V_L = -11\text{V}, I_L = -10\text{mA}$$

2 Semiconduttori

Esercizio 2.1

DATI: concentrazione di portatori intrinseci: $n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$;

Consideriamo un semiconduttore di tipo n realizzato inserendo nel reticolo $N_D = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ atomi donatori.

- Calcolare la concentrazione di elettroni e di lacune in equilibrio

Supponiamo di aggiungere N_A atomi accettori.

- Ricalcolare la concentrazione di elettroni e lacune in equilibrio se $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
- Ricalcolare la concentrazione di elettroni e lacune in equilibrio se $N_A = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Soluzione

- $n = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}; p = 4.2 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$;
- $n = 4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}; p = 5.3 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$;
- $n = 1.4 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}; p = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$;

Esercizio 2.2

DATI: concentrazione di portatori intrinseci: $n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; mobilità di elettroni e lacune: $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \mu_p = 300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, carica elementare $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Determinare il tipo di semiconduttore e calcolarne la resistività con i seguenti valori di droggaggio accettore N_A e donatore N_D :

- $N_D = N_A = 0$
- $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}, N_A = 0$
- $N_D = 0, N_A = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
- $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}, N_A = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
- $N_D = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, N_A = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Soluzione

- Intrinseco, $\rho = 331.6 \Omega \cdot \text{cm}$
- Tipo n, $\rho = 1.25 \Omega \cdot \text{cm}$
- Tipo p, $\rho = 0.69 \Omega \cdot \text{cm}$
- Tipo p, $\rho = 0.83 \Omega \cdot \text{cm}$
- Tipo n, $\rho = 13.3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$

Esercizio 2.3

DATI: concentrazione di portatori intrinseci: $n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; mobilità di elettroni e lacune: $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \mu_p = 300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, carica elementare $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Consideriamo un semiconduttore lungo $L = 10 \mu\text{m}$ e di sezione $100 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$. Sappiamo che è drogato con $N_D = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ atomi donatori.

Calcolare la corrente che lo attraversa quando è applicata una tensione pari a 0.2V ai suoi capi.

Soluzione

$$I = 128 \text{ mA}$$

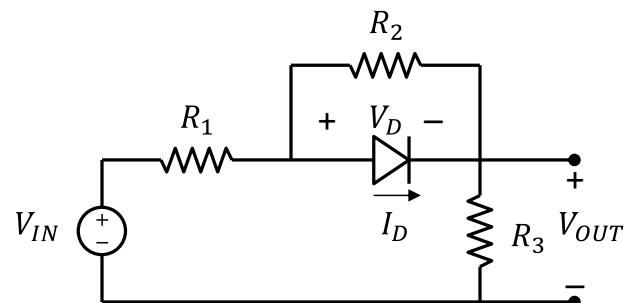
3 Diodi

Esercizio 3.1

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 2\text{k}\Omega$, $R_3 = 1\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 0$ (diodo ideale).

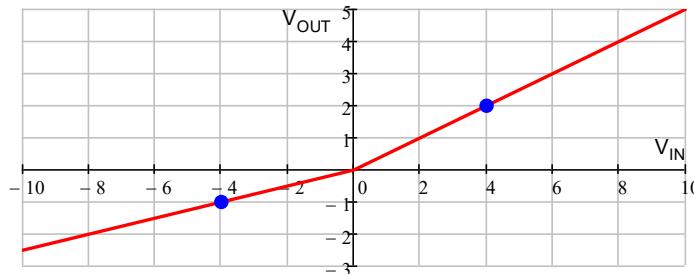
Dato il circuito in figura:

- Calcolare la tensione di uscita e la polarizzazione del diodo con $V_{IN} = 4\text{V}$
- Calcolare la tensione di uscita e la polarizzazione del diodo con $V_{IN} = -4\text{V}$
- Tracciare la transcaratteristica $V_{OUT} = f(V_{IN})$.



Soluzione

- $V_{OUT} = 2\text{V}$ (diodo ON, $I_D = 2\text{mA}$)
- $V_{OUT} = -1\text{V}$ (diodo OFF, $V_D = -2\text{V}$)
- Transcaratteristica

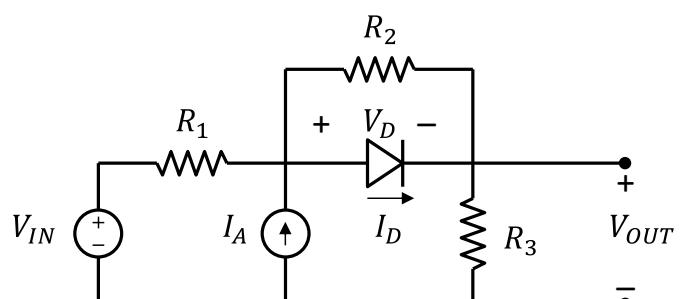


Esercizio 3.2

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 2\text{k}\Omega$, $R_3 = 3\text{k}\Omega$, $I_A = 10\text{mA}$, $V_{ON} = 0$ (diodo ideale).

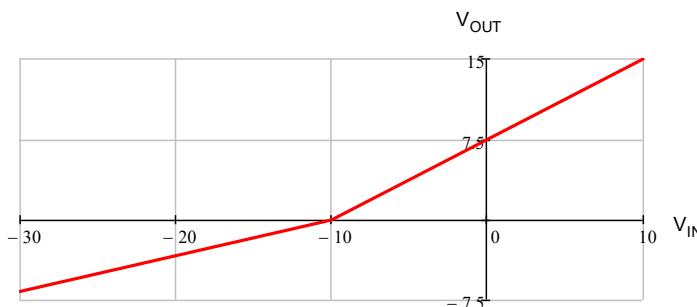
Dato il circuito in figura:

- Calcolare la tensione di uscita e la polarizzazione del diodo con $V_{IN} = 4\text{V}$
- Calcolare la tensione di uscita e la polarizzazione del diodo con $V_{IN} = -25\text{V}$
- Tracciare la transcaratteristica $V_{OUT} = f(V_{IN})$.



Soluzione

- $V_{OUT} = 10.5\text{V}$ (diodo ON, $I_D = 3.5\text{mA}$)
- $V_{OUT} = -7.5\text{V}$ (diodo OFF, $V_D = -5\text{V}$)
- Transcaratteristica

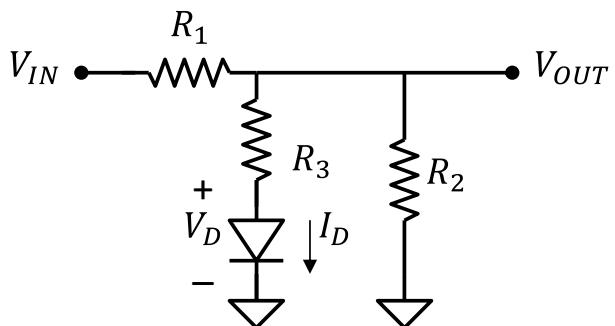


Esercizio 3.3

DATI: $R_1 = 8\text{k}\Omega$, $R_2 = 8\text{k}\Omega$, $R_3 = 1\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 0.5\text{V}$

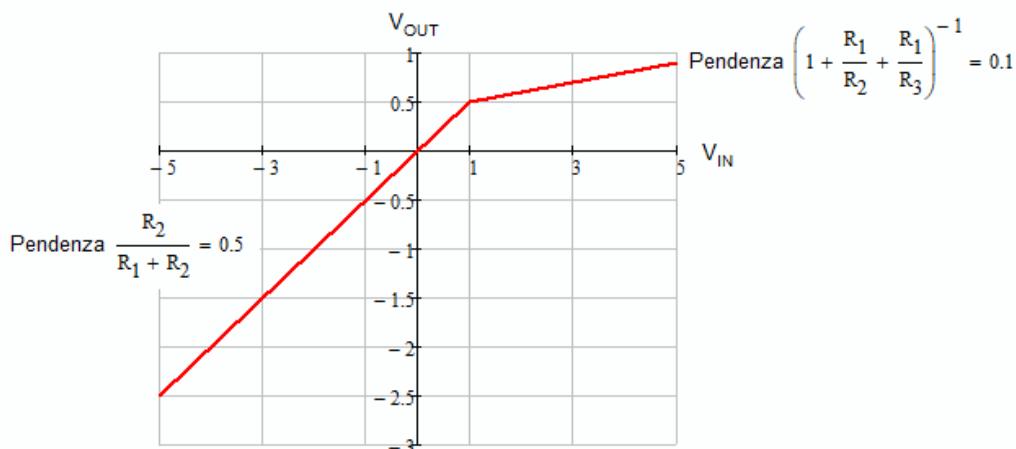
Dato il circuito in figura formato da tre resistenze e un diodo

1. Tracciare la transcaratteristica della tensione V_{OUT} in funzione della tensione V_{IN} .
2. Calcolare la tensione V_{OUT} corrispondente al punto in cui il diodo cambia regione operativa



Soluzione

1. Transcaratteristica

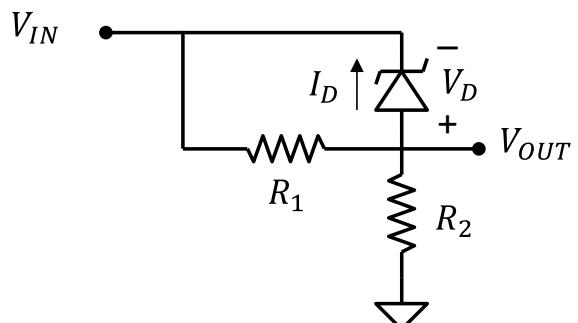


2. $V_{IN} = 1\text{V}$, $V_{OUT} = 0.5\text{V}$

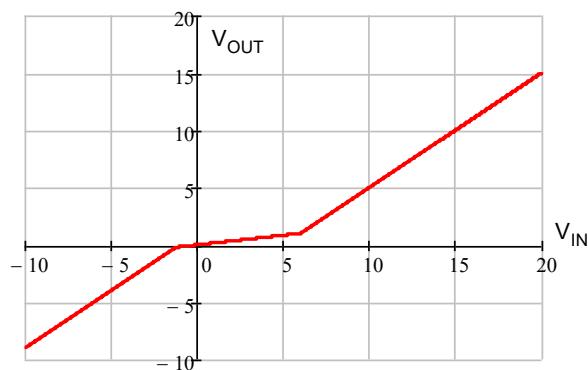
Esercizio 3.4

DATI: $R_1 = 5\text{k}\Omega$, $R_2 = 1\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 1\text{V}$, $V_Z = 5\text{V}$.

Tracciare la transcaratteristica del circuito in figura.



Soluzione

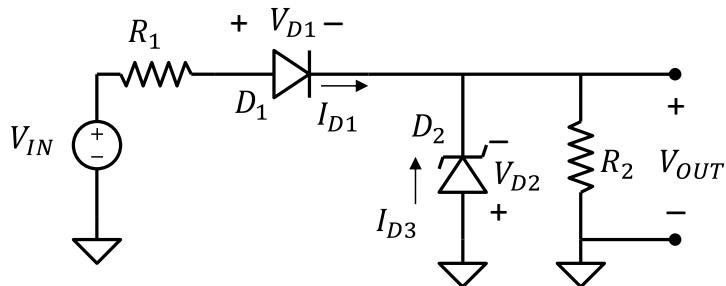


Esercizio 3.5

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$ $R_2 = 3.6\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 0.7\text{V}$, $V_Z = 5.4\text{V}$

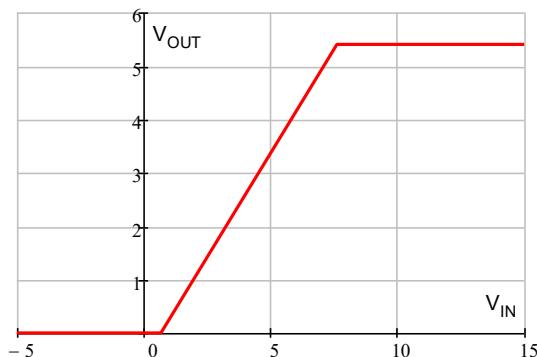
Dato il circuito in figura:

1. Calcolare la tensione V_{OUT} con $V_{IN} = 10\text{V}$
2. Calcolare la tensione V_{OUT} con $V_{IN} = -10\text{V}$
3. Calcolare la tensione V_{OUT} con $V_{IN} = 3\text{V}$
4. Tracciare la transcaratteristica.



Soluzione

1. $V_{OUT} = 5.4\text{V}$
2. $V_{OUT} = 0\text{V}$
3. $V_{OUT} = 1.8\text{V}$
4. Transcaratteristica



Esercizio 3.6

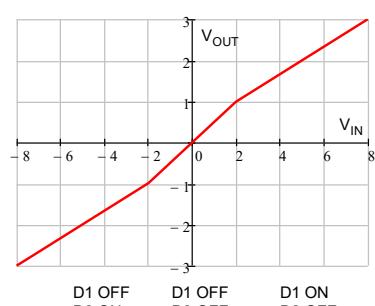
DATI: $R = 1\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 0.5\text{V}$

Dato il circuito in figura:

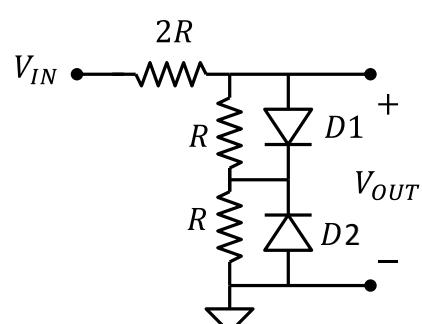
1. Tracciare la transcaratteristica.
2. Calcolare la tensione V_{OUT} con: $V_{IN} = -5\text{V}$, $V_{IN} = 1\text{V}$, $V_{IN} = 5\text{V}$

Soluzione

1. Transcaratteristica



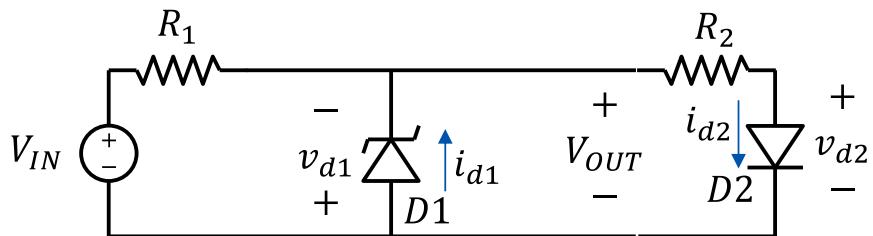
2. $V_{OUT} = -2\text{V}$, $V_{OUT} = 0.5\text{V}$, $V_{OUT}=2\text{V}$



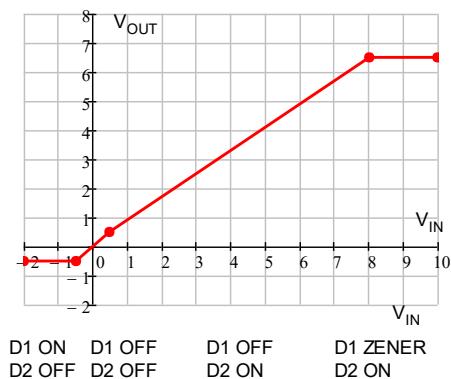
Esercizio 3.7

DATI: $R_S = 1\text{k}\Omega$, $R_1 = 4\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 0.5$, $V_Z = 6.5\text{V}$

Dato il circuito in figura, tracciare la transcaratteristica del circuito.



Soluzione



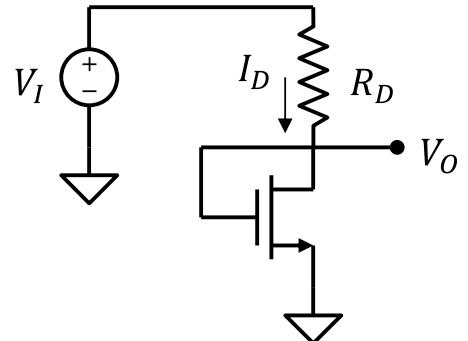
4 Transistor MOSFET

Esercizio 4.1

DATI: $R_D = 5\text{k}\Omega$, $k_n = 0.8\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 1\text{V}$

Dato il circuito in figura, determinare la corrente I_D attraverso la resistenza R_D e la tensione V_O con:

1. $V_I = 0.5\text{V}$;
2. $V_I = 2\text{V}$;
3. $V_I = 4\text{V}$;
4. $V_I = 11\text{V}$.



Soluzione

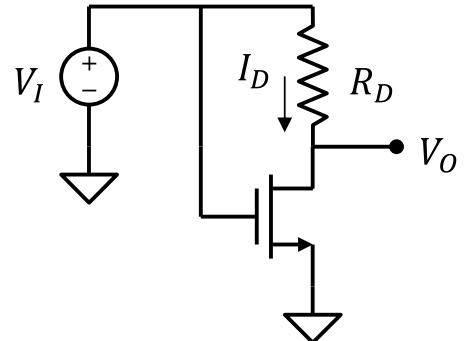
1. $I_D = 0, V_O = 0.5\text{V}$;
2. $I_D = 0.1\text{mA}, V_O = 1.5\text{V}$;
3. $I_D = 0.4\text{mA}, V_O = 2\text{V}$;
4. $I_D = 1.6\text{mA}, V_O = 3\text{V}$;

Esercizio 4.2

DATI: $R_D = 2\text{k}\Omega$, $k_n = 0.8\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 1\text{V}$

Dato il circuito in figura, determinare la corrente I_D attraverso la resistenza R_D e la tensione V_O con:

1. $V_I = 0.5\text{V}$;
2. $V_I = 2\text{V}$;
3. $V_I = 4\text{V}$;
4. $V_I = 11\text{V}$.



Soluzione

1. $I_D = 0, V_{DS} = 0.5\text{V}$;
2. $I_D = 0.4\text{mA}, V_{DS} = 1.2\text{V}$;
3. $I_D = 1.614\text{mA}, V_{DS} = 0.772\text{V}$;
4. $I_D = 5.17\text{mA}, V_{DS} = 0.668\text{V}$;

Esercizio 4.3

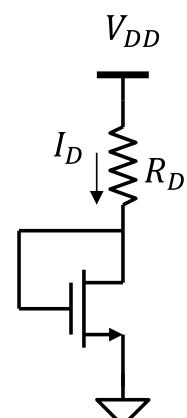
DATI: $R_D = 4\text{k}\Omega$, $k_n = 2\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 2\text{V}$, $V_{DD}=7\text{V}$

Dato il circuito in figura, determinare:

1. La regione di funzionamento del transistor.
2. La corrente attraverso la resistenza R_D .
3. Modificare il valore di R_D in modo che la corrente di polarizzazione del MOSFET sia $I_{DS} = 4\text{mA}$.

Soluzione

1. Saturazione con $V_{GS} = V_{DS} = 3\text{V}$
2. $I_D = 1 \text{ mA}$
3. $R_D = 750\Omega$



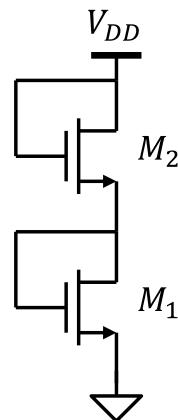
Esercizio 4.4

DATI: $k_{n1} = 1 \text{ mA/V}^2$, $k_{n2} = 4 \text{ mA/V}^2$, $V_{TN} = 1 \text{ V}$ (per entrambi i MOSFET), $V_{DD}=8 \text{ V}$

Dato il circuito in figura, determinare la corrente attraverso la serie di MOSFET e la tensione V_{GS} di entrambi i MOSFET.

Soluzione

$$\begin{aligned} I_{DS} &= 8 \text{ mA}, \\ V_{GS1} &= 5 \text{ V}, \\ V_{GS2} &= 3 \text{ V} \end{aligned}$$



Esercizio 4.5

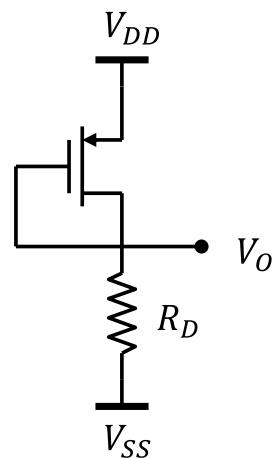
DATI: $R_D = 2 \text{ k}\Omega$, $k_p = 0.25 \text{ mA/V}^2$, $V_{TP} = -2 \text{ V}$, $V_{DD}=7 \text{ V}$, $V_{SS}=-3 \text{ V}$

Dato il circuito in figura, determinare:

1. La tensione V_O .
2. La corrente I_R attraverso la resistenza R_D .
3. Modificare il valore di R_D in modo che la tensione di uscita sia $V_O=0 \text{ V}$

Soluzione

1. $V_O = 1 \text{ V}$
2. $I_R = 2 \text{ mA}$
3. $R_D = 960 \Omega$



Esercizio 4.6

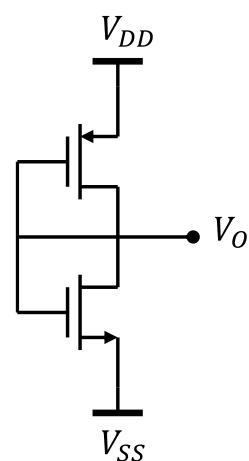
DATI: $k_n = 4 \text{ mA/V}^2$, $k_p = 1 \text{ mA/V}^2$, $V_{TN} = 1 \text{ V}$, $V_{TP} = -2 \text{ V}$, $V_{DD} = 5 \text{ V}$, $V_{SS} = -4 \text{ V}$

Dato il circuito in figura, determinare:

1. La tensione V_O .
2. La corrente attraverso i due MOSFET

Soluzione

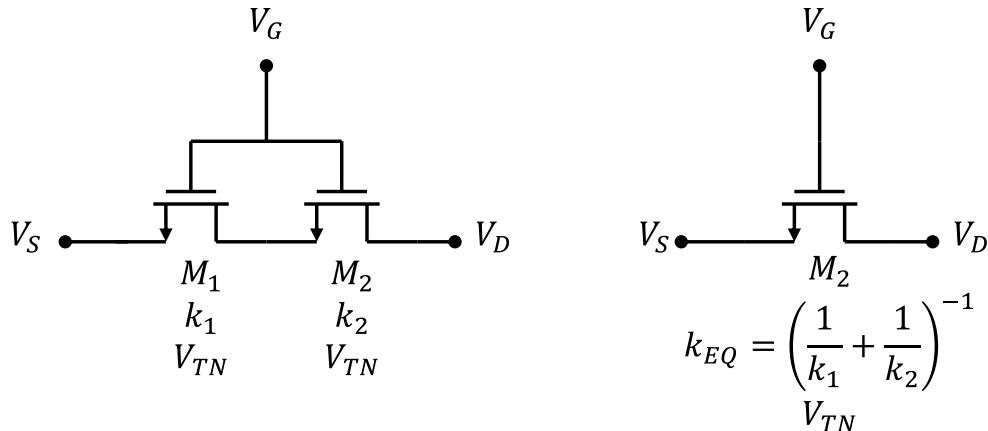
1. $V_O = -1 \text{ V}$
2. $I_{DS} = 8 \text{ mA}$



Esercizio 4.7

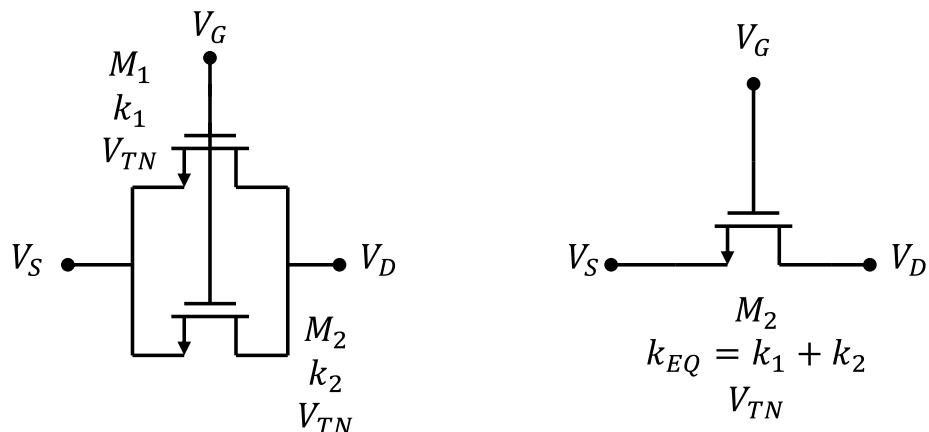
Dimostrare che la serie di due MOSFET con tensione di soglia V_{TN} (entrambi) e fattori di corrente k_1 e k_2 , equivale a un unico MOSFET con soglia V_{TN} e fattore di forma k_{EQ} tale che:

$$\frac{1}{k_{EQ}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$$



Esercizio 4.8

Dimostrare che la serie di due MOSFET con tensione di soglia V_{TN} (entrambi) e fattori di corrente k_1 e k_2 , equivale a un unico MOSFET con soglia V_{TN} e fattore di forma $k_{EQ} = k_1 + k_2$



Esercizio 4.9

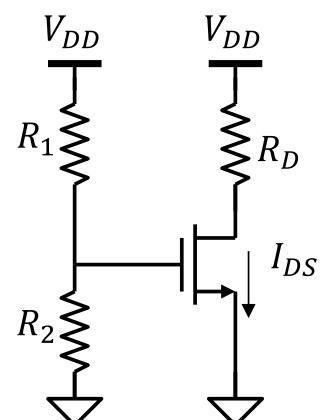
DATI: $k_n = 0.8 \text{ mA/V}^2$, $V_{TN} = 2 \text{ V}$, $V_{DD} = 10 \text{ V}$, $R_1 = 70 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 70 \text{ k}\Omega$, $R_D = 1 \text{ k}\Omega$

Dato il circuito in figura, determinare:

1. La polarizzazione del MOSFET (V_{GS} , V_{DS} e I_{DS}).
2. Ricalcolare le resistenze R_2 e R_D in modo che la corrente attraverso il MOSFET sia $I_{DS} = 0.4 \text{ mA}$ e la tensione V_{DS} sia pari a $V_{DD}/2$.

Soluzione

1. $V_{GS} = 5 \text{ V}$, $V_{DS} = 6.4 \text{ V}$, $I_{DS} = 3.6 \text{ mA}$
2. $R_2 = 30 \text{ k}\Omega$, $R_D = 12.5 \text{ k}\Omega$



Esercizio 4.10

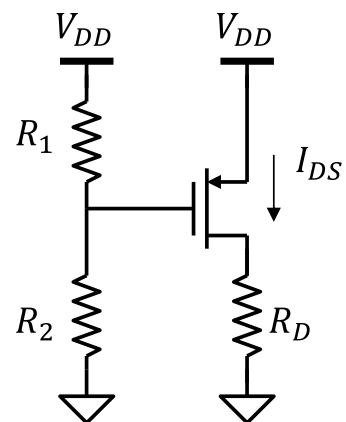
DATI: $k_p = 1.5 \text{ mA/V}^2$, $V_{TP} = -1 \text{ V}$, $V_{DD} = 15 \text{ V}$, $R_1 = 50 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_D = 500 \Omega$

Dato il circuito in figura, determinare:

1. La polarizzazione del MOSFET (V_{GS} , V_{DS} e I_{DS}).
2. Ricalcolare le resistenze R_2 e R_D in modo che la corrente attraverso il MOSFET sia $I_{DS} = 3 \text{ mA}$ e la tensione V_{DS} sia, in modulo, pari a $V_{DD}/2$.

Soluzione

1. $V_{GS} = -5 \text{ V}$, $V_{DS} = -9 \text{ V}$, $I_{DS} = 12 \text{ mA}$
2. $R_2 = 200 \text{ k}\Omega$, $R_D = 2.5 \text{ k}\Omega$



Esercizio 4.11

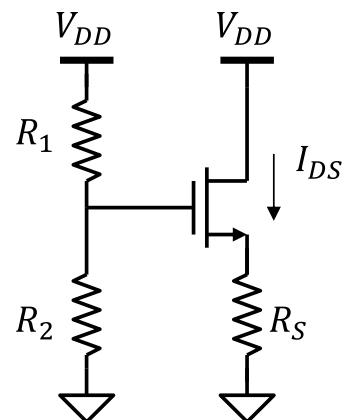
DATI: $k_n = 2 \text{ mA/V}^2$, $V_{TN} = 1.5 \text{ V}$, $V_{DD} = 10 \text{ V}$, $R_1 = 60 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 180 \text{ k}\Omega$, $R_S = 1 \text{ k}\Omega$

Dato il circuito in figura, determinare:

3. La polarizzazione del MOSFET (V_{GS} , V_{DS} e I_{DS}).
4. Che valore deve assumere R_S se vogliamo $I_{DS} = 0.25 \text{ mA}$?
5. Ricalcolare la polarizzazione del MOSFET con il valore di R_S trovato al punto precedente

Soluzione

1. $V_{GS} = 3.5 \text{ V}$, $V_{DS} = 6 \text{ V}$, $I_{DS} = 4 \text{ mA}$
2. $R_S = 22 \text{ k}\Omega$
3. $V_{GS} = 2 \text{ V}$, $V_{DS} = 4.5 \text{ V}$, $I_{DS} = 0.25 \text{ mA}$



Esercizio 4.12

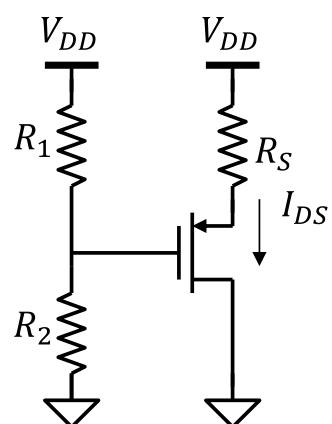
DATI: $k_p = 0.5 \text{ mA/V}^2$, $V_{TP} = -0.5 \text{ V}$, $V_{DD} = 5 \text{ V}$, $R_1 = 70 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 30 \text{ k}\Omega$, $R_S = 1 \text{ k}\Omega$

Dato il circuito in figura determinare:

1. La polarizzazione del MOSFET
2. Che valore deve assumere R_2 se vogliamo $I_{DS} = 0.25 \text{ mA}$, mantenendo invariate R_1 e R_S ?
3. Ricalcolare la polarizzazione del MOSFET con il valore di R_S trovato al punto precedente

Soluzione

1. $V_{GS} = -2.5 \text{ V}$, $V_{DS} = -4 \text{ V}$, $I_{DS} = 1 \text{ mA}$
2. $R_2 = 130 \text{ k}\Omega$
3. $V_{GS} = -1.5 \text{ V}$, $V_{DS} = -4.75 \text{ V}$, $I_{DS} = 0.25 \text{ mA}$



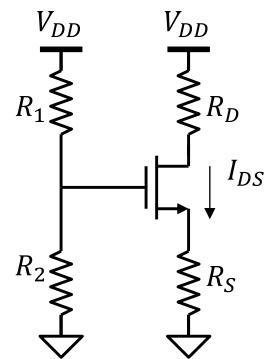
Esercizio 4.13

DATI: $k_n = 1.5 \text{ mA/V}^2$, $V_{TN} = 2 \text{ V}$, $R_1 = 130 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 110 \text{ k}\Omega$, $R_S = 500\Omega$, $R_D = 1.5 \text{ k}\Omega$, $V_{DD} = 12 \text{ V}$.

Calcolare la polarizzazione del MOSFET nel circuito in figura.

Soluzione

$$\begin{aligned}V_{GS} &= 4 \text{ V}, \\V_{DS} &= 6 \text{ V}, \\I_{DS} &= 3 \text{ mA}.\end{aligned}$$



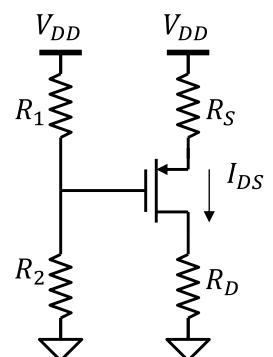
Esercizio 4.14

DATI: $k_p = 0.8 \text{ mA/V}^2$, $V_{TP} = -1 \text{ V}$, $R_1 = 68 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 52 \text{ k}\Omega$, $R_S = 2 \text{ k}\Omega$, $R_D = 1 \text{ k}\Omega$, $V_{DD} = 15 \text{ V}$.

Calcolare la polarizzazione del MOSFET nel circuito in figura.

Soluzione

$$\begin{aligned}V_{GS} &= -3.5 \text{ V}, \\V_{DS} &= -7.5 \text{ V}, \\I_{DS} &= 2.5 \text{ mA}.\end{aligned}$$



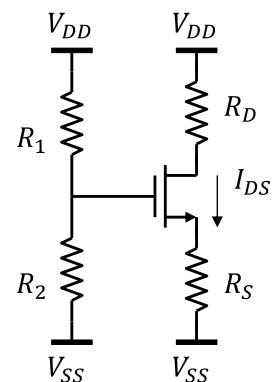
Esercizio 4.15

DATI: $k_n = 3 \text{ mA/V}^2$, $V_{TN} = 1.5 \text{ V}$, $R_1 = 260 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 140 \text{ k}\Omega$, $V_{DD} = 8 \text{ V}$, $V_{SS} = -8 \text{ V}$.

Dato il circuito in figura, calcolare i valori delle resistenze R_S e R_D in modo tale che la corrente del MOSFET sia $I_{DS} = 6 \text{ mA}$ e il potenziale del terminale di drain sia $V_D = 2 \text{ V}$.

Soluzione

$$\begin{aligned}R_S &= 350\Omega, \\R_D &= 1 \text{ k}\Omega,\end{aligned}$$



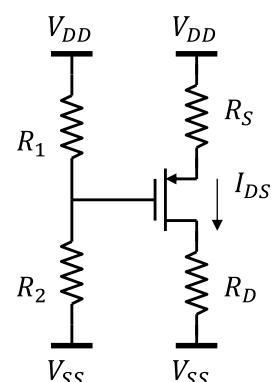
Esercizio 4.16

DATI: $k_p = 4 \text{ mA/V}^2$, $V_{TP} = -1.4 \text{ V}$, $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 300 \text{ k}\Omega$, $V_{DD} = 15 \text{ V}$, $V_{SS} = -5 \text{ V}$.

Dato il circuito in figura, calcolare i valori delle resistenze R_S e R_D in modo tale che la corrente del MOSFET sia $I_{DS} = 2 \text{ mA}$ e il potenziale del terminale di drain sia $V_D = 0 \text{ V}$.

Soluzione

$$\begin{aligned}R_S &= 1.3 \text{ k}\Omega, \\R_D &= 2.5 \text{ k}\Omega\end{aligned}$$



Esercizio 4.17

DATI:

$$M_1: k_{n1} = 1 \text{ mA/V}^2, V_{TN} = 1 \text{ V}$$

$$M_2: k_{n2} = 4 \text{ mA/V}^2, V_{TN} = 1 \text{ V}$$

$$R_1 = 36 \text{ k}\Omega, R_2 = 3 \text{ k}\Omega$$

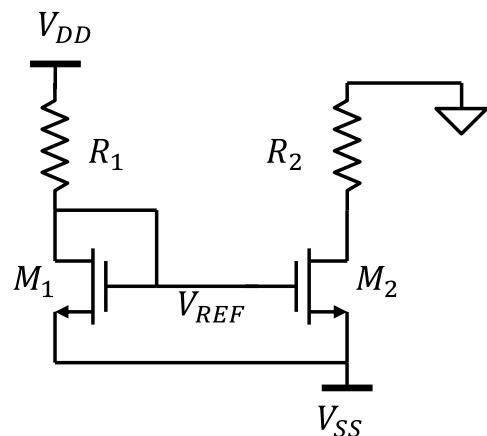
$$V_{DD} = 10 \text{ V}, V_{SS} = -10 \text{ V}$$

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. Il potenziale V_{REF}
2. La corrente erogata da M_2 .
3. Il valore massimo della resistenza R_2 tale da mantenere M_2 in saturazione.

Soluzione

1. $V_{REF} = -8 \text{ V}$
2. $I_{DS2} = 2 \text{ mA}$
3. $R_{2,\text{MAX}} = 4.5 \text{ k}\Omega$



Esercizio 4.18

DATI:

$$M_1: k_{n1} = 1 \text{ mA/V}^2, V_{TN} = 1 \text{ V}$$

$$M_2: k_{n2} = 2.5 \text{ mA/V}^2, V_{TN} = 1 \text{ V}$$

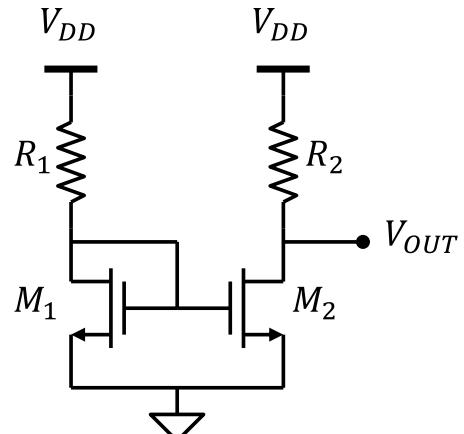
$$R_2 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$V_{DD} = 10 \text{ V}$$

Dato il circuito in figura, trovare il valore della resistenza R_1 affinché $V_{OUT} = 5 \text{ V}$.

Soluzione

$$R_1 = 3.5 \text{ k}\Omega$$



Esercizio 4.19

DATI:

$$M_1: k_{p1} = 1 \text{ mA/V}^2, V_{TP} = -1.5 \text{ V}$$

$$M_2: k_{p1} = 5 \text{ mA/V}^2, V_{TP} = -1.5 \text{ V}$$

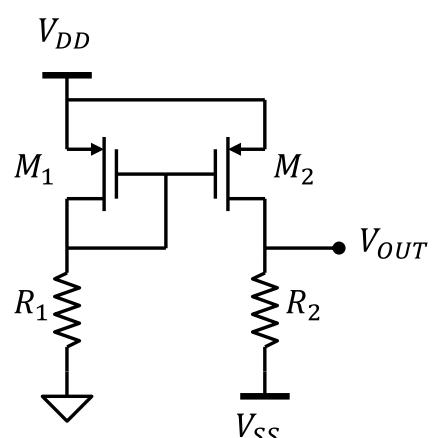
$$R_2 = 500 \Omega$$

$$V_{DD} = 5 \text{ V}, V_{SS} = -5 \text{ V}$$

Dato il circuito in figura, trovare il valore della resistenza R_1 affinché $V_{OUT} = 0 \text{ V}$.

Soluzione

$$R_1 = 750 \Omega$$



Esercizio 4.20

DATI:

$$M_1: k_{n1} = 1 \text{ mA/V}^2, V_{TN} = 2 \text{ V}$$

$$M_2: k_{n2} = 2 \text{ mA/V}^2, V_{TN} = 2 \text{ V}$$

$$M_3: k_{n3} = 4 \text{ mA/V}^2, V_{TN} = 2 \text{ V}$$

$$R_2 = 500 \Omega, R_3 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$V_{DD} = 10 \text{ V}, V_{SS} = -10 \text{ V}$$

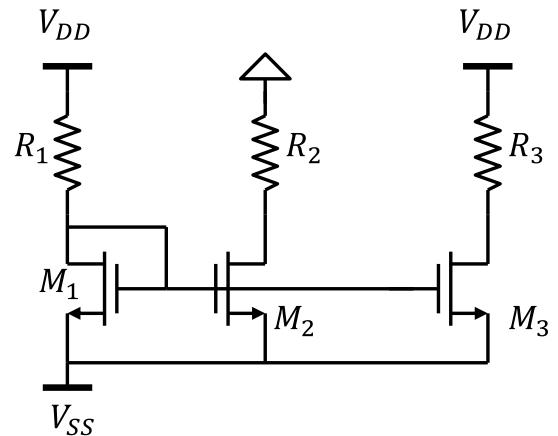
Dato il circuito in figura, calcolare:

1. Il valore della resistenza R_1 affinché la corrente su M_2 sia $I_{DS2} = 4 \text{ mA}$
2. Quanta potenza viene dissipata su R_3 ?

Soluzione

$$1. R_1 = 8 \text{ k}\Omega$$

$$2. P_3 = 0.128 \text{ W}$$



Esercizio 4.21

DATI:

$$M_1: k_{n1} = 10 \text{ mA/V}^2, V_{TN} = 1.5 \text{ V}$$

$$M_2: k_{n2} = 1 \text{ mA/V}^2, V_{TN} = 1.5 \text{ V}$$

$$M_3: k_{n3} = 4 \text{ mA/V}^2, V_{TN} = 1.5 \text{ V}$$

$$R_1 = 1.5 \text{ k}\Omega, R_2 = 40 \text{ k}\Omega, R_3 = 60 \text{ k}\Omega, R_D = 10 \text{ k}\Omega$$

$$V_{DD} = 10 \text{ V}$$

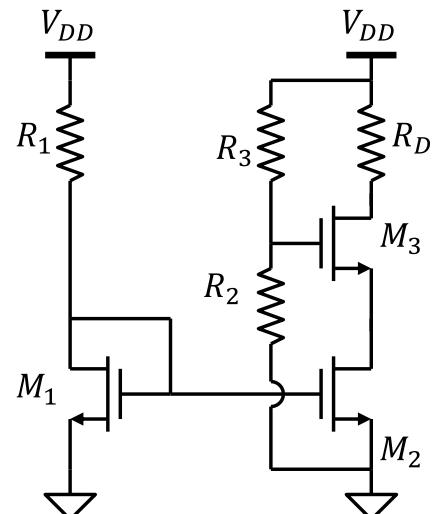
Dato il circuito in figura, calcolare il punto di polarizzazione di tutti i MOSFET.

Soluzione

$$M_1: V_{GS} = V_{DS} = 2.5 \text{ V}, I_{DS} = 5 \text{ mA}$$

$$M_2: V_{GS} = 2.5 \text{ V}, V_{DS} = 2 \text{ V}, I_{DS} = 0.5 \text{ mA}$$

$$M_3: V_{GS} = 2 \text{ V}, V_{DS} = 3 \text{ V}, I_{DS} = 0.5 \text{ mA}$$



Esercizio 4.22

DATI:

$$M_1: k_{n1} = 5 \text{ mA/V}^2, V_{TN} = 1 \text{ V}$$

$$M_2: k_{n2} = 1 \text{ mA/V}^2, V_{TN} = 1 \text{ V}$$

$$M_3: k_{n3} = 4 \text{ mA/V}^2, V_{TN} = 1 \text{ V}$$

$$R_2 = 60 \text{ k}\Omega, R_3 = 40 \text{ k}\Omega, V_{DD} = 10 \text{ V}$$

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. le resistenze R_1 e R_D affinché la corrente attraverso M_3 sia 2 mA , il potenziale del drain di M_3 sia 7 V .
2. La polarizzazione di tutti i MOSFET, verificandone la condizione di saturazione

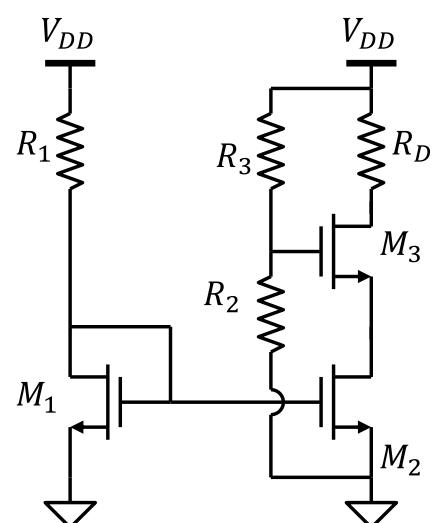
Soluzione

$$1. R_1 = 700 \Omega, R_D = 1.5 \text{ k}\Omega$$

$$2. M_1: V_{GS} = V_{DS} = 3 \text{ V}, I_{DS} = 10 \text{ mA}$$

$$M_2: V_{GS} = 3 \text{ V}, V_{DS} = 4 \text{ V}, I_{DS} = 2 \text{ mA}$$

$$M_3: V_{GS} = 2 \text{ V}, V_{DS} = 3 \text{ V}, I_{DS} = 2 \text{ mA}$$



Esercizio 4.23

DATI:

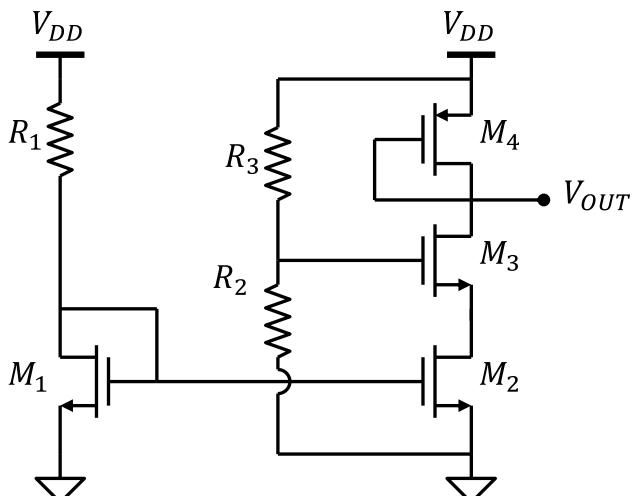
- M₁: k_{n1} = 5mA/V², V_{TN} = 1V
- M₂: k_{p2} = 0.5mA/V², V_{TP} = 1V
- M₃: k_{n3} = 8mA/V², V_{TN} = 1V
- M₄: k_{p4} = 0.08mA/V², V_{TP} = -1V
- R₁ = 50kΩ, R₂ = 70kΩ, V_{DD} = 12V

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. La resistenza R₁ affinché la corrente attraverso M₃ sia 1mA.
2. La tensione V_{OUT} del circuito.
3. La polarizzazione di tutti i MOSFET, verificandone la condizione di saturazione

Soluzione

1. R₁ = 900Ω
2. V_{OUT} = 6V
3. M₁: V_{GS} = V_{DS} = 3V, I_{DS} = 10mA
 M₂: V_{GS} = 3V, V_{DS} = 3.5V, I_{DS} = 1mA
 M₃: V_{GS} = 1.5V, V_{DS} = 2.5V, I_{DS} = 1mA
 M₄: V_{GS} = V_{DS} = -6V, I_{DS} = 1mA



Esercizio 4.24

DATI:

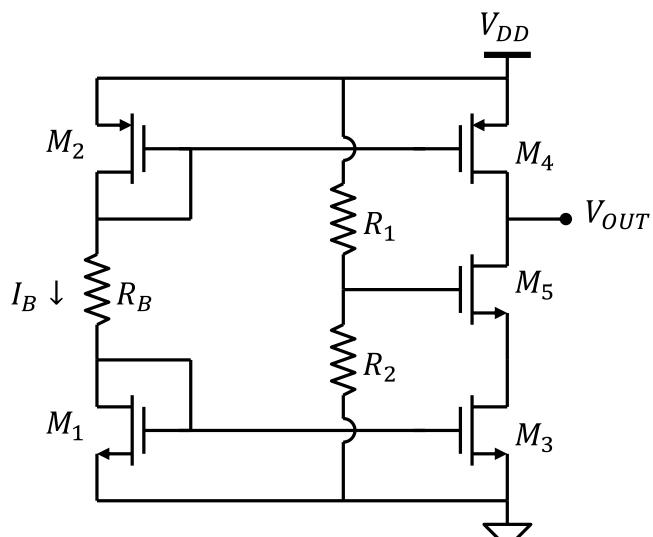
$$R_1 = R_2 = 100\text{k}\Omega$$

$$V_{DD} = 10\text{V}$$

- M₁: k_{n1} = 2mA/V², V_{TN} = 1V, λ_n=0.01V⁻¹
- M₂: k_{p2} = 2mA/V², V_{TP} = -1V, λ_p=0.01V⁻¹
- M₃: k_{n3} = 0.5mA/V², V_{TN} = 1V, λ_n=0.01V⁻¹
- M₄: k_{p4} = 0.5mA/V², V_{TP} = -1V, λ_p=0.01V⁻¹
- M₅: k_{n5} = 2mA/V², V_{TN} = 1V, λ_n=0.01V⁻¹

Dato il circuito in figura, trovare il valore di R_B per avere I_B = 1mA e calcolare V_{OUT}.

Suggerimento: usare la modulazione di lunghezza di canale (λ) solo se (e dove) è strettamente necessario.



Soluzione

$$R_B = 6\text{k}\Omega$$

$$V_{OUT} = 6.75\text{V}$$

Esercizio 4.25

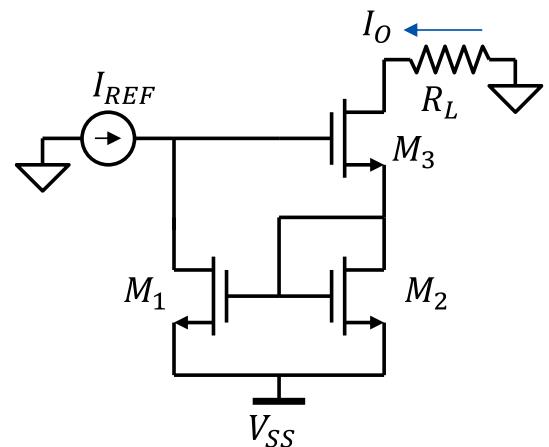
DATI: $V_{SS} = -10V$, $I_{REF} = 2mA$
 $M_1: k_{n1} = 1mA/V^2$, $V_{TN} = 1V$
 $M_2: k_{n2} = 0.5mA/V^2$, $V_{TN} = 1V$
 $M_3: k_{n3} = 2mA/V^2$, $V_{TN} = 1V$

Dato il circuito in figura:

1. Trovare il valore della corrente I_O nell'ipotesi che tutti i MOSFET lavorino in saturazione.
2. Calcolare il massimo valore della resistenza R_L che garantisce che tutti i MOSFET lavorino in saturazione

Soluzione

1. $I_O = 1mA$
2. $R_{L,MAX} = 6k\Omega$



Esercizio 4.26

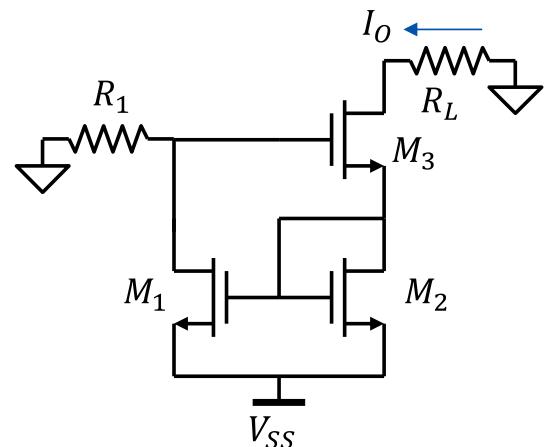
DATI: $R_1 = 17.5k\Omega$, $R_L = 5k\Omega$, $V_{SS} = -5V$
 $M_1: k_{n1} = 0.5mA/V^2$, $V_{TN} = 0.5V$
 $M_2: k_{n2} = 1.25mA/V^2$, $V_{TN} = 0.5V$
 $M_3: k_{n3} = 5mA/V^2$, $V_{TN} = 0.5V$

Dato il circuito in figura:

1. Trovare il valore della corrente I_O e il punto di polarizzazione di tutti i MOSFET.
2. Calcolare il valore di R_1 tale da ottenere $I_O = 0.1mA$.

Soluzione

1. $I_O = 0.4mA$
 $M_1: V_{GS1} = 1.3V$, $V_{DS1} = 2.2V$
 $M_2: V_{GS2} = 1.3V$, $V_{DS2} = 1.3V$
 $M_3: V_{GS3} = 0.9V$, $V_{DS3} = 1.7V$
2. $R_1 = 85k\Omega$



Esercizio 4.27

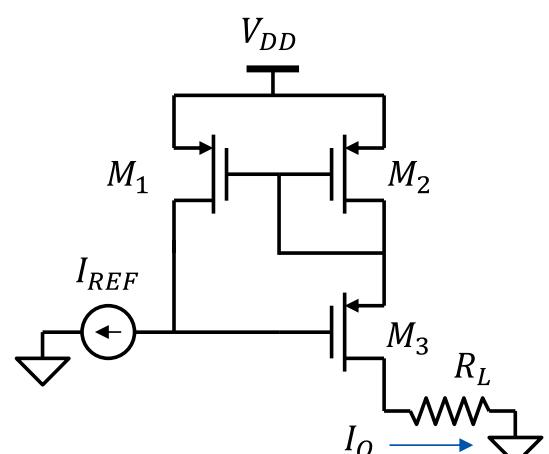
DATI: $V_{DD} = 5V$, $I_{REF} = 0.5mA$
 $M_1: k_{p1} = 1mA/V^2$, $V_{TP} = -0.5V$
 $M_2: k_{p2} = 1mA/V^2$, $V_{TP} = -0.5V$
 $M_3: k_{p3} = 4mA/V^2$, $V_{TP} = -0.5V$

Dato il circuito in figura:

1. Trovare il valore della corrente I_O nell'ipotesi che tutti i MOSFET lavorino in saturazione.
2. Calcolare il massimo valore della resistenza R_L che garantisce che tutti i MOSFET lavorino in saturazione

Soluzione

1. $I_O = 0.5mA$
2. $R_{L,MAX} = 6k\Omega$



Esercizio 4.28

DATI: $R_L = 500\Omega$, $V_{DD} = 7V$

M_1 : $k_{p1} = 0.8\text{mA/V}^2$, $V_{TP} = -1V$

M_2 : $k_{p2} = 8\text{mA/V}^2$, $V_{TP} = -1V$

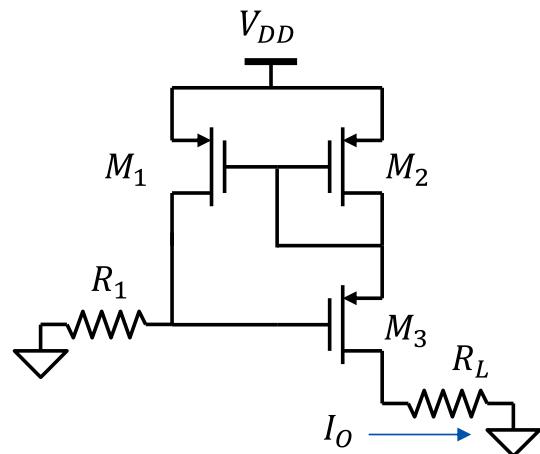
M_3 : $k_{p3} = 8\text{mA/V}^2$, $V_{TP} = -1V$

Sia dato il circuito in figura in cui sappiamo che la tensione drain-source di M_1 è $V_{DS1} = -3V$. Calcolare il valore della corrente I_O e della resistenza R_1 .

Soluzione

$$I_O = 1\text{mA}$$

$$R_1 = 40\text{k}\Omega$$



Esercizio 4.29

DATI: $V_{DD} = 11V$, $I_{REF} = 0.25\text{mA}$

M_1 : $k_{n1} = 2\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 1V$

M_2 : $k_{n2} = 6\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 1V$

M_3 : $k_{n3} = 2\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 1V$

M_4 : $k_{n4} = 6\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 1V$

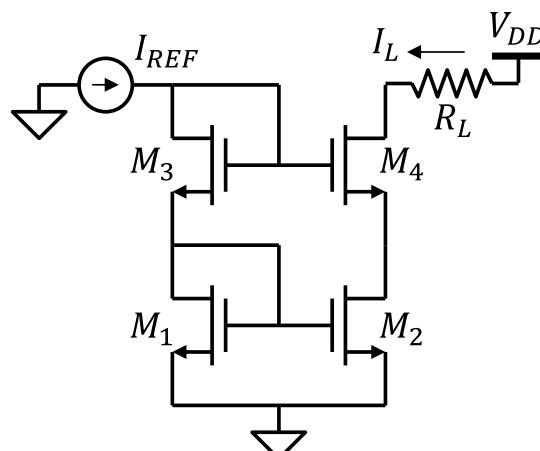
Dato il circuito in figura:

1. Trovare il valore della corrente I_L nell'ipotesi che tutti i MOSFET lavorino in saturazione.
2. Calcolare il massimo valore della resistenza R_L che garantisce che tutti i MOSFET lavorino in saturazione

Soluzione

$$1. I_O = 0.75\text{mA}$$

$$2. R_{L,\text{MAX}} = 12\text{k}\Omega$$



Esercizio 4.30

DATI: $V_{DD} = 5V$, $R_1 = 24\text{k}\Omega$, $R_L = 4\text{k}\Omega$

M_1 : $k_{n1} = 1\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 0.5V$

M_2 : $k_{n2} = 5\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 0.5V$

M_3 : $k_{n3} = 1\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 0.5V$

M_4 : $k_{n4} = 5\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 0.5V$

Dato il circuito in figura, trovare il valore della corrente I_L e la polarizzazione di tutti i MOSFET.

Soluzione

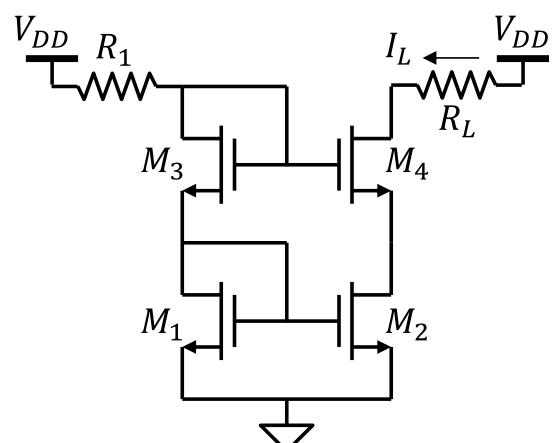
$$I_O = 0.625\text{mA}$$

M_1 : $V_{GS1} = 1V$, $V_{DS1} = 1V$, $I_{DS1} = 0.125\text{mA}$

M_2 : $V_{GS2} = 1V$, $V_{DS2} = 1V$, $I_{DS2} = 0.625\text{mA}$

M_3 : $V_{GS3} = 1V$, $V_{DS3} = 1V$, $I_{DS3} = 0.125\text{mA}$

M_4 : $V_{GS4} = 1V$, $V_{DS4} = 1.5V$, $I_{DS4} = 0.625\text{mA}$



Esercizio 4.31

DATI: $V_{DD} = 12V$, $I_{REF} = 1.5mA$, $R_L = 3k\Omega$

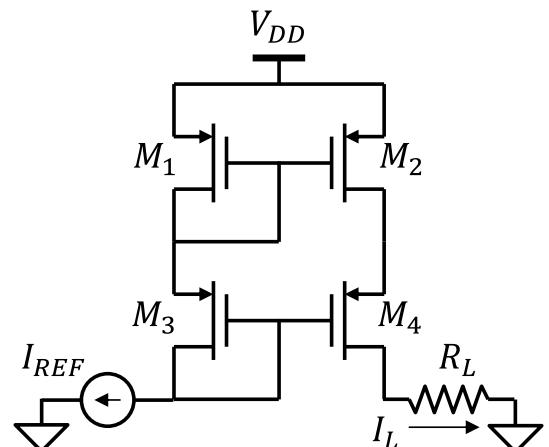
Dato il circuito in figura in cui tutti i MOSFET hanno: $k_p = 3mA/V^2$ e $V_{TP} = -1V$:

1. Trovare il valore della corrente I_L e la caduta di tensione ai capi di R_L .
2. Calcolare il massimo valore della resistenza R_L che garantisce che tutti i MOSFET lavorino in saturazione

Soluzione

$$3. I_L = 1.5mA, V_L = 4.5V$$

$$R_{L,MAX} = 6k\Omega$$



Esercizio 4.32

DATI: $V_{DD} = 15V$, $R_L = 1k\Omega$

$M_1: k_{p1} = 0.8mA/V^2, V_{TP} = -1.5V$

$M_2: k_{p2} = 4mA/V^2, V_{TP} = -1.5V$

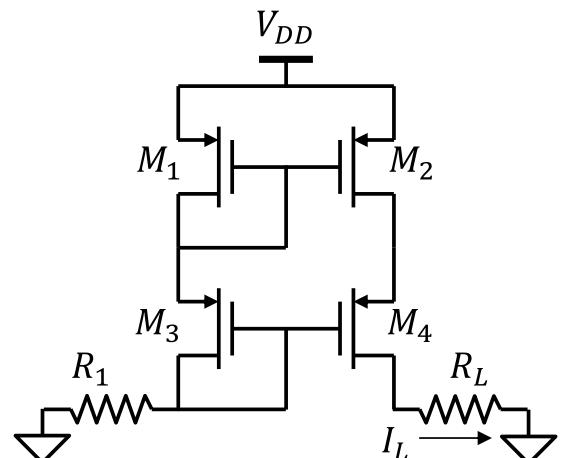
$M_3: k_{p3} = 0.8mA/V^2, V_{TP} = -1.5V$

$M_4: k_{p4} = 4mA/V^2, V_{TP} = -1.5V$

Dato il circuito in figura, trovare il valore della resistenza R_1 affinché sia $I_L = 4.5mA$.

Soluzione

$$R_1 = 10k\Omega$$



Esercizio 4.33

DATI: $V_{DD} = 5V$, $V_{SS} = -5V$, $R_5 = 200\Omega$, $R_6 = 600\Omega$, $R = 500\Omega$

$M_1: k_{n1} = 2mA/V^2, V_{TN} = 1V$

$M_2: k_{n2} = 8mA/V^2, V_{TN} = 1V$

$M_3: k_{p3} = 2mA/V^2, V_{TP} = -1V$

$M_4: k_{p4} = 2mA/V^2, V_{TP} = -1V$

$M_5: k_{n5} = 4mA/V^2, V_{TN} = 1V$

$M_6: k_{p6} = 6mA/V^2, V_{TP} = -1V$

Dato il circuito in figura, calcolare le correnti I_5 e I_6 e il punto di polarizzazione di tutti i MOS.

Soluzione

$$I_5 = 2mA, I_6 = 1.5mA$$

$$M_1: V_{GS1} = 2V, V_{DS1} = 8V$$

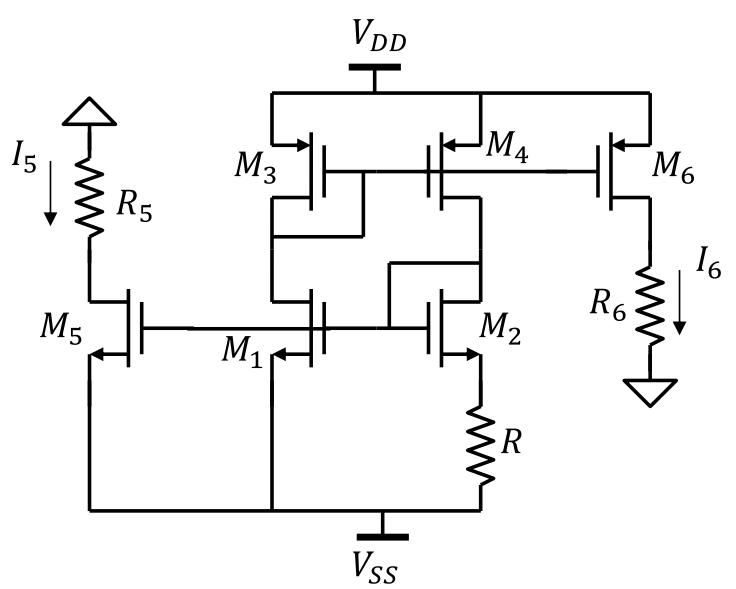
$$M_2: V_{GS2} = 1.5V, V_{DS2} = 1.5V$$

$$M_3: V_{GS3} = -2V, V_{DS3} = -2V$$

$$M_4: V_{GS4} = -2V, V_{DS4} = -8V$$

$$M_5: V_{GS5} = 2V, V_{DS5} = 4.6V$$

$$M_6: V_{GS6} = -2V, V_{DS6} = -4.1V$$



Esercizio 4.34

DATI: $V_{DD} = 5V$, $V_{SS} = -5V$, $R_5 = 4k\Omega$, $R_6 = 10k\Omega$

M_1 : $k_{n1} = 0.8mA/V^2$, $V_{TN} = 1V$

M_2 : $k_{n2} = 5mA/V^2$, $V_{TN} = 1V$

M_3 : $k_{p3} = 3.2mA/V^2$, $V_{TP} = -1V$

M_4 : $k_{p4} = 3.2mA/V^2$, $V_{TP} = -1V$

M_5 : $k_{n5} = 0.9mA/V^2$, $V_{TN} = 1V$

M_6 : $k_{p6} = 1.6mA/V^2$, $V_{TP} = -1V$

Dato il circuito in figura, calcolare:

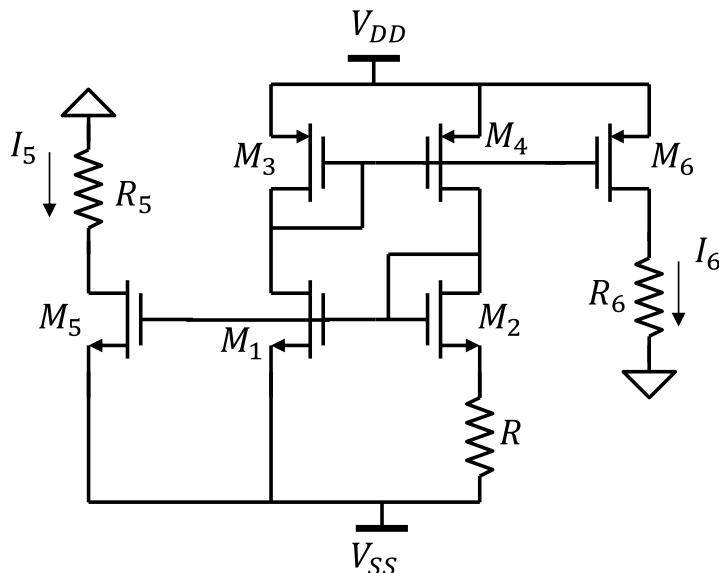
1. il valore della resistenza R per ottenere $I_5 = 0.45mA$.

2. la corrente I_6 .

Soluzione

1. $R = 1.5k\Omega$

2. $I_6 = 0.2mA$



Esercizio 4.35

DATI: $V_{DD} = 5V$, $V_{SS} = -5V$, $R_5 = 400\Omega$, $R_6 = 2k\Omega$

M_1 : $k_{n1} = 0.8mA/V^2$, $V_{TN} = 0.5V$

M_2 : $k_{n2} = 7.2mA/V^2$, $V_{TN} = 0.5V$

M_3 : $k_{p3} = 0.8mA/V^2$, $V_{TP} = -0.5V$

M_4 : $k_{p4} = 0.8mA/V^2$, $V_{TP} = -0.5V$

M_5 : $k_{n5} = 4mA/V^2$, $V_{TN} = 0.5V$

M_6 : $k_{p6} = 0.8mA/V^2$, $V_{TP} = -0.5V$

M_7 : $k_{n7} = 7.2mA/V^2$, $V_{TN} = 0.5V$

Dato il circuito in figura, calcolare le correnti I_5 e I_6 e il punto di polarizzazione di tutti i MOS.

Soluzione

$I_5 = 4.5mA$, $I_6 = 0.9mA$

M_1 : $V_{GS1} = 2V$, $V_{DS1} = 8V$

M_2 : $V_{GS2} = 1V$, $V_{DS2} = 1V$

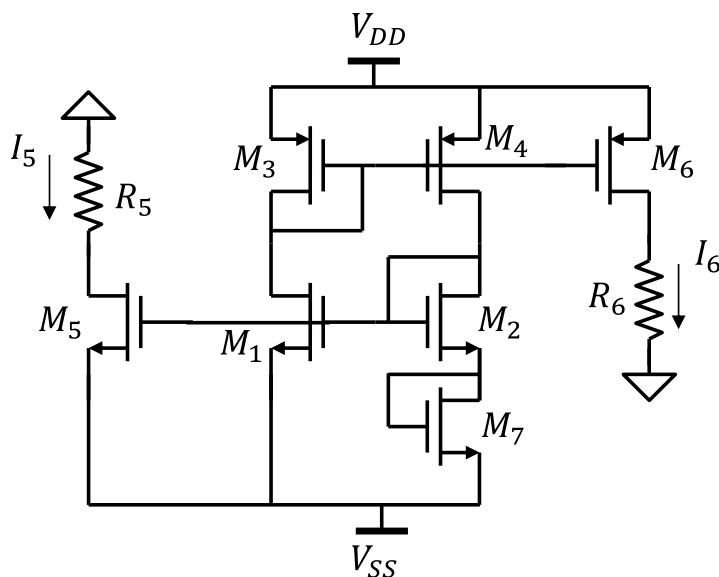
M_3 : $V_{GS3} = -2V$, $V_{DS3} = -2V$

M_4 : $V_{GS4} = -2V$, $V_{DS4} = -8V$

M_5 : $V_{GS5} = 2V$, $V_{DS5} = 3.2V$

M_6 : $V_{GS6} = -2V$, $V_{DS6} = -3.2V$

M_7 : $V_{GS7} = 1V$, $V_{DS7} = 1V$



Esercizio 4.36

DATI: $V_{DD} = 5V$, $V_{SS} = -5V$, $R_5 = 1k\Omega$, $R_6 = 2k\Omega$

M_1 : $k_{n1} = 1mA/V^2$, $V_{TN} = 0.5V$

M_2 : $k_{n2} = 1mA/V^2$, $V_{TN} = 0.5V$

M_3 : $k_{p3} = 4mA/V^2$, $V_{TP} = -0.5V$

M_4 : $k_{p4} = 1mA/V^2$, $V_{TP} = -0.5V$

M_5 : $k_{p5} = 5mA/V^2$, $V_{TN} = 0.5V$

M_6 : $k_{p6} = 6mA/V^2$, $V_{TP} = -0.5V$

Dato il circuito in figura, calcolare le correnti I_5 e I_6 e il punto di polarizzazione di tutti i MOS.

Soluzione

$$I_5 = 2.5mA, I_6 = 0.75mA$$

$$M_1: V_{GS1} = 1.5V, V_{DS1} = 8V$$

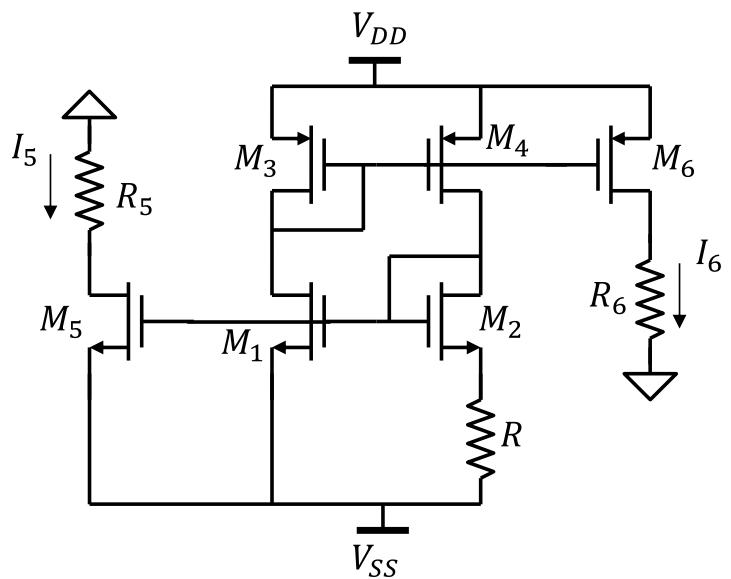
$$M_2: V_{GS2} = 1V, V_{DS2} = 1V$$

$$M_3: V_{GS3} = -1V, V_{DS3} = -1V$$

$$M_4: V_{GS4} = -1V, V_{DS4} = -8.5V$$

$$M_5: V_{GS5} = 1.5V, V_{DS5} = 2.5V$$

$$M_6: V_{GS6} = -1V, V_{DS6} = -3.5V$$



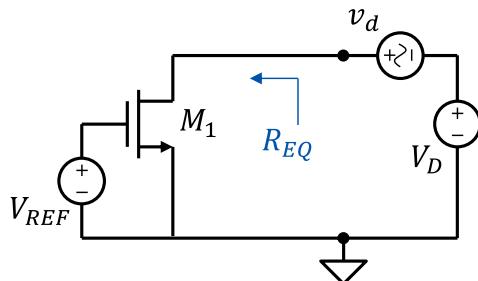
5 Modelli ai piccoli segnali

Esercizio 5.1

DATI: $k_n = 1 \text{ mA/V}^2$, $V_{TN} = 1 \text{ V}$, $\lambda_n = 0.01 \text{ V}^{-1}$, $V_{REF} = 3 \text{ V}$, $V_D = 5 \text{ V}$

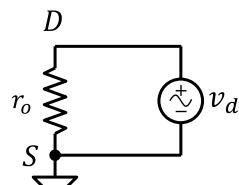
Dato il circuito in figura:

- Identificare la regione di funzionamento del MOSFET e disegnare il circuito ai piccoli segnali.
- Calcolare la resistenza equivalente al piccolo segnale come mostrato in figura.



Soluzione

- MOS in saturazione. Circuito ai piccoli segnali ($r_o = 50 \text{ k}\Omega$):



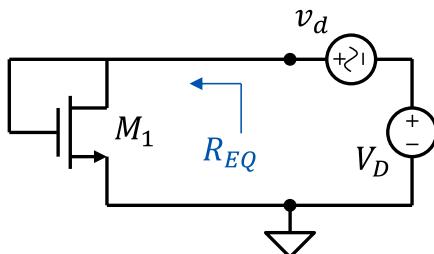
$$2. R_{EQ} = 50 \text{ k}\Omega$$

Esercizio 5.2

DATI: $k_n = 1 \text{ mA/V}^2$, $V_{TN} = 1 \text{ V}$, $\lambda_n = 0.01 \text{ V}^{-1}$, $V_D = 3.5 \text{ V}$

Dato il circuito in figura:

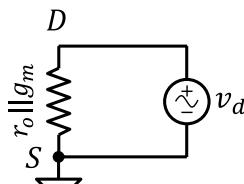
- Identificare la regione di funzionamento del MOSFET e disegnare il circuito ai piccoli segnali.
- Calcolare la resistenza equivalente al piccolo segnale come mostrato in figura.



Soluzione

- MOS in saturazione.

Circuito ai piccoli segnali ($g_m = 2.5 \text{ mS}$, $r_o = 32 \text{ k}\Omega$):



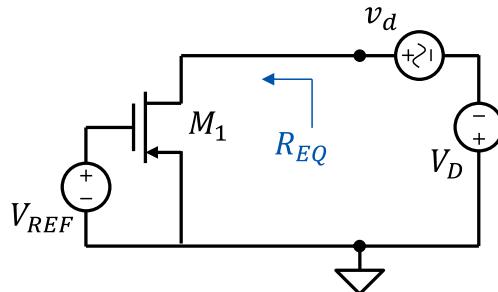
$$2. R_{EQ} = 395.1 \Omega$$

Esercizio 5.3

DATI: $k_p = 1 \text{ mA/V}^2$, $V_{TP} = -1 \text{ V}$, $\lambda_p = 0.01 \text{ V}^{-1}$, $V_{REF} = -2 \text{ V}$, $V_D = 5 \text{ V}$

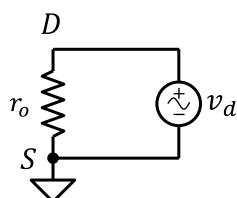
Dato il circuito in figura:

1. Disegnare il circuito ai piccoli segnali.
2. Calcolare la resistenza equivalente al piccolo segnale come mostrato in figura.



Soluzione

1. Circuito ai piccoli segnali ($r_o = 200 \text{ k}\Omega$):



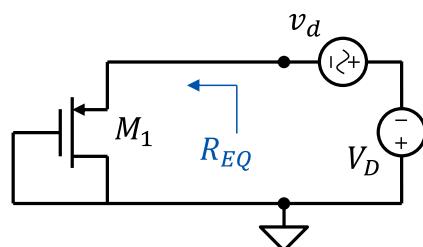
$$R_{EQ} = 200 \text{ k}\Omega$$

Esercizio 5.4

DATI: $k_p = 1 \text{ mA/V}^2$, $V_{TP} = -1 \text{ V}$, $\lambda_p = 0.01 \text{ V}^{-1}$, $V_D = -3 \text{ V}$

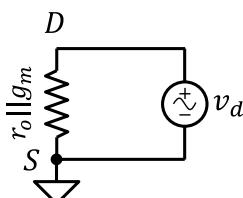
Dato il circuito in figura:

1. Disegnare il circuito ai piccoli segnali.
2. Calcolare la resistenza equivalente al piccolo segnale come mostrato in figura.



Soluzione

1. Circuito ai piccoli segnali ($g_m = 2 \text{ mS}$, $r_o = 50 \text{ k}\Omega$):



$$2. R_{EQ} = 495 \Omega$$

Esercizio 5.5

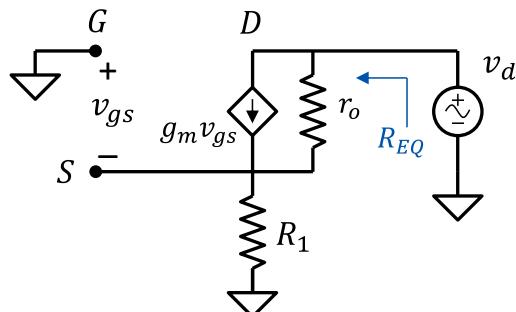
DATI: $k_n = 2 \text{ mA/V}^2$, $V_{TN} = 1 \text{ V}$, $\lambda_n = 0.01 \text{ V}^{-1}$, $V_D = 5 \text{ V}$, $V_{REF} = 3 \text{ V}$

Dato il circuito in figura:

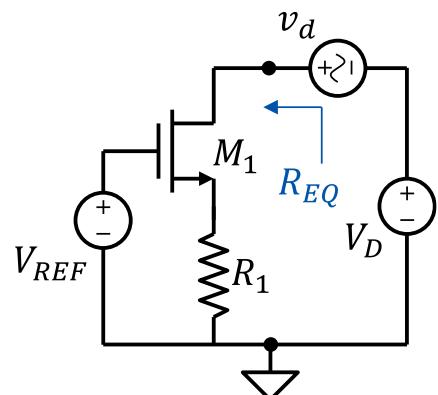
1. Calcolare il punto di polarizzazione di M_1 e il valore di R_1 sapendo che la corrente attraverso M_1 è $I_{DS1} = 1 \text{ mA}$
2. Disegnare il circuito ai piccoli segnali.
3. Calcolare la resistenza equivalente al piccolo segnale come mostrato in figura.

Soluzione

1. $V_{GS} = 2 \text{ V}$, $V_{DS} = 4 \text{ V}$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$
2. Circuito ai piccoli segnali ($g_m = 2 \text{ mS}$, $r_o = 100 \text{ k}\Omega$):



$$3. R_{EQ} = 301 \text{ k}\Omega$$



Esercizio 5.6

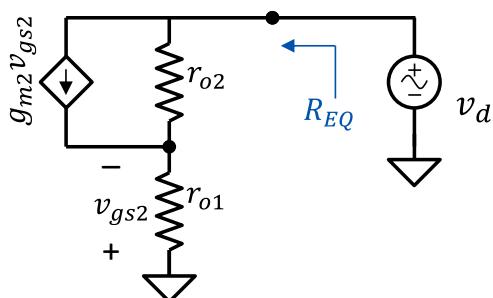
DATI: $k_n = 1 \text{ mA/V}^2$, $V_{TN} = 1 \text{ V}$, $\lambda_n = 0.01 \text{ V}^{-1}$, $V_D = 6 \text{ V}$, $V_{REF} = 2 \text{ V}$

Dato il circuito in figura:

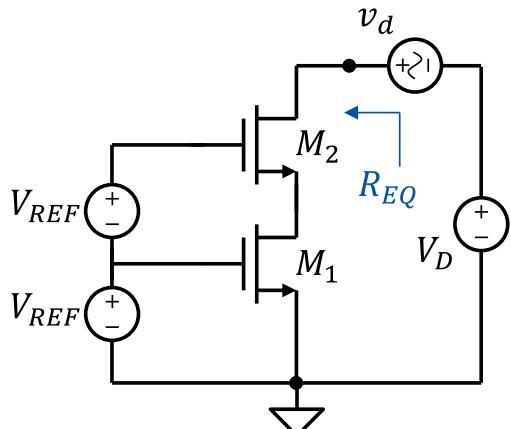
1. Calcolare il punto di polarizzazione di M_1 e M_2
2. Disegnare il circuito ai piccoli segnali.
3. Calcolare la resistenza equivalente al piccolo segnale come mostrato in figura.

Soluzione

1. M_1 : $V_{GS1} = 2 \text{ V}$, $V_{DS1} = 2 \text{ V}$
 M_2 : $V_{GS2} = 2 \text{ V}$, $V_{DS2} = 4 \text{ V}$
2. Circuito ai piccoli segnali ($g_{m2} = 1 \text{ mS}$, $r_{o1} = r_{o2} = 200 \text{ k}\Omega$):



$$3. R_{EQ} = 40.4 \text{ M}\Omega$$

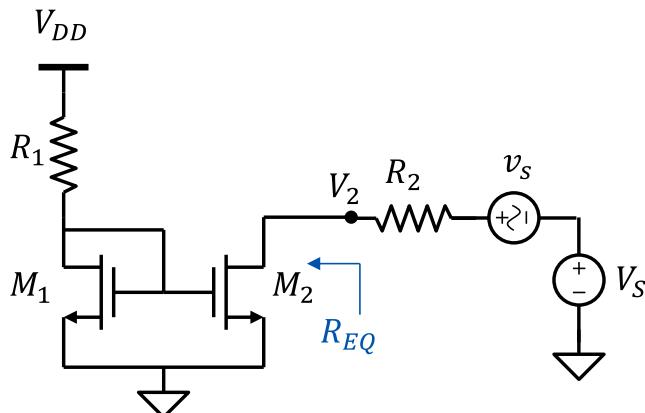


Esercizio 5.7

DATI: $k_n = 2 \text{ mA/V}^2$, $V_{TN} = 1.5 \text{ V}$, $\lambda_n = 0.01 \text{ V}^{-1}$, $V_{DD} = 10 \text{ V}$, $V_S = 6 \text{ V}$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$

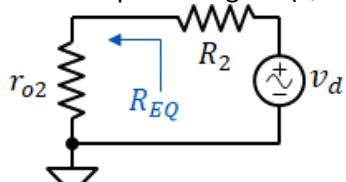
Dato il circuito in figura:

1. Sapendo che la tensione sulla resistenza R_1 è 8V, calcolare il punto di polarizzazione dei MOS.
2. Disegnare il circuito ai piccoli segnali.
3. Calcolare la resistenza equivalente al piccolo segnale come mostrato in figura.



Soluzione

1. M_1 : $V_{GS1} = V_{DS1} = 2 \text{ V}$
 M_2 : $V_{GS2} = 2 \text{ V}$, $V_{DS2} = 3.5 \text{ V}$
2. Circuito ai piccoli segnali ($r_{o2} = 400 \text{ k}\Omega$):



3. $R_{EQ} = 400 \text{ k}\Omega$

Esercizio 5.8

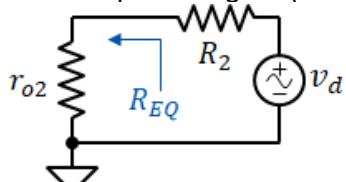
DATI: $k_p = 0.4 \text{ mA/V}^2$, $V_{TP} = -1 \text{ V}$, $\lambda_p = 0.01 \text{ V}^{-1}$, $V_{DD} = 10 \text{ V}$, $V_S = 6 \text{ V}$, $R_2 = 15 \text{ k}\Omega$

Dato il circuito in figura:

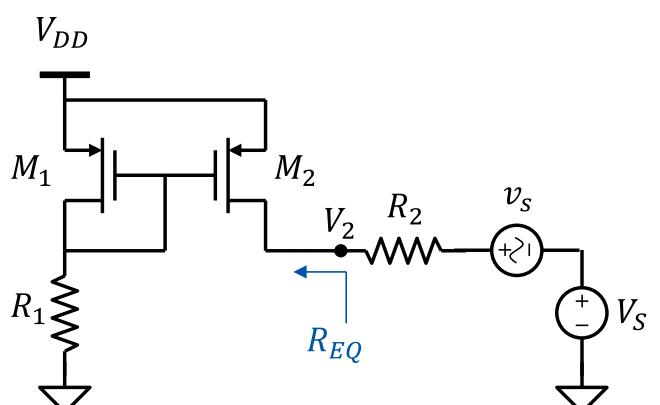
1. Calcolare il valore di R_1 affinché la corrente attraverso M_2 sia $I_{DS2} = 0.2 \text{ mA}$
2. Disegnare il circuito ai piccoli segnali.
3. Calcolare la resistenza equivalente al piccolo segnale come mostrato in figura.

Soluzione

1. $R_1 = 40 \text{ k}\Omega$
2. Circuito ai piccoli segnali ($r_{o2} = 500 \text{ k}\Omega$):



3. $R_{EQ} = 500 \text{ k}\Omega$



Esercizio 5.9

DATI: $k_n = 1 \text{ mA/V}^2$, $V_{TN} = 1 \text{ V}$, $\lambda_n = 0.01 \text{ V}^{-1}$,

$V_{SS} = -12 \text{ V}$, $I_{REF} = 2 \text{ mA}$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$

Dato il circuito in figura:

1. Calcolare la polarizzazione di tutti i MOS
2. Disegnare il circuito ai piccoli segnali.
3. Calcolare la resistenza equivalente al piccolo segnale come mostrato in figura.

Soluzione

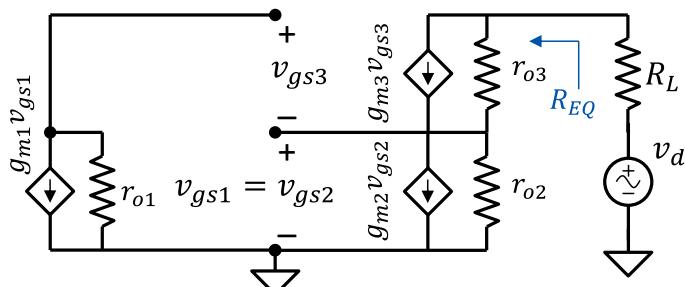
1. M_1 : $V_{GS1} = 3 \text{ V}$, $V_{DS1} = 6 \text{ V}$

M_2 : $V_{GS2} = 3 \text{ V}$, $V_{DS2} = 3 \text{ V}$

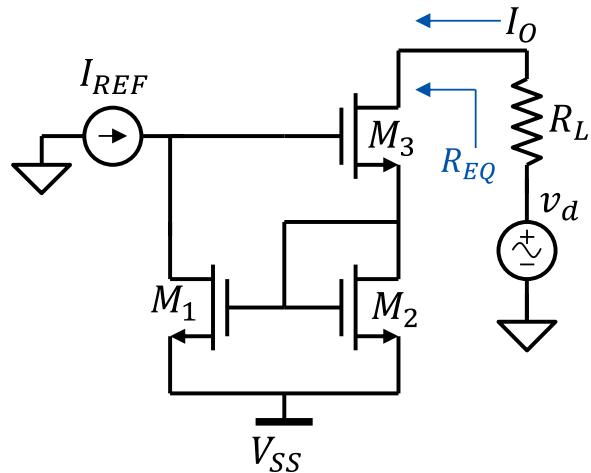
M_3 : $V_{GS3} = 3 \text{ V}$, $V_{DS3} = 5 \text{ V}$

2. Circuito ai piccoli segnali

($g_{m1}=g_{m3}=2 \text{ mS}$, $r_{o1}=r_{o3}=50 \text{ k}\Omega$, $r_2=495 \text{ }\Omega$):



3. $R_{EQ} = 5.05 \text{ M}\Omega$



Esercizio 5.10

DATI: $k_n = 2 \text{ mA/V}^2$, $V_{TN} = 0.5 \text{ V}$, $\lambda_n = 0.01 \text{ V}^{-1}$,

$V_{DD} = 5 \text{ V}$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$

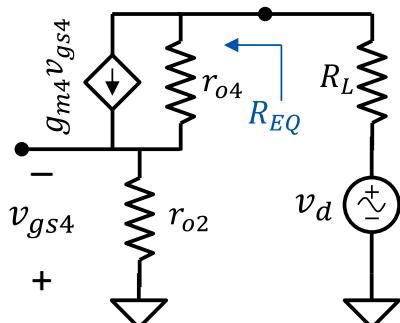
Dato il circuito in figura:

1. Calcolare il valore della resistenza R_1 affinché risulti $I_L = 0.25 \text{ mA}$.
2. Disegnare il circuito ai piccoli segnali.
3. Calcolare la resistenza equivalente al piccolo segnale come mostrato in figura.

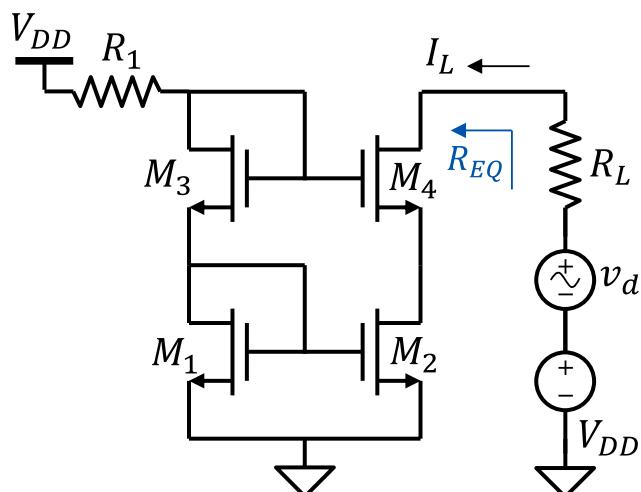
Soluzione

1. $R_1 = 12 \text{ k}\Omega$

2. Circuito ai piccoli segnali ($g_{m4} = 1 \text{ mS}$, $r_{o2}=r_{o4}=400 \text{ k}\Omega$):



3. $R_{EQ} = 160.8 \text{ M}\Omega$



Esercizio 5.11

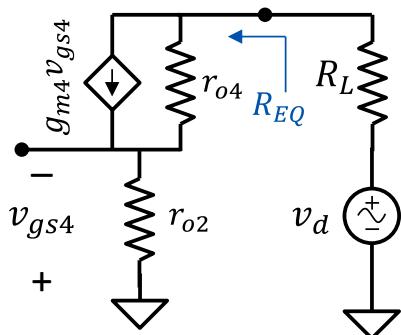
DATI: $k_p = 6\text{mA/V}^2$, $V_{TP} = -1\text{V}$, $\lambda_p = 0.01\text{V}^{-1}$, $V_{DD} = 9\text{V}$, $R_1 = 8\text{k}\Omega$, $R_L = 5\text{k}\Omega$

Dato il circuito in figura:

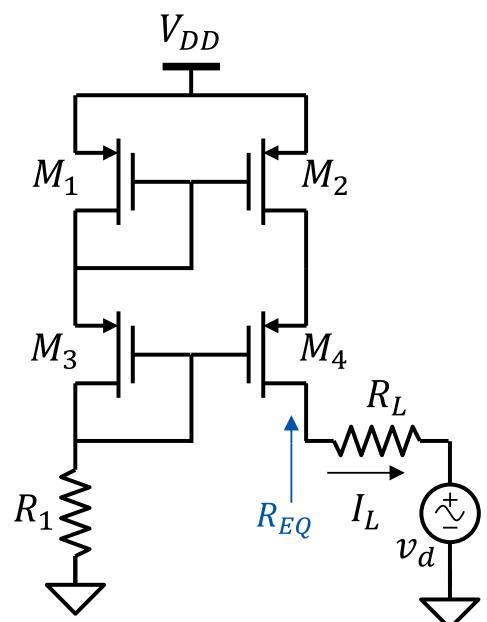
1. Trovare la polarizzazione di tutti i MOSFET e il valore della corrente I_L .
2. Disegnare il circuito ai piccoli segnali.
3. Calcolare la resistenza equivalente al piccolo segnale come mostrato in figura.

Soluzione

1. $I_L = 0.75\text{mA}$
 M_1 : $V_{GS1} = -1.5\text{V}$, $V_{DS1} = -1.5\text{V}$
 M_2 : $V_{GS2} = -1.5\text{V}$, $V_{DS2} = -1.5\text{V}$
 M_3 : $V_{GS3} = -1.5\text{V}$, $V_{DS3} = -1.5\text{V}$
 M_4 : $V_{GS4} = -1.5\text{V}$, $V_{DS4} = -3.75\text{V}$
2. Circuito ai piccoli segnali ($g_{m4} = 3\text{mS}$, $r_{o2} = r_{o4} = 400\text{k}\Omega$):



3. $R_{EQ} = 408.8\text{M}\Omega$



6 Amplificatori: stadi elementari

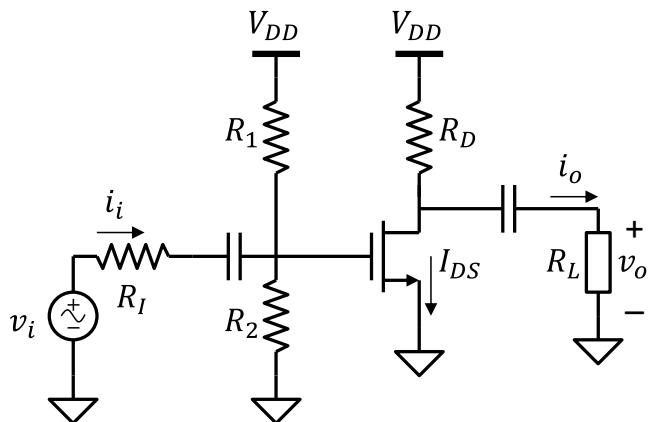
Esercizio 6.1

DATI: $V_{DD} = 12V$, $R_I = 1k\Omega$, $R_1 = 300k\Omega$, $R_L = 1k\Omega$

Parametri del MOSFET: $V_{TN} = 1V$, $\lambda_n = 0$;

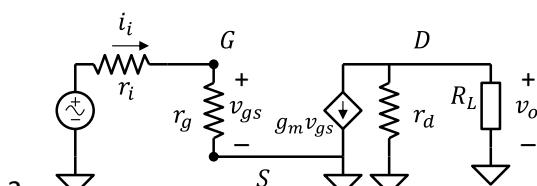
Dato il circuito in figura:

- Calcolare le resistenze R_2 e R_D sapendo che il punto di polarizzazione del MOSFET è: $V_{GS}=4V$, $V_{DS}=6V$, e $I_{DS} = 2mA$.
- Disegnare il modello ai piccoli segnali del circuito.
- Calcolare le resistenze di ingresso e di uscita dello stadio amplificatore.
- Calcolare il guadagno di tensione dall'ingresso v_i all'uscita v_o .



Soluzione

1. $R_2 = 150k\Omega$, $R_D = 3k\Omega$



2. $R_{IN} = 100k\Omega$, $R_{OUT} = 3k\Omega$

4. $A_v = -0.99$

Esercizio 6.2

DATI: $V_{SS} = 5V$, $V_{DD} = -5V$, $R_G = 100k\Omega$

Parametri del MOSFET: $k_p = 1.6mA/V^2$, $V_{TP} = -1V$, $\lambda_p = 0$;

Dato il circuito in figura:

- Trovare i valori di R_S e R_D tali che $I_{DS} = 0.8mA$ e $V_{DS} = 2V_{GS}$.
- Calcolare la resistenza di ingresso e di uscita dello stadio amplificatore al piccolo segnale
- Calcolare il guadagno di tensione dall'ingresso v_i all'uscita v_o .
- Disegnare il modello a doppio bipolo per l'amplificatore.

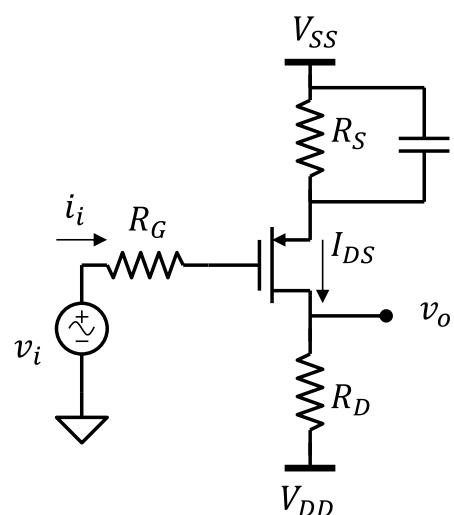
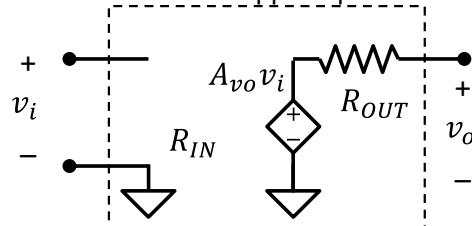
Soluzione

1. $R_S = 3.75k\Omega$, $R_{OUT} = 3.75k\Omega$

2. $R_{IN} = \infty$, $R_{OUT} = 3.75k\Omega$

3. $A_v = -6$

4. Modello elettrico a doppio bipolo:

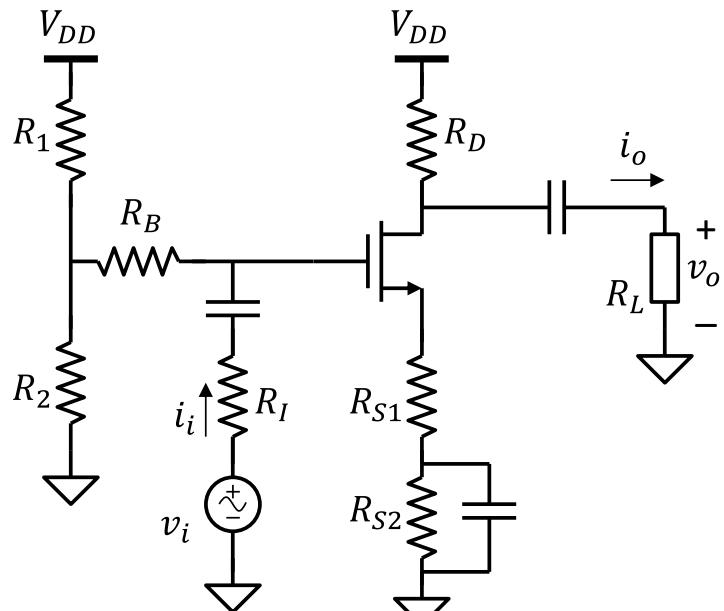


Esercizio 6.3

DATI: $V_{DD}=36V$, $R_I = 100k\Omega$, $R_B = 1M\Omega$, $R_D = 6k\Omega$, $R_{S1} = 200\Omega$, $R_L = 4k\Omega$, $k_n = 0.4mA/V^2$, $V_{TN}=5V$

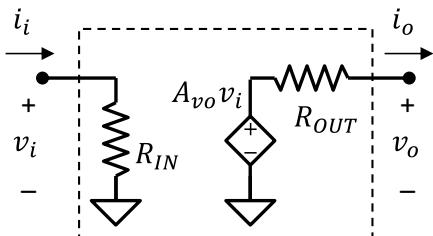
Dato il circuito in figura:

- Trovare le resistenze R_1 , R_2 e R_{S2} affinché il MOSFET abbia $I_{DS} = 3mA$ e $V_{DS} = 12V$. Scegliere R_1 e R_2 in modo che $R_1 \parallel R_2 = R_B$.
- Calcolare il guadagno di tensione e le resistenze di ingresso e uscita dell'amplificatore.
- Disegnare il modello a doppio bipolo dell'amplificatore



Soluzione

- $R_1 = 2.42M\Omega$, $R_2 = 1.7M\Omega$, $R_{S2} = 1.8k\Omega$
- $R_{IN} = 2M\Omega$, $R_{OUT} = 6k\Omega$, $A_v = -2.7$
- Modello a doppio bipolo:



Esercizio 6.4

DATI: $V_{DD} = 10V$; $V_{SS} = -10V$; $R_2 = 100k\Omega$, $R_D = 10k\Omega$, $R_I = 25k\Omega$, $R_L = 90k\Omega$; $k_p = 0.5mA/V^2$; $V_{TP} = -3V$

Dato il circuito in figura calcolare:

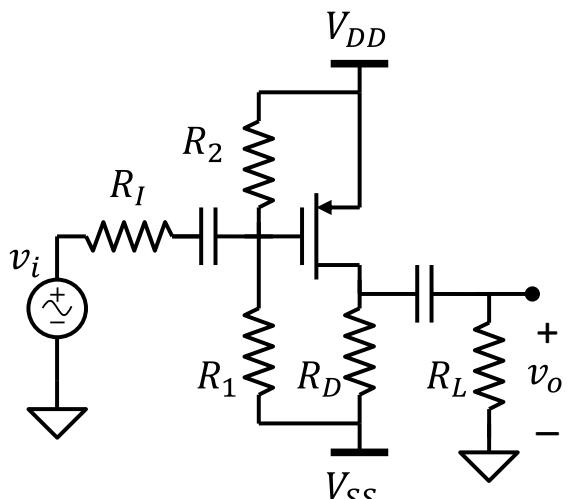
- Il valore della resistenza R_1 affinché la corrente del transistor sia $I_{DS} = 1mA$.
- Il punto di lavoro del transistor.

Dall'analisi al piccolo segnale, trovare:

- Le resistenze di ingresso e di uscita
- Il guadagno di tensione A_v dal segnale v_i a v_o

Soluzione

- $R_1 = 300 k\Omega$;
- $V_{GS} = -5V$, $V_{DS} = -10V$;
- $R_{IN} = 75 k\Omega$, $R_{OUT} = 10 k\Omega$
- $A_v = -6.75$;



Esercizio 6.5

DATI: $V_{DD} = 20V$, $V_{SS} = -10 V$;
 $R_1 = 500k\Omega$, $R_2 = 100k\Omega$,
 $R_D = 12k\Omega$, $R_S = 1k\Omega$, $R_i = 10k\Omega$, $R_L = 100k\Omega$;
 $k_p = 1mA/V^2$, $V_{TP} = -1V$;

Dato il circuito in figura, calcolare:

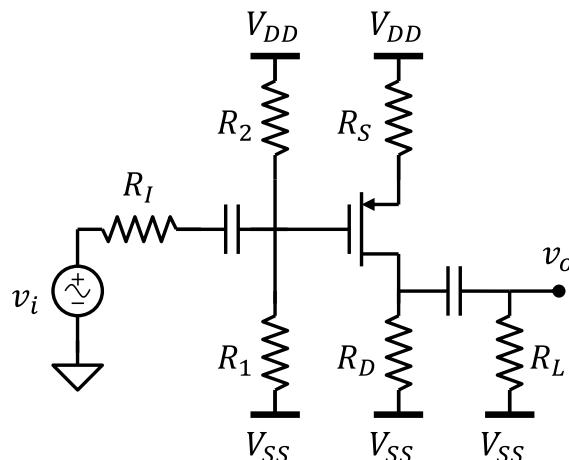
- Il punto di lavoro del transistor

Dall'analisi ai piccoli segnali trovare:

- La resistenza di ingresso e di uscita
- Guadagno di tensione A_v

Soluzione

- $V_{GS} = -3V$, $V_{DS} = -4V$;
- $R_{IN} = 83.3 k\Omega$, $R_{OUT} = 12 k\Omega$
- $A_v = -6.38$;



Esercizio 6.6

DATI: $V_{DD} = 12V$, $R_i = 1k\Omega$, $R_1 = 300k\Omega$, $R_2 = 100k\Omega$,
 $R_S = 1k\Omega$, $R_L = 1k\Omega$

Parametri del MOSFET: $k_p = 3mA/V^2$, $V_{TP} = -1V$;

Dato il circuito in figura:

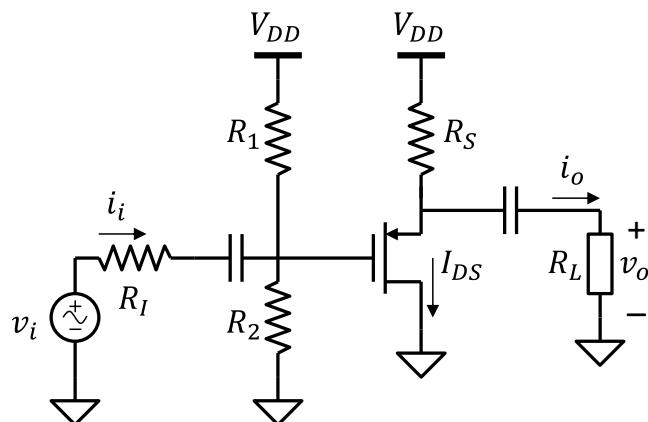
- Calcolare la polarizzazione del MOSFET.

Dal circuito ai piccoli segnali:

- Calcolare le resistenze di ingresso e di uscita dello stadio amplificatore.
- Calcolare il guadagno di tensione dall'ingresso v_i all'uscita v_o .

Soluzione

- $V_{GS} = -3V$, $V_{DS} = -6V$, $I_{DS} = 6mA$
- $R_{IN} = 75k\Omega$, $R_{OUT} = 143\Omega$
- $A_v = 0.75$



Esercizio 6.7

DATI: $V_{DD} = 12V$, $R_i = 1k\Omega$, $R_1 = 200k\Omega$, $R_L = 1k\Omega$

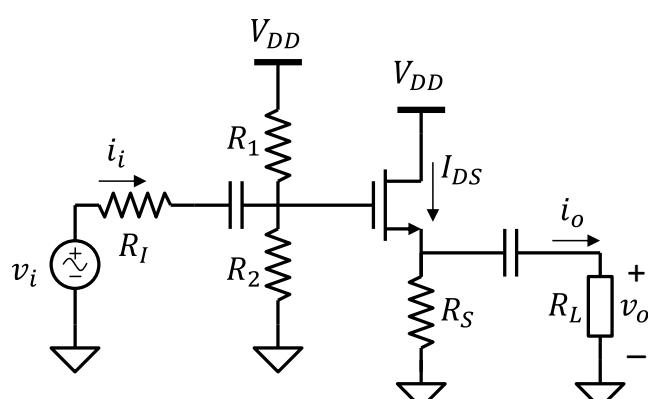
Tensione di soglia del MOS $V_{TN} = 1V$;

Dato il circuito in figura in cui il MOS ha polarizzazione $V_{GS} = 2V$, $V_{DS} = 6V$, $I_{DS} = 2mA$:

- Trovare i valori delle resistenze R_2 e R_S .
- Calcolare le resistenze di ingresso e di uscita dello stadio amplificatore.
- Calcolare il guadagno di tensione dall'ingresso v_i all'uscita v_o .

Soluzione

- $R_2 = 400k\Omega$, $R_S = 3k\Omega$
- $R_{IN} = 133.3k\Omega$, $R_{OUT} = 231\Omega$
- $A_v = -0.75$



Esercizio 6.8

DATI: $R_I = 100\Omega$, $R_L = 20k\Omega$;
 $V_{DD} = 4V$, $V_{TP} = -0.5V$, $k_p = 2mA/V^2$

Dato il circuito in figura, calcolare:

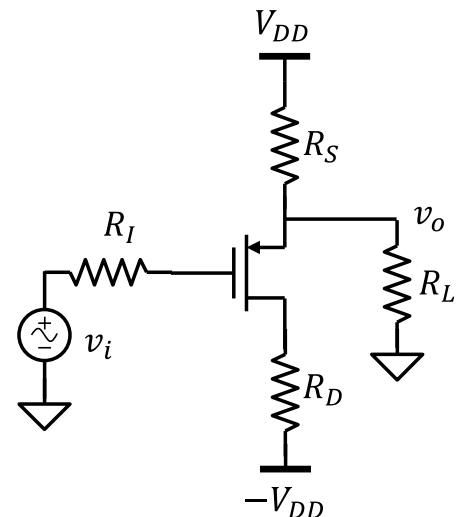
- Il valore delle resistenze R_S e R_D sapendo che il modulo della tensione drain source è 4V e la corrente è $I_{DS} = 0.25mA$.

Dall'analisi ai piccoli segnali, trovare:

- Le resistenze di ingresso e uscita
- Il guadagno di tensione $A_v = v_o/v_i$

Soluzione

- $R_S = 10k\Omega$, $R_D = 4k\Omega$
- $R_{IN} = \infty$, $R_{OUT} = 909\Omega$
- $A_v = 0.87$



Esercizio 6.9

DATI: $V_{DD} = 20V$; $R_2 = 280k\Omega$, $R_S = 2k\Omega$, $R_L = 15 k\Omega$;
 $k_p = 2mA/V^2$, $V_{TP} = 2V$.

Dato il circuito in figura, calcolare:

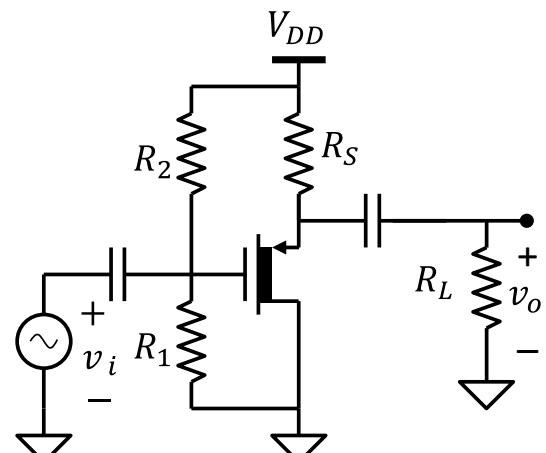
- Il valore della resistenza R_1 per ottenere $I_{DS} = 4mA$.
- Il punto di lavoro del transistor.

Dall'analisi a piccolo segnale trovare:

- Le resistenze di ingresso e di uscita
- I guadagni di tensione A_v e corrente A_i

Soluzione

- $R_1 = 420 k\Omega$;
- $V_{GS} = 0V$, $V_{DS} = -12V$;
- $R_{IN} = 168k\Omega$, $R_{OUT} = 222\Omega$;
- $A_v = 0.876$



Esercizio 6.10

DATI: $R_1 = 20k\Omega$, $R_2 = 20k\Omega$, $R_D = 3.7k\Omega$, $R_L = 10k\Omega$; $V_{DD} = 10V$,
 $V_{SS} = -5V$; $V_{TN} = 0.5V$, $k_n = 1mA/V^2$

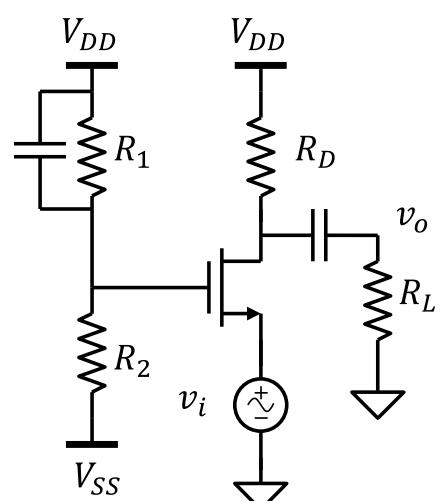
Dato il circuito in figura, calcolare:

- Il punto di lavoro del transistor (I_{DS} , V_{DS} , V_{GS})
- Dall'analisi ai piccoli segnali, trovare:

- Le resistenze di ingresso e uscita
- Il guadagno di tensione $A_v = v_o/v_i$

Soluzione

- $I_{DS} = 2mA$, $V_{DS} = 2.6V$, $V_{GS} = 2.5 V$
- $R_{IN} = 500 \Omega$, $R_{OUT} = 3.7 k\Omega$
- $A_v = 5.4$



Esercizio 6.11

DATI: $R_1 = 55\text{k}\Omega$, $R_L = 24\text{k}\Omega$; $V_{DD} = 5\text{V}$, $V_{TN} = 1\text{V}$, $k_n = 4\text{mA/V}^2$

Dato il circuito in figura, calcolare:

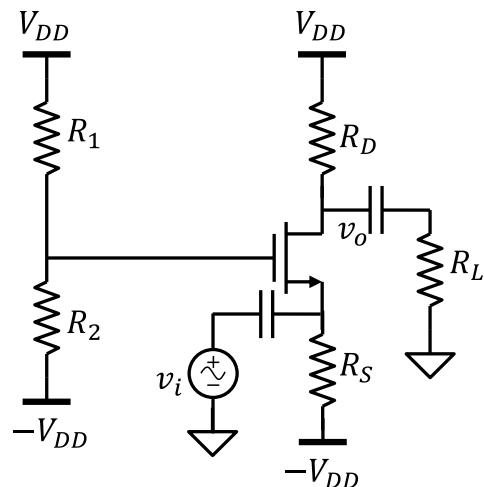
- Il valore di R_2 , R_S e R_D affinché risulti $v_o = 1\text{V}$, $I_{DS} = 0.5\text{mA}$ e $V_{DS} = 2\text{V}_{GS}$.

Dall'analisi ai piccoli segnali, trovare:

- Le resistenze di ingresso e uscita
- Il guadagno di tensione $A_v = v_o/v_i$

Soluzione

- $R_S = 6\text{k}\Omega$, $R_D = 8\text{k}\Omega$, $R_2 = 45\text{k}\Omega$
- $R_{IN} = 462\Omega$, $R_{OUT} = 8\text{k}\Omega$
- $A_v = 12$



Esercizio 6.12

DATI: $V_{DD} = 12\text{V}$, $V_{SS} = -12\text{V}$; $R_1 = 150\text{k}\Omega$, $R_2 = 750\text{k}\Omega$, $R_D = 5\text{k}\Omega$, $R_I = 500\Omega$, $R_L = 5\text{k}\Omega$; $k_p = 0.6\text{mA/V}^2$, $V_{TP} = -6\text{V}$

Dato il circuito in figura calcolare:

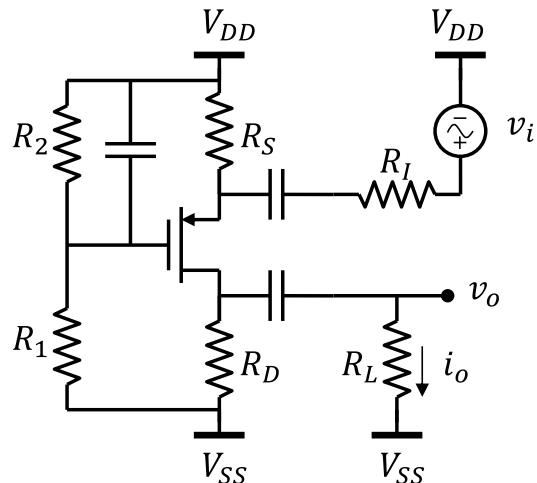
- Il valore della resistenza R_S affinché il potenziale del source del MOSFET sia $V_S = 0\text{V}$
- Il punto di lavoro del transistor

Dall'analisi del circuito ai piccoli segnali, trovare:

- Le resistenze di ingresso e di uscita
- Il guadagno di tensione A_v .

Soluzione

- $R_S = 10\text{k}\Omega$;
- $V_{GS} = -8\text{V}$, $V_{DS} = -6\text{V}$;
- $R_{IN} = 769\Omega$, $R_{OUT} = 5\text{k}\Omega$;
- $A_v = 1.82$;



Esercizio 6.13

DATI: $V_{DD} = 20\text{V}$, $V_B = 15\text{V}$; $R_1 = R_2 = 100\text{k}\Omega$, $R_I = 50\text{k}\Omega$, $R_L = 75\text{k}\Omega$

M_1 : $k_n = 4\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 4\text{V}$, $\lambda_n = 0\text{V}^{-1}$

M_2 : $k_p = 1\text{mA/V}^2$, $V_{TP} = -1\text{V}$, $\lambda_p = 0.001\text{V}^{-1}$

Dato il circuito in figura, calcolare:

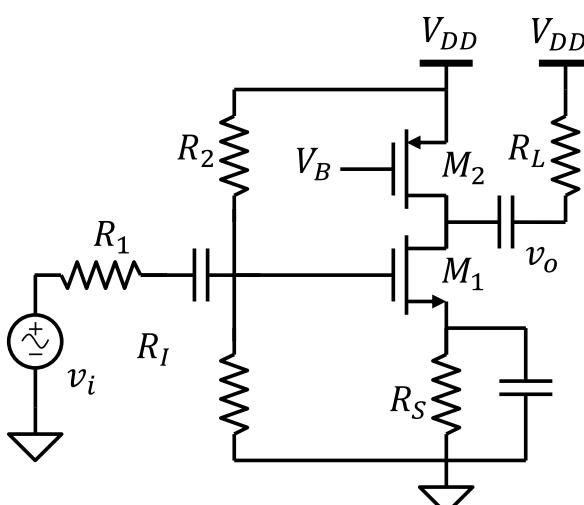
- Il valore di R_S affinché M_2 abbia $V_{DS2} = -10\text{V}$
- il punto di lavoro dei transistor.

Dal modello ai piccoli segnali trovare:

- Le resistenze di ingresso e di uscita
- Il guadagno di tensione $A_v = v_o/v_i$

Soluzione

- $R_S = 500\Omega$;
- $V_{GS1} = V_{DS1} = 6\text{V}$, $V_{GS2} = -5\text{V}$, $V_{DS2} = -10\text{V}$;
- $R_{IN} = 50\text{k}\Omega$, $R_{OUT} = 125\text{k}\Omega$;
- $A_i = -187.5$



Esercizio 6.14

DATI: $V_{DD} = 15V$, $V_{SS} = -15V$, $R_G = 100k\Omega$, $R_D = 2k\Omega$, $R_I = 100\Omega$, $R_L = 1k\Omega$;

Parametri di M_1 : $k_{n1} = 2.5mA/V^2$, $V_{TN}=5V$ $\lambda_n=0V^{-1}$;

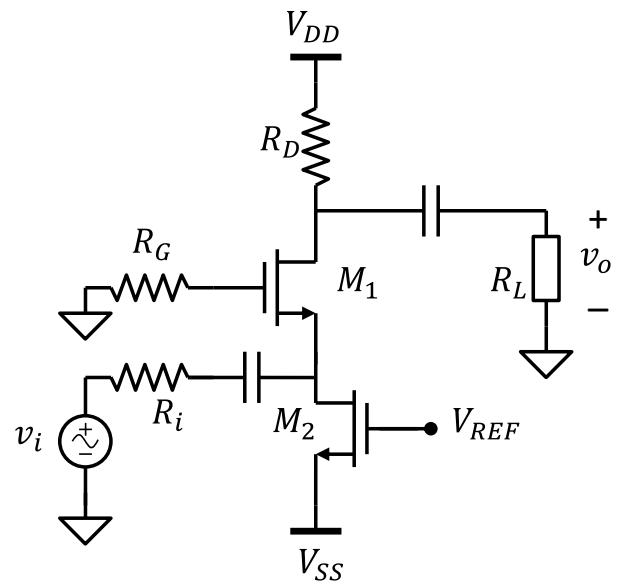
Parametri di M_2 : $k_{n2} = 2.5mA/V^2$, $V_{TN}=5V$ $\lambda_n=0.01V^{-1}$;

Dato il circuito in figura:

1. Trovare il valore della tensione V_{REF} in modo tale che la corrente di M_1 sia $I_{DS1} = 5mA$.
2. Trovare il punto di polarizzazione dei MOS.
3. Determinare la potenza erogata dai generatori V_{DD} e V_{SS} , in condizioni DC.
4. Determinare la potenza dissipata nei due MOSFET e nelle resistenze R_G e R_D in condizioni DC
5. Disegnare il modello ai piccoli segnali del circuito e calcolare le resistenze di ingresso e uscita e il guadagno di tensione da v_i a v_o .

Soluzione

1. $V_{REF} = -8V$;
2. M_1 : $V_{GS1} = 7V$, $V_{DS1} = 12V$, $I_{DS1} = 5mA$;
 M_2 : $V_{GS2} = 7V$, $V_{DS2} = 8V$, $I_{DS2} = 5mA$;
3. $P_{DD} = 75mW$; $P_{SS} = 75mW$;
4. $P_G = 0$; $P_D = 50mW$; $P_{M1} = 60mW$ $P_{M2}=40mW$;
5. $R_{IN} = 198\Omega$, $R_{OUT} = 2k\Omega$, $A_v = 2.215$;



Esercizio 6.15

DATI: $V_{DD} = 10V$, $V_{SS} = -10V$, $R_I = 15k\Omega$, $R_L = 1k\Omega$;

M_1 : $k_{n1} = 5mA/V^2$, $V_{TN}=2V$ $\lambda_n=0V^{-1}$;

M_2 : $k_{n2} = 5mA/V^2$, $V_{TN}=2V$ $\lambda_n=0.01V^{-1}$;

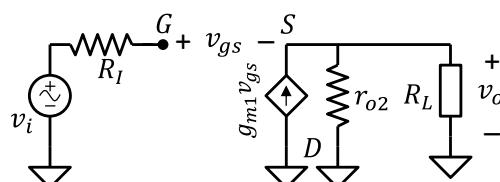
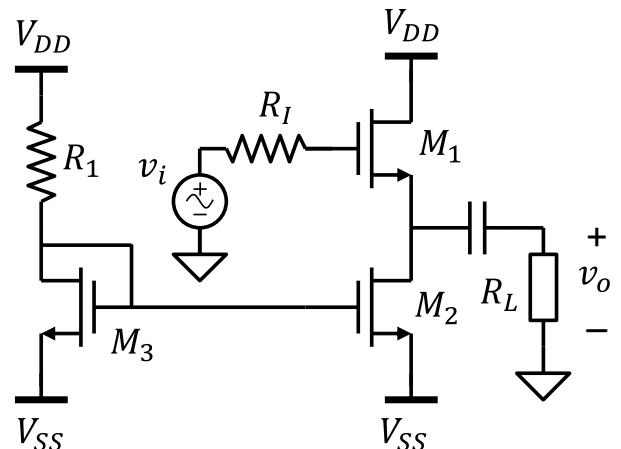
M_3 : $k_{n3} = 0.5mA/V^2$, $V_{TN}=2V$ $\lambda_n=0V^{-1}$;

Dato il circuito in figura:

1. Trovare il valore di R_1 in modo tale che la corrente di M_1 sia $I_{DS1} = 2.5mA$.
2. Trovare il punto di polarizzazione di tutti i MOS.
3. Disegnare il modello ai piccoli segnali.
4. Calcolare le resistenze di ingresso e uscita
5. Calcolare il guadagno di tensione da v_i a v_o .

Soluzione

1. $R_1 = 68k\Omega$;
2. M_1 : $V_{GS1} = 3V$, $V_{DS1} = 13V$;
 M_2 : $V_{GS2} = 3V$, $V_{DS2} = 7V$;
 M_3 : $V_{GS3} = 3V$, $V_{DS3} = 3V$;
3. Modello ai piccolo segnali:



4. $R_{IN} = \infty$, $R_{OUT} = 199\Omega$;
5. $A_v = 0.83$;

Esercizio 6.16

DATI: $V_{DD} = 5V$, $R_1 = 35k\Omega$, $R_I = 15k\Omega$, $R_L = 2k\Omega$;

M_1 : $k_{n1} = 1.6mA/V^2$, $V_{TN1} = 0.5V$, $\lambda_{n1} = 0V^{-1}$;

M_2 : $k_{n2} = 8mA/V^2$, $V_{TN2} = 0.5V$, $\lambda_{n2} = 0.01V^{-1}$;

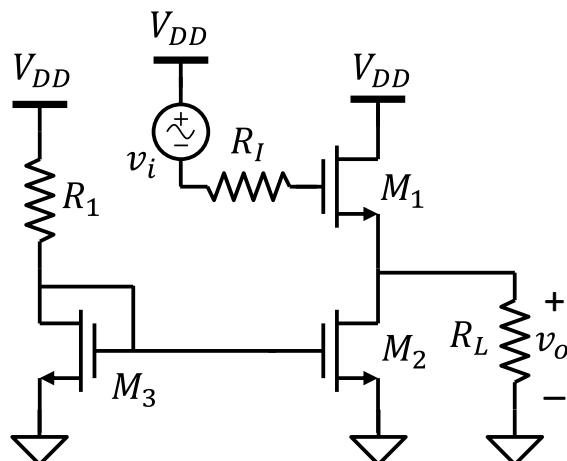
M_3 : $k_{p3} = 0.2mA/V^2$, $V_{TP3} = 0.5V$, $\lambda_{p3} = 0V^{-1}$;

Dato il circuito in figura:

1. Calcolare la corrente attraverso M_3 .
2. Determinare il valore di V_O in condizioni DC
3. Trovare il punto di polarizzazione di tutti i MOSET.
4. Calcolare le resistenze di ingresso e uscita
5. Calcolare il guadagno di tensione da v_i a v_o .

Soluzione

1. $I_{DS3} = 0.1mA$;
2. $V_O = 2V$
3. M_1 : $V_{GS1} = 3V$, $V_{DS1} = 3V$;
 M_2 : $V_{GS2} = 1.5V$, $V_{DS2} = 2V$;
 M_3 : $V_{GS3} = 1.5V$, $V_{DS3} = 1.5V$;
4. $R_{IN} = \infty$, $R_{OUT} = 247.5\Omega$;
5. $A_v = 0.881$;



Esercizio 6.17

DATI: $V_{DD} = 25V$, $V_{B2} = 3V$, $V_{B3} = 20V$; $R_1 = 120k\Omega$,

$R_2 = 280k\Omega$, $R_I = 5k\Omega$, $R_L = 250k\Omega$

M_1 : $k_{n1} = 4.4mA/V^2$, $V_{TN1} = 2V$, $\lambda_{n1} = 0V^{-1}$

M_2 : $k_{n2} = 1.1mA/V^2$, $V_{TN2} = 1V$, $\lambda_{n2} = 0.02V^{-1}$

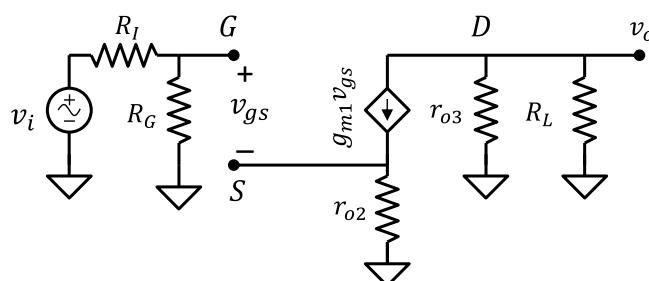
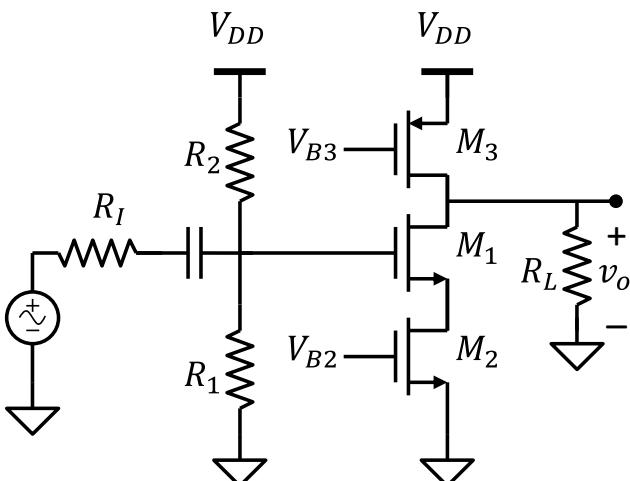
M_3 : $k_{p3} = 0.5mA/V^2$, $V_{TP3} = -2V$, $\lambda_{p3} = 0.001V^{-1}$

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. Il punto di lavoro dei transistor
2. Disegnare il circuito ai piccoli segnali
3. Calcolare le resistenze di ingresso e di uscita
4. Calcolare il guadagno di tensione A_v

Soluzione

1. M_1 : $V_{GS1} = 3V$, $V_{DS1} = 8V$;
 M_2 : $V_{GS2} = 3V$, $V_{DS2} = 4.5V$,
 M_3 : $V_{GS3} = -5V$, $V_{DS3} = -12.5V$;
2. Modello ai piccoli segnali



3. $R_{IN} = 84 k\Omega$, $R_{OUT} = 444 k\Omega$;
4. $A_v = -6.6$

Esercizio 6.18

DATI: $V_{DD} = 20V$, $V_{B2} = 5V$, $R_L = 500\Omega$, $R_1 = 200k\Omega$, $R_2 = 800k\Omega$, $R_I = 16k\Omega$

$$\begin{aligned} M_1: k_{n1} &= 20mA/V^2, & V_{TN1} &= 5.9V, & \lambda_{n1} &= 0V^{-1} \\ M_2: k_{n2} &= 0.2mA/V^2, & V_{TN2} &= 4V, & \lambda_{n2} &= 0.02 V^{-1} \\ M_3: k_{p3} &= 0.2mA/V^2, & V_{TP3} &= -4V, & \lambda_{p3} &= 0V^{-1} \end{aligned}$$

Dato il circuito in figura, calcolare:

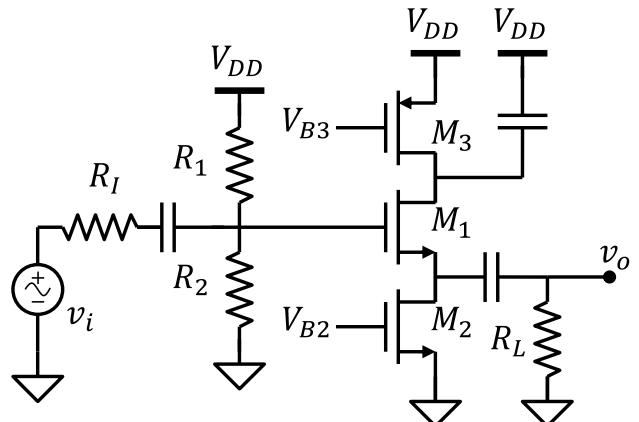
- Calcolare il valore corretto di V_{B3} affinché tutti i MOS lavorino in saturazione
- Il punto di lavoro dei transistor, sapendo che il MOSFET M_3 ha $V_{DS3} = -5V$.

Dall'analisi del modello ai piccoli segnali, calcolare:

- Le resistenze di ingresso e di uscita
- Il guadagno di corrente A_i

Soluzione

- $V_{B3} = 15V$;
- $M_1: V_{GS1} = 6V, V_{DS1} = 5V$;
 $M_2: V_{GS2} = 5V, V_{DS2} = 10V$;
 $M_3: V_{GS3} = V_{DS3} = -5V$;
- $R_{IN} = 160k\Omega, R_{OUT} = 500\Omega$;
- $A_v = 0.454$



Esercizio 6.19

DATI: $V_{SS} = 10V$, $V_{DD} = -10V$; $R_1 = 120k\Omega$, $R_2 = 80k\Omega$, $k_p = 2.5mA/V^2$, $V_{TP} = -4V$, $\lambda_p = 0.01V^{-1}$.

Dato il circuito in figura calcolare:

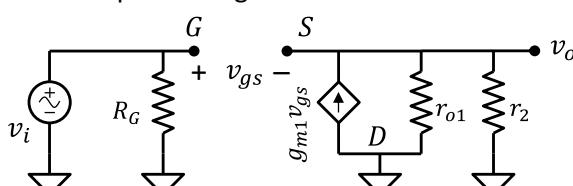
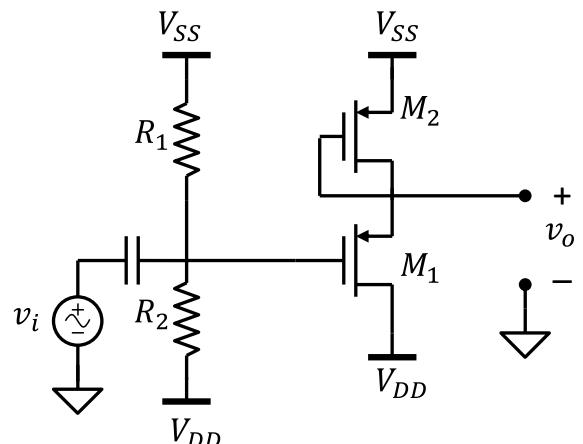
- Trovare la polarizzazione dei MOS.
- Disegnare il circuito al piccolo segnale

Dall'analisi del circuito ai piccoli segnali, trovare:

- Le resistenze di ingresso e di uscita
- Il guadagno di tensione A_v .

Soluzione

- $M_1: V_{GS1} = -6V, V_{DS1} = -14V$
 $M_2: V_{GS2} = V_{DS2} = -6V$;
- Circuito al piccolo segnale



- $R_{IN} = 48k\Omega, R_{OUT} = 196\Omega$;
- $A_v = 0.495$;

Esercizio 6.20

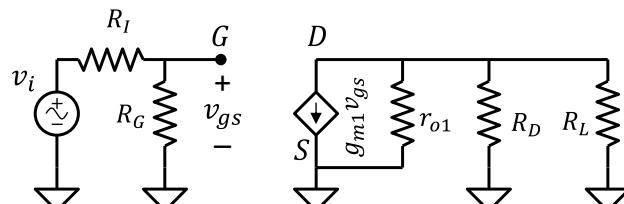
DATI: $V_{SS} = -5V$, $V_{DD} = 5V$; $R_1 = 100k\Omega$, $R_2 = 100k\Omega$, $R_D = 3k\Omega$, $R_I = 5k\Omega$, $R_L = 20k\Omega$
 M_1 : $k_{n1} = 2mA/V^2$, $V_{TN1} = 1V$, $\lambda_n = 0.02V^{-1}$.
 M_2 : $k_{n2} = 0.5mA/V^2$, $V_{TN2} = 1V$, $\lambda_n = 0.02V^{-1}$.

Dato il circuito in figura calcolare:

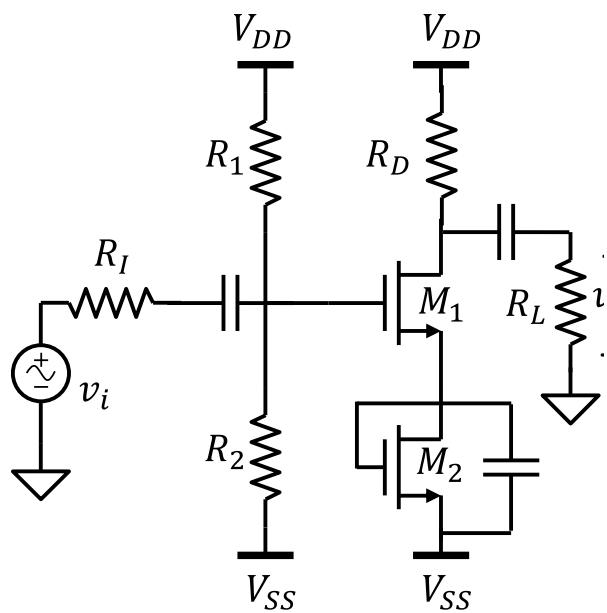
1. Trovare la polarizzazione dei MOS.
 2. Disegnare il circuito al piccolo segnale
- Dall'analisi del circuito ai piccoli segnali, trovare:
3. Le resistenze di ingresso e di uscita
 4. Il guadagno di tensione A_v .

Soluzione

1. M_1 : $V_{GS1} = 2V$, $V_{DS1} = 4V$
 M_2 : $V_{GS2} = V_{DS2} = 3V$;
2. Circuito al piccolo segnale



3. $R_{IN} = 50k\Omega$, $R_{OUT} = 2.83k\Omega$;
4. $A_v = -4.5$;



Esercizio 6.21

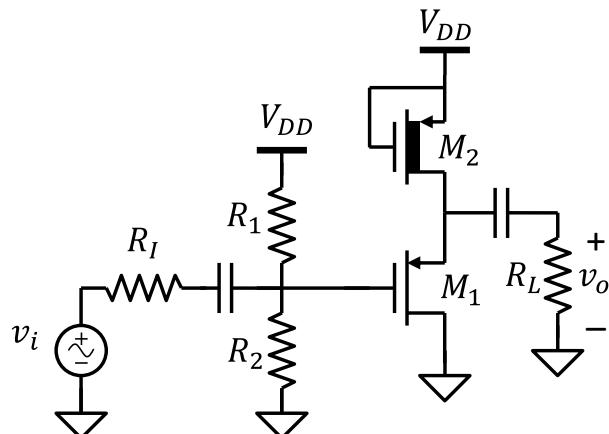
DATI: $V_{DD} = 10V$; $R_1 = 90k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$, $R_I = 3k\Omega$, $R_L = 1k\Omega$,
 M_1 : $k_{p1} = 1mA/V^2$, $V_{TP1} = -2V$, $\lambda_p = 0$.
 M_2 : $k_{p2} = 0.25mA/V^2$, $V_{TP2} = 2V$, $\lambda_{p2} = 0.01V^{-1}$.

Dato il circuito in figura calcolare:

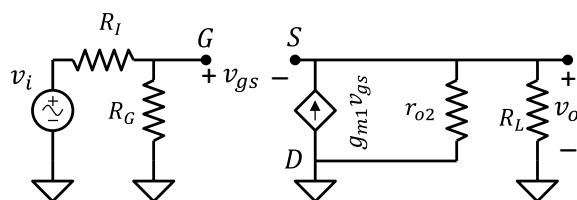
1. Trovare la polarizzazione dei MOS.
 2. Disegnare il circuito al piccolo segnale
- Dall'analisi del circuito ai piccoli segnali, trovare:
3. Le resistenze di ingresso e di uscita
 4. Il guadagno di tensione A_v .

Soluzione

1. M_1 : $V_{GS1} = -3V$, $V_{DS1} = -4V$
 M_2 : $V_{GS2} = 0$, $V_{DS2} = -6V$;
2. Circuito al piccolo segnale



3. $R_{IN} = 9k\Omega$, $R_{OUT} = 995\Omega$;
4. $A_v = 0.374$;



7 Amplificatori multistadio e differenziali

Esercizio 7.1

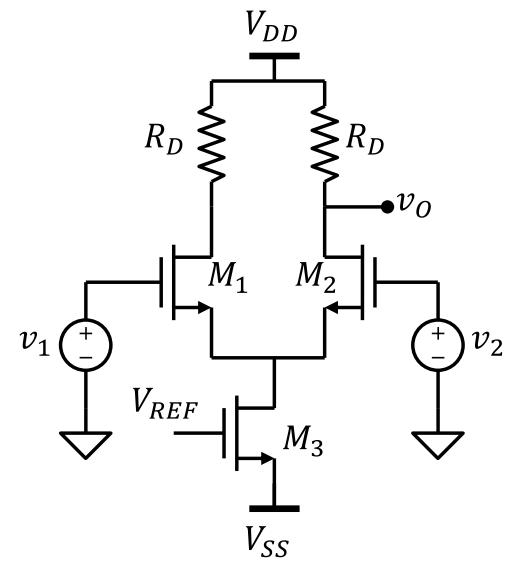
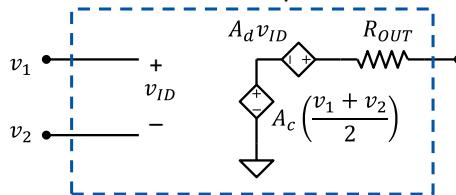
DATI: $V_{DD} = 5V$, $V_{SS} = -5V$, $V_{REF} = -3V$, $R_D = 8k\Omega$
 M_1 e M_2 : $k_{n1} = k_{n2} = 4mA/V^2$, $V_{TN1} = V_{TN2} = 1V$, $\lambda_{n1} = \lambda_{n2} = 0$
 M_3 : $k_{n3} = 2mA/V^2$; $V_{TN3} = 1V$; $\lambda_{n3}=0.01V^{-1}$

Dato il circuito in figura, calcolare:

- Il punto di polarizzazione dei MOSFET con $v_1 = v_2 = 0V$
- Il guadagno di modo differenziale relativo al segnale differenziale $v_1 - v_2$
- Il guadagno di modo comune
- Il CMRR
- La resistenza di uscita
- Disegnare il modello elettrico equivalente

Soluzione

- M_1 : $V_{GS1} = 1.5V$, $V_{DS1} = 2.5V$, $I_{DS1} = 0.5mA$,
 M_2 : $V_{GS2} = 1.5V$, $V_{DS2} = 2.5V$, $I_{DS2} = 0.5mA$,
 M_3 : $V_{GS3} = 2V$, $V_{DS3} = 3.5V$, $I_{DS3} = 1mA$,
- $A_d = 8$,
- $A_c = -0.04$,
- $CMRR = 200.5$
- $R_{OUT} = 8k\Omega$
- Modello elettrico equivalente



Esercizio 7.2

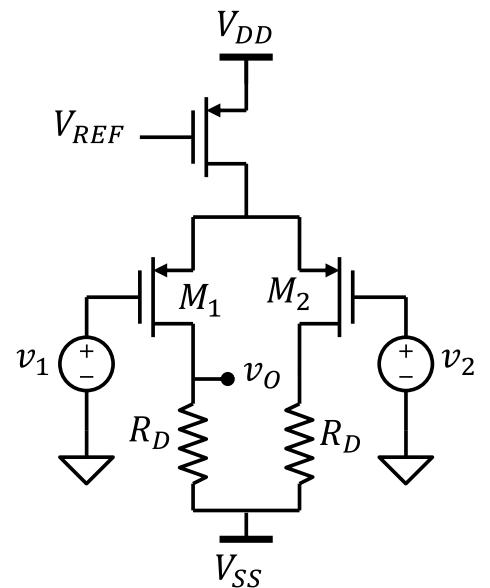
DATI: $V_{DD} = 10V$, $V_{SS} = -10V$, $V_{REF} = 7V$, $R_D = 20k\Omega$
 M_1 e M_2 : $k_{p1}=k_{p2} = 1mA/V^2$, $V_{TP1} = V_{TP2} = -2V$, $\lambda_{p1}=\lambda_{p2}=0$
 M_3 : $k_{p3} = 1mA/V^2$; $V_{TP3} = -2V$; $\lambda_{p3}=0.01V^{-1}$

Dato il circuito in figura, calcolare:

- Il punto di polarizzazione dei MOSFET con $v_1 = v_2 = 0V$
- Il guadagno di modo differenziale relativo al segnale differenziale $v_1 - v_2$
- Il guadagno di modo comune
- Il rapporto di reiezione del modo comune CMRR
- La resistenza di uscita

Soluzione

- $V_{GS} = 2V$, $V_{DS} = 5V$, $I_{DS} = 0.5mA$,
- $A_d = -10$,
- $A_c = -0.025$,
- $CMRR = 400.5$
- $R_{OUT} = 20k\Omega$



Esercizio 7.3

DATI: $V_{DD} = 3V$, $V_{SS} = -3V$

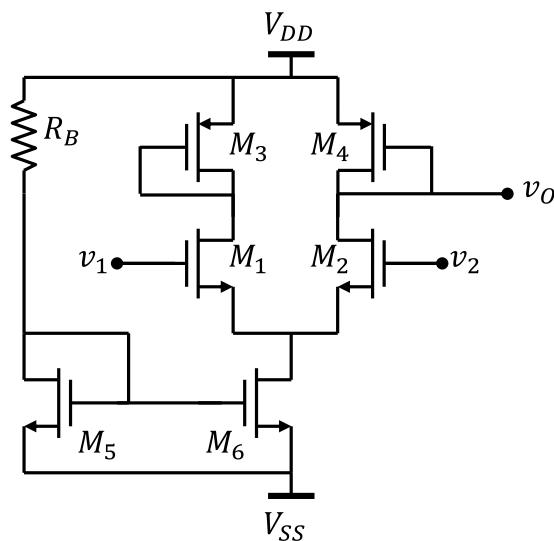
- M_1 e M_2 : $k_{n1}=k_{n2} = 10\text{mA/V}^2$, $V_{TN1} = V_{TN2} = 0.4V$, $\lambda_{n1} = \lambda_{n2} = 0$
- M_3 e M_4 : $k_{p3}=k_{p4} = 0.1\text{mA/V}^2$, $V_{TP1} = V_{TP2} = -0.4V$, $\lambda_{p3} = \lambda_{p4} = 0$
- M_5 e M_6 : $k_{n5}=k_{n6} = 5\text{mA/V}^2$, $V_{TN5} = V_{TN6} = 0.4V$, $\lambda_{n5} = \lambda_{n6} = 0.01\text{V}^{-1}$

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. Il valore di R_B per ottenere che la transconduttanza di M_1 e M_2 siano $g_{m1} = g_{m2} = 2\text{mS}$ (con $v_1 = v_2 = 0V$)
2. Il punto operativo dei MOSFET (con $v_1 = v_2 = 0V$)
3. Il guadagno di modo differenziale relativo al segnale differenziale $v_1 - v_2$
4. Il guadagno di modo comune
5. Il rapporto di reiezione del modo comune CMRR
6. La resistenza di uscita

Soluzione

1. $R_B = 13\text{k}\Omega$
2. M_1, M_2 : $V_{GS} = 0.6V$, $V_{DS} = 1.2V$
 M_3, M_4 : $V_{GS} = V_{DS} = -2.4V$
 M_5, M_6 : $V_{GS} = V_{DS} = 0.8V$
3. $A_d = 5$,
4. $A_c = -0.01$,
5. $\text{CMRR} = 500$
6. $R_{OUT} = 5\text{k}\Omega$



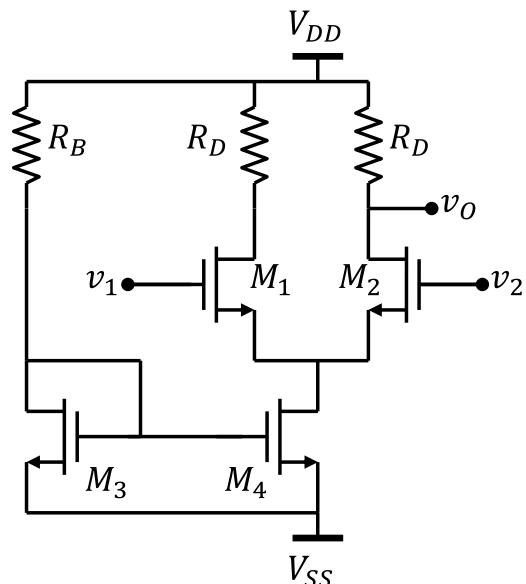
Esercizio 7.4

DATI: $V_{DD} = 10V$, $V_{SS} = -10V$

- M_1 e M_2 : $k_{n1} = k_{n2} = 1\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 3V$, $\lambda_{n1} = \lambda_{n2} = 0$
- M_3 : $k_{n3} = 5\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 3V$, $\lambda_{n3} = 0$
- M_4 : $k_{n4} = 2\text{mA/V}^2$, $V_{TN} = 1V$, $\lambda_{n4} = 0.0025\text{V}^{-1}$

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. Il valore della resistenza R_B per ottenere che la corrente attraverso M_4 sia $I_{DS4} = 1\text{mA}$
2. Il valore della resistenza R_D per avere un guadagno di modo differenziale $A_d = 10$
3. Il punto di polarizzazione dei MOSFET con $v_1 = v_2 = 0V$.
4. Il guadagno di modo comune e il rapporto di reiezione del modo comune (CMRR)
5. La tensione di uscita con quando agli ingressi sono applicate le tensioni:
 - a. $v_1 = 5\text{mV}$ e $v_2 = -5\text{mV}$
 - b. $v_1 = 10\text{mV}$ e $v_2 = 20\text{mV}$
 - c. $v_1 = 20\text{mV}$ e $v_2 = 10\text{mV}$



Soluzione

1. $R_B = 6.4\text{k}\Omega$
2. $R_D = 20\text{k}\Omega$
3. M_1 e M_2 : $V_{GS} = 4V$, $V_{DS} = 4V$, $I_{DS} = 0.5\text{mA}$
 M_3 : $V_{GS3} = V_{DS2}$, $I_{DS3} = 2.5\text{mA}$
 M_4 : $V_{GS4} = 4V$, $V_{DS4} = 6V$, $I_{DS} = 0.5\text{mA}$
4. $A_c = -0.247$, $\text{CMRR} = 40.5$
a) $v_o = 100\text{mV}$; b) $v_o = -103.7\text{mV}$; c) $v_o = 96.3\text{mV}$

Esercizio 7.5

DATI: $V_{DD} = +25 \text{ V}$, $V_{SS} = -25 \text{ V}$, $V_{REF} = -23 \text{ V}$;

$$R_{D1} = 10\text{k}\Omega, R_{G2} = 20\text{k}\Omega, R_I = 4\text{k}\Omega, R_L = 20\text{k}\Omega$$

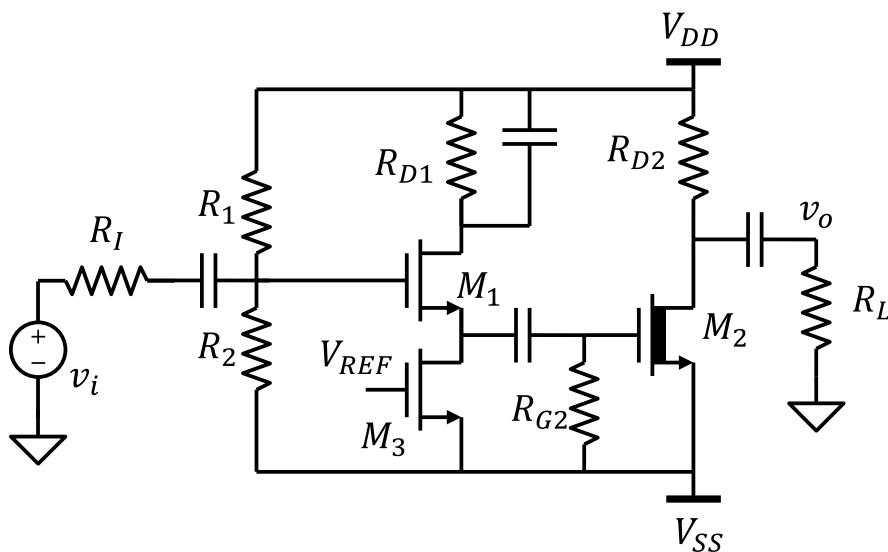
$$\text{M}_1: k_{n1} = 1\text{mA/V}^2, V_{TN1} = 3\text{V}, \lambda_{n1} = 0 \text{ V}^{-1}$$

$$\text{M}_2: k_{n2} = 0.25\text{mA/V}^2, V_{TN2} = -2\text{V}, \lambda_{n2} = 0 \text{ V}^{-1}$$

$$\text{M}_3: k_{n3} = 4\text{mA/V}^2, V_{TN3} = 1\text{V}, \lambda_{n3} = 0 \text{ V}^{-1}$$

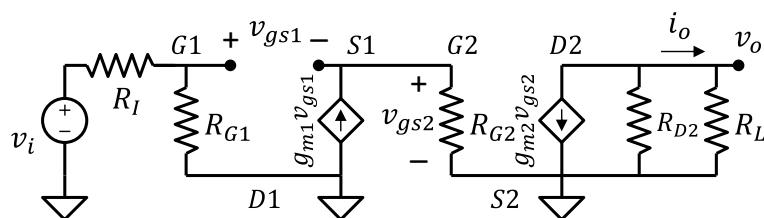
Dato il circuito in figura:

1. Sapendo che M_1 ha tensione drain-source $V_{DS1}=10\text{V}$, trovare il punto di lavoro dei transistor M_1 e M_3 e la corrente attraverso M_2 nell'ipotesi che sia in saturazione.
2. Disegnare il circuito ai piccoli segnali dell'amplificatore
3. Determinare le resistenze R_1 , R_2 , R_{D2} affinché l'amplificatore abbia resistenza di ingresso $R_{IN} = 100\text{k}\Omega$ e resistenza di uscita $R_{OUT} = 60 \text{ k}\Omega$
4. Verificare le condizioni di saturazione per entrambi i MOSFET
5. Calcolare il guadagno di tensione $A_v = v_o/v_i$.



Soluzione

1. $\text{M}_1: V_{GS} = 5\text{V}, V_{DS} = 10\text{V}, I_{DS} = 2\text{mA};$
 $\text{M}_2: I_{DS} = 0.5\text{mA};$
 $\text{M}_3: V_{GS} = 2\text{V}, V_{DS} = 20\text{V}, I_{DS} = 2\text{mA};$
2. Circuito ai piccoli segnali



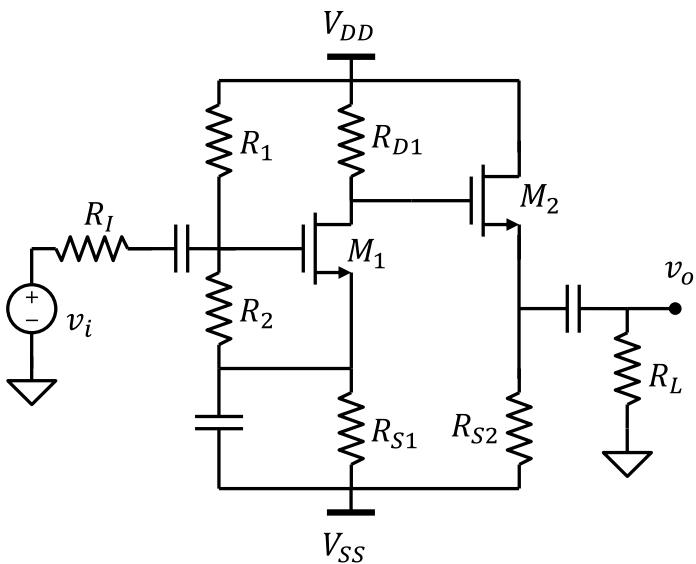
3. $R_{D2} = 60\text{k}\Omega$
 $R_1 = 200\text{k}\Omega, R_2 = 200\text{k}\Omega$
4. $\text{M}_2: V_{DS} = 20\text{V}, V_{GS} - V_{TN} = 2\text{V}$
5. $A_v = -18.8$

Esercizio 7.6

DATI: $V_{DD} = +15V$, $V_{SS} = -15V$; $R_{D1} = 30k\Omega$, $R_{S1} = 10k\Omega$, $R_{S2} = 5.5k\Omega$, $R_2 = 30k\Omega$, $R_I = 10 k\Omega$, $R_L = 5k\Omega$.
 M_1 e M_2 : $k_n = 1mA/V^2$, $V_{TN} = 2V$

Dato il circuito in figura calcolare:

1. Il punto di lavoro dei due transistor e il valore di R_1 , sapendo che la corrente di M_1 è $I_{DS1} = 0.5mA$.
2. Le resistenze di ingresso e di uscita dell'amplificatore
3. Il guadagno di corrente $A_v = v_o/v_i$.



Soluzione

1. M_1 : $V_{GS} = 3V$, $V_{DS} = 9V$
 M_2 : $V_{GS} = 4V$, $V_{DS} = 19V$
 $R_1 = 210k\Omega$
2. $R_{IN} = 26.25k\Omega$, $R_{OUT} = 458\Omega$
3. $A_v = -18.2$

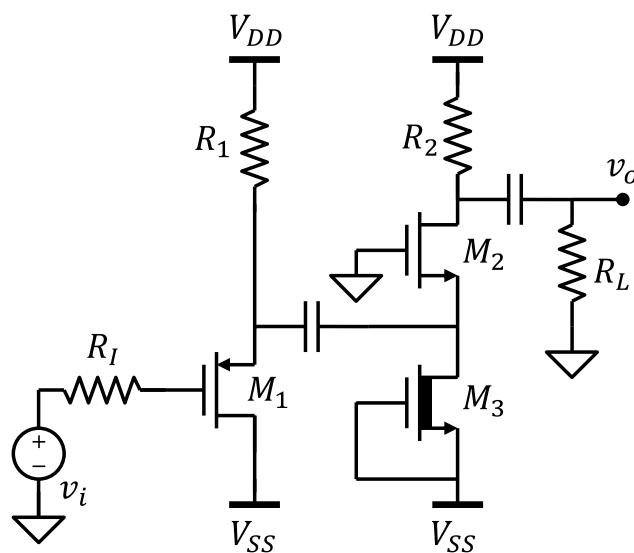
Esercizio 7.7

DATI: $V_{DD} = +5V$, $V_{SS} = -5V$; $R_2 = 5k\Omega$, $R_I = 20k\Omega$, $R_L = 15k\Omega$.

M_1 : $k_{p1} = 8mA/V^2$, $V_{TP1} = -0.5V$
 M_2 : $k_{n2} = 1mA/V^2$, $V_{TN2} = 0.5V$
 M_3 : $k_{n3} = 1mA/V^2$, $V_{TN3} = -1V$, $\lambda_{n3} = 0.01V^{-1}$

Dato il circuito in figura calcolare:

1. Il valore della resistenza R_1 per ottenere $g_{m1} = 10mS$.
2. Il punto di polarizzazione di tutti i MOSFET
3. Le resistenze di ingresso e di uscita dell'amplificatore e il guadagno di tensione $A_v = v_o/v_i$.



Soluzione

1. $R_1 = 520\Omega$
2. M_1 : $V_{GS} = -1.75V$, $V_{DS} = -6.75V$, $I_{DS1} = 5mA$
 M_2 : $V_{GS} = 1.5V$, $V_{DS} = 4V$, $I_{DS} = 0.5mA$
 M_3 : $V_{GS} = 0V$, $V_{DS} = 3.5V$, $I_{DS} = 0.5mA$
3. $R_{IN} = \infty$, $R_{OUT} = 5k\Omega$, $A_v = 2.9$

Esercizio 7.8

DATI: $V_{DD} = 10V$;

$$R_i = 10k\Omega,$$

$$R_1 = 300k\Omega, R_2 = 700k\Omega, R_{S1} = 2k\Omega, R_{D1} = 20k\Omega,$$

$$R_{S2} = 2k\Omega, R_{D2} = 24k\Omega$$

$$R_5 = 160k\Omega$$

$$R_L = 10k\Omega$$

$$M_1: k_{n1} = 1mA/V^2, \quad V_{TN} = 1V, \quad \lambda_n = 0$$

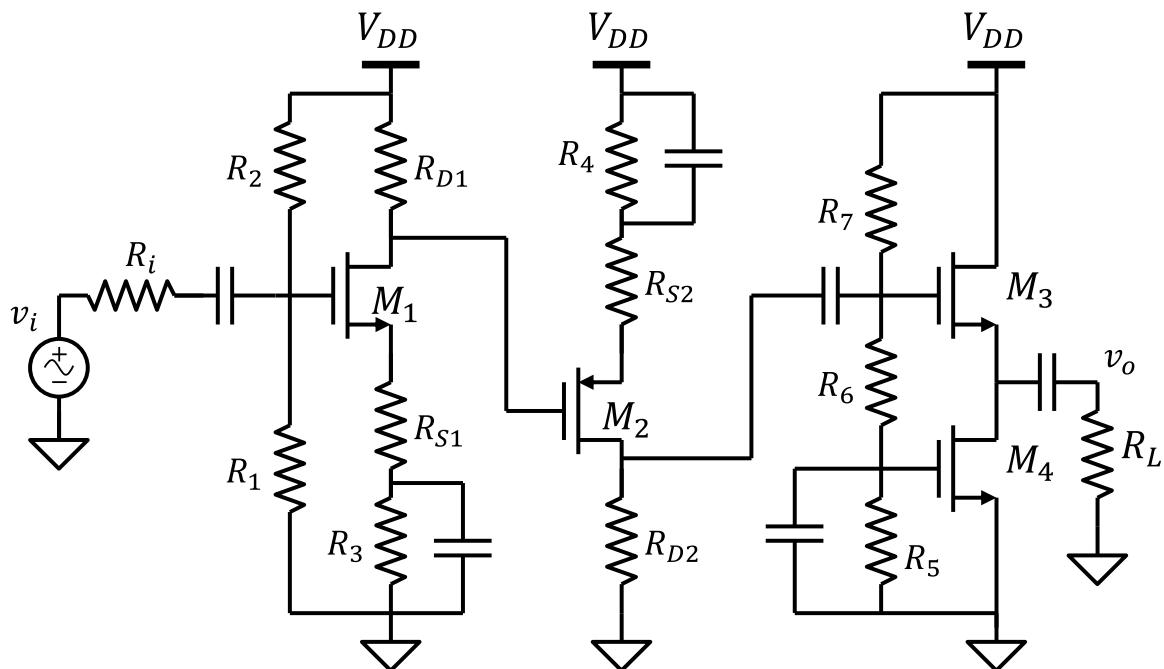
$$M_2: k_{p2} = 4mA/V^2, \quad V_{TP} = -1V, \quad \lambda_p = 0$$

$$M_3: k_{n3} = 10mA/V^2, \quad V_{TN} = 1V, \quad \lambda_n = 0$$

$$M_4: k_{n4} = 10mA/V^2, \quad V_{TN} = 1V, \quad \lambda_n = 0.005V^{-1}$$

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. I valori delle resistenze R_3 e R_4 affinché i MOSFET M_1 e M_2 abbiano transconduttanza $g_{m1} = 0.5mS$ e $g_{m2} = 1mS$.
2. I valori delle resistenze R_6 e R_7 affinché il MOSFET M_3 abbia transconduttanza $g_{m3} = 10mS$ e la tensione di uscita del circuito (source di M_3) in condizioni stazionarie sia 5V.
Dall'analisi ai piccoli segnali, determinare
3. Le resistenze di ingresso e di uscita dell'intero amplificatore
4. Il guadagno di tensione da v_i a v_o



Soluzione

1. $R_3 = 10k\Omega, R_4 = 8k\Omega;$
2. $R_6 = 400k\Omega, R_7 = 240k\Omega;$
3. $R_{IN} = 210k\Omega, R_{OUT} = 100\Omega;$
4. $A_v = 32.5$

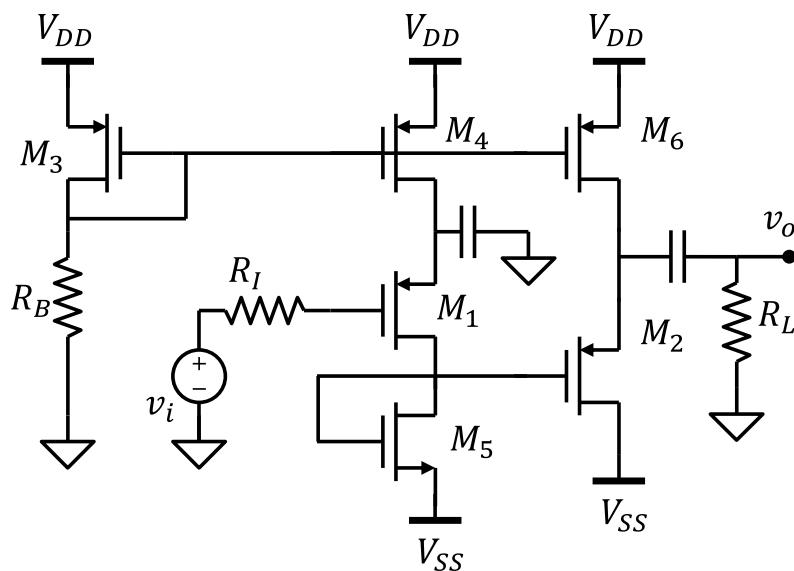
Esercizio 7.9

DATI: $V_{DD} = +5V$, $V_{SS} = -5V$, $R_L = 1k\Omega$, $R_I = 20k\Omega$

M_1 : $k_{p1} = 4mA/V^2$,	$V_{TP} = -0.5V$,	$\lambda_{p1} = 0$
M_2 : $k_{p2} = 8mA/V^2$,	$V_{TP} = -0.5V$,	$\lambda_{p2} = 0$
M_3 : $k_{p3} = 0.8mA/V^2$,	$V_{TP} = -0.5V$,	$\lambda_{p3} = 0$
M_4 : $k_{p4} = 4mA/V^2$,	$V_{TP} = -0.5V$,	$\lambda_{p4} = 0$
M_5 : $k_{n5} = 1mA/V^2$,	$V_{TN} = 1V$,	$\lambda_{n5} = 0$
M_6 : $k_{p6} = 8mA/V^2$,	$V_{TP} = -0.5V$,	$\lambda_{p6} = 0.01V^{-1}$

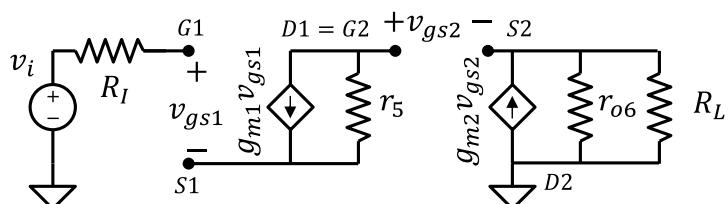
Dato il circuito in figura, calcolare:

1. Trovare il valore della resistenza R_B per ottenere $I_{DS1} = 0.5mA$
2. Trovare il punto di polarizzazione di tutti i MOS
3. Disegnare il circuito ai piccoli segnali
4. Calcolare la resistenza di ingresso e di uscita dell'amplificatore
5. Calcolare il guadagno di tensione dall'ingresso v_i all'uscita v_o .



Soluzione

1. $R_B = 20k\Omega$
2. M_1 : $V_{GS} = -1V$, $V_{DS} = -1.5V$;
 M_2 : $V_{GS} = -1V$, $V_{DS} = -3.5V$;
 M_3 : $V_{GS} = -1V$, $V_{DS} = -1V$;
 M_4 : $V_{GS} = -1V$, $V_{DS} = -2V$;
 M_5 : $V_{GS} = 2.5V$, $V_{DS} = 2.5V$;
 M_6 : $V_{GS} = -1V$, $V_{DS} = -2.5V$;
3. Circuito ai piccoli segnali



4. $R_{IN} = \infty$, $R_{OUT} = 249\Omega$
5. $A_v = -2.13$

Esercizio 7.10

DATI: $V_{DD} = 20V$, $V_{SS} = -20V$, $R_L = 20k\Omega$, $R_{G1} = 20k\Omega$, $R_{G2} = 180k\Omega$;

M_1 : $k_{n1} = 5mA/V^2$, $V_{TN1} = 4.6V$, $\lambda_{n1} = 0$;

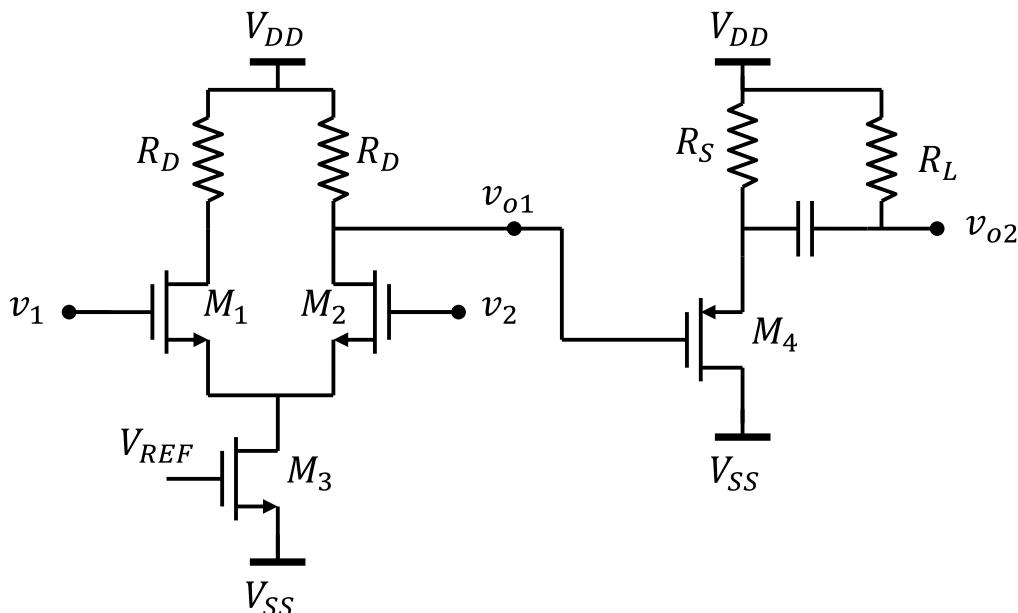
M_2 : $k_{n2} = 5mA/V^2$, $V_{TN2} = 4.6V$, $\lambda_{n2} = 0$;

M_3 : $k_{n3} = 0.4mA/V^2$; $V_{TN3} = 2V$; $\lambda_{n3}=0.01V^{-1}$

M_4 : $k_{p4} = 1mA/V^2$; $V_{TP4} = -4V$, $\lambda_p = 0$

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. I valori delle resistenze R_D e della tensione V_{REF} per ottenere in uscita al primo stadio un guadagno di modo differenziale (relativo all'ingresso differenziale $v_1 - v_2$) $A_d = 50$ (a vuoto) e tensione nulla ($v_{o1} = 0V$) con $v_1 = v_2 = 0V$.
2. Il valore della resistenza R_S in modo che M_4 sia in saturazione con $I_{DS4} = 2mA$.
3. Il guadagno di modo differenziale e di modo comune dell'intero circuito
4. La tensione di uscita del primo stadio (v_{o1}) e del secondo stadio (v_{o2}) quando agli ingressi sono presenti le tensioni:
 - a. $v_1 = 10mV$, $v_2 = -10mV$
 - b. $v_1 = 40mV$, $v_2 = 60mV$
 - c. $v_1 = 60mV$, $v_2 = 40mV$



Soluzioni

1. $V_{REF} = -16V$, $R_D = 50k\Omega$;
2. $R_S = 7k\Omega$;
3. $A_{d,TOT} = 3.7$; $A_{c,TOT} = -0.01$
4. a) $v_{o1} = 1V$, $v_{o2} = 0.912V$;
b) $v_{o1} = -1.01V$, $v_{o2} = -0.921V$;
c) $v_{o1} = 0.99V$, $v_{o2} = 0.903V$;

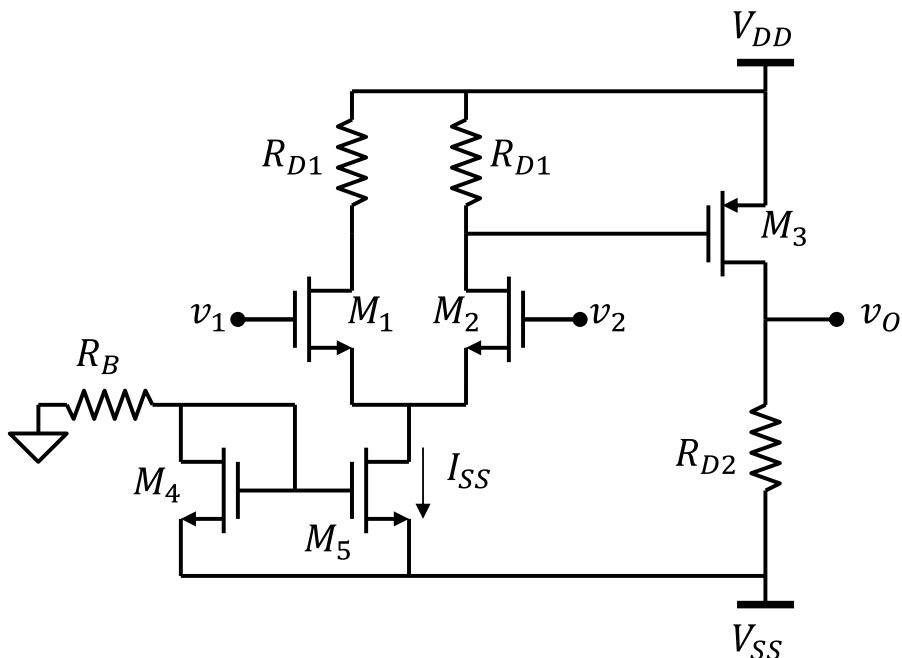
Esercizio 7.11

DATI: $V_{DD} = 10V$, $V_{SS} = -10V$, $R_{D1} = 2k\Omega$,

$$\begin{array}{lll} M_1, M_2: k_{n1} = k_{n2} = 0.2 \text{mA/V}^2; V_{TN1} = V_{TN2} = 1V; & \lambda_{n1} = \lambda_{n2} = 0 \\ M_3: k_{p3} = 1 \text{mA/V}^2; V_{TP3} = -3V; & \lambda_{p3} = 0 \text{V}^{-1} \\ M_4: k_{n4} = 0.05 \text{mA/V}^2; V_{TN4} = 2V; & \lambda_{n4} = 0.01 \text{V}^{-1} \\ M_5: k_n = 2.5 \text{mA/V}^2; V_{TN5} = 2V; & \lambda_{n5} = 0.01 \text{V}^{-1} \end{array}$$

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. Il valore di R_B per avere $I_{SS} = 5 \text{mA}$
2. Il valore di R_{D2} per avere $V_O = 0V$ in DC, con $v_1 = v_2 = 0V$
3. Il punto di lavoro di tutti i transistor
4. Il guadagno di tensione di modo differenziale e il CMRR
5. La resistenza di uscita dell'amplificatore



Soluzione

1. $R_B = 60k\Omega$
2. $R_{D2} = 5k\Omega$
3. $M_1, M_2: V_{GS} = 6V, V_{DS} = 11V, I_{DS} = 2.5 \text{mA}$
 $M_3: V_{GS} = -5V, V_{DS} = -10V, I_{DS} = 2 \text{mA}$
 $M_4: V_{GS} = 4V, V_{DS} = 4V, I_{DS} = 0.1 \text{mA}$
 $M_5: V_{GS} = 4V, V_{DS} = 4V, I_{DS} = 5 \text{mA}$
4. $A_d = -10, \text{CMRR} = 20.5$
5. $R_{OUT} = 5k\Omega$

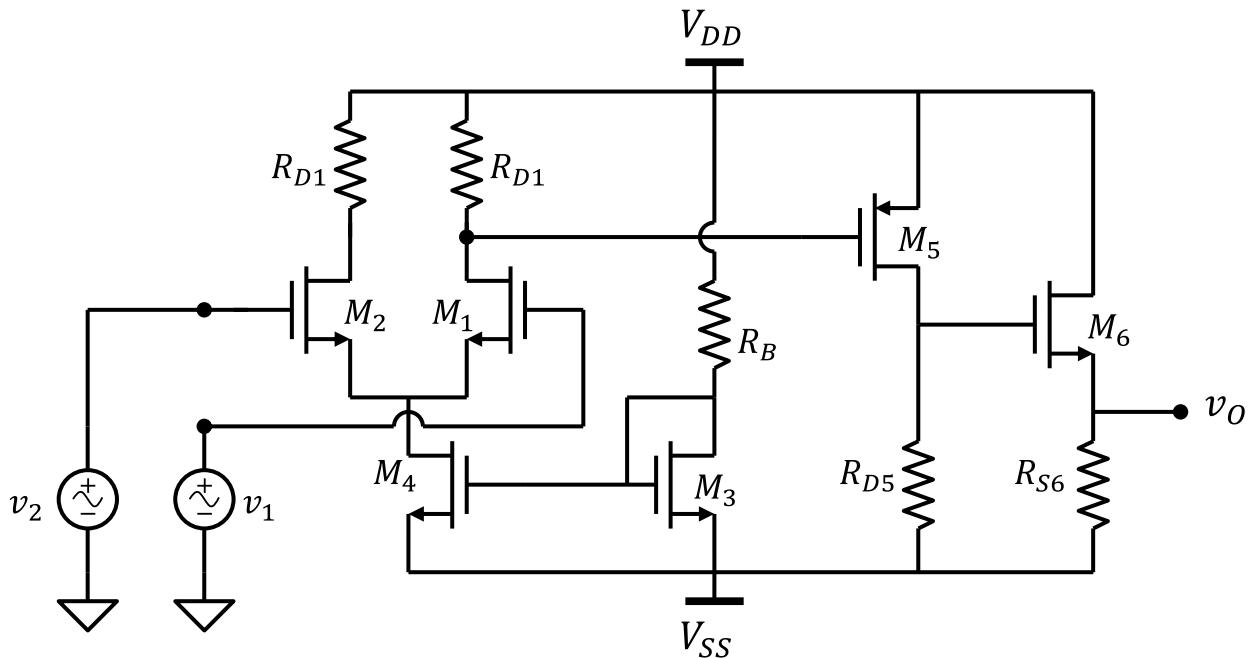
Esercizio 7.12

DATI: $V_{DD} = 10V$, $V_{SS} = -10V$, $R_{D1} = 12k\Omega$, $R_{D2} = 1.5k\Omega$,

$$\begin{aligned} M_1 \text{ e } M_2: k_{n1} &= k_{n2} = 0.1mA/V^2, V_{TN} = 1V, \quad \lambda_{n1} = 0; \\ M_3: k_{n3} &= 4mA/V^2, \quad V_{TN} = 1V, \quad \lambda_{n3} = 0; \\ M_4: k_{n4} &= 3.2mA/V^2, \quad V_{TN} = 1V, \quad \lambda_{n4} = 0.001V^{-1}; \\ M_5: k_{p5} &= 2mA/V^2, \quad V_{TP} = -1V, \quad \lambda_{p5} = 0; \\ M_6: k_{n6} &= 5mA/V^2, \quad V_{TN} = 1V, \quad \lambda_{n6} = 0; \end{aligned}$$

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. Il valore della resistenza R_B sapendo che la corrente attraverso M_4 è $I_{DS4} = 0.4mA$
 2. La polarizzazione dei MOSFET sapendo che in condizioni stazionarie il potenziale dell'uscita v_o è $0V$.
 3. Il valore della resistenza R_{S6}
- Dall'analisi ai piccoli segnali, calcolare
4. La resistenza di uscita
 5. Il guadagno di modo differenziale relativo al segnale $v_1 - v_2$ e il rapporto di reiezione del modo comune
 6. La tensione di uscita quando all'ingresso sono applicati i segnali:
 - a. $v_1 = 10mV$ e $v_2 = -10mV$
 - b. $v_1 = 60mV$ e $v_2 = 40mV$
 - c. $v_1 = -40mV$ e $v_2 = 60mV$



Soluzione

1. $R_B = 30k\Omega$,
2. M_1 e M_2 : $V_{GS} = 3V$, $V_{DS} = 10V$, $I_{DS} = 0.2mA$
 M_3 : $V_{GS} = 1.5V$, $V_{DS} = 1.5V$, $I_{DS} = 0.5mA$
 M_4 : $V_{GS} = 1.5V$, $V_{DS} = 7V$, $I_{DS} = 0.4mA$
 M_5 : $V_{GS} = -3V$, $V_{DS} = -8V$, $I_{DS} = 4mA$
 M_6 : $V_{GS} = 2V$, $V_{DS} = 10V$, $I_{DS} = 2.5mA$
3. $R_{S6} = 4k\Omega$
4. $R_{OUT} = 190\Omega$
5. $A_d = 21.4$, $CMRR = 250.5$
6. a) $v_o = 0.429V$; b) $v_o = 0.433V$; c) $v_o = 0.424V$

8 Amplificatori operazionali ideali

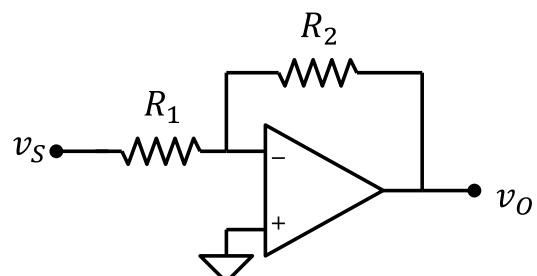
Esercizio 8.1

DATI: $R_1 = 3\text{k}\Omega$;

Dato il circuito in figura, calcolare quanto vale la resistenza R_2 , sapendo che se all'ingresso è applicata una tensione $v_S = 6\text{V}$, l'uscita assume il valore $v_O = -18\text{V}$.

Soluzione

$$R_2 = 9\text{k}\Omega$$



Esercizio 8.2

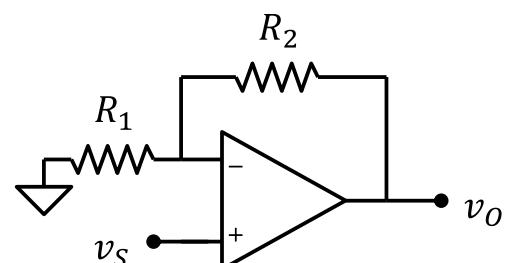
DATI: $v_S = 1\text{V}$, $R_1 = 2\text{k}\Omega$, $R_2 = 5\text{k}\Omega$

Dato il circuito in figura:

1. Calcolare la tensione di uscita v_O
2. Modificare il valore di R_2 affinché la tensione di uscita sia $v_O = 5\text{V}$ con $v_S = 1\text{V}$

Soluzione

1. $v_S = 3.5\text{V}$
2. $R_2 = 8\text{k}\Omega$



Esercizio 8.3

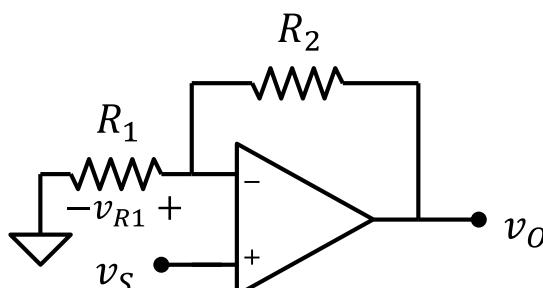
DATI: $v_S = 10\text{mV}$, $R_1 = 1.5\text{k}\Omega$, $R_2 = 540\text{k}\Omega$

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. Il guadagno di tensione
2. La tensione di uscita v_O
3. La caduta di tensione ai capi di R_1 .

Soluzione

1. $A_v = 361$;
2. $v_O = 3.61\text{V}$;
3. $V_{R1} = 10\text{mV}$



Esercizio 8.4

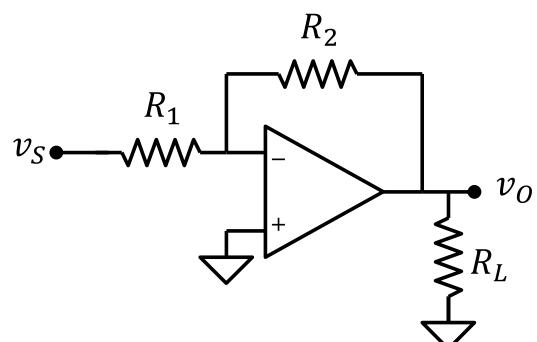
DATI: $R_1 = 2.2\text{k}\Omega$, $v_S = -10\text{mV}$

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. Il valore della resistenza R_2 sapendo che il modulo del guadagno di tensione è $|A_v| = 100$.
2. La corrente erogata dall'operazionale e la corrente attraverso il carico $R_L = 10\text{k}\Omega$

Soluzione

1. $R_2 = 220\text{k}\Omega$
2. $I_L = 100\mu\text{A}$, $I_O = 104.5\mu\text{A}$



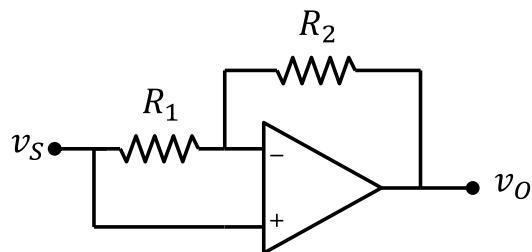
Esercizio 8.5

DATI: $v_S = 10V$, $R_1 = R_2 = 1k\Omega$

Dato il circuito in figura, calcolare v_O

Soluzione

$$v_O = 10V.$$



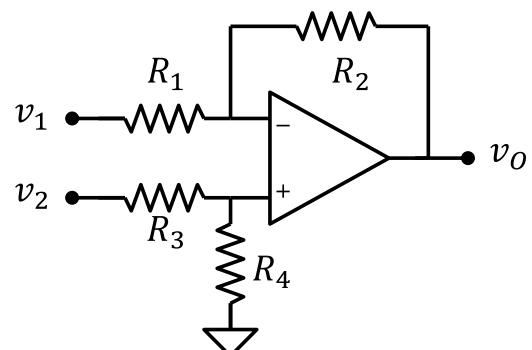
Esercizio 8.6

Calcolare i valori di R_1 , R_2 , R_3 e R_4 in modo tale che la tensione di uscita del circuito in figura sia $v_O = v_2 - 2v_1$

Soluzione

$$R_2 = 2R_1; R_4 = R_3/2$$

Ad esempio: $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 2k\Omega$, $R_3 = 2k\Omega$, $R_4 = 1k\Omega$



Esercizio 8.7

Dato il circuito in figura:

1. calcolare la tensione di uscita v_O in funzione dei quattro ingressi v_1 , v_2 e v_3 .
2. Ponendo $R_1 = 10k\Omega$ e $R_I = 10k\Omega$, che valore devono assumere le altre resistenze affinché si abbia: $v_O = v_1 + v_2 + v_3$.

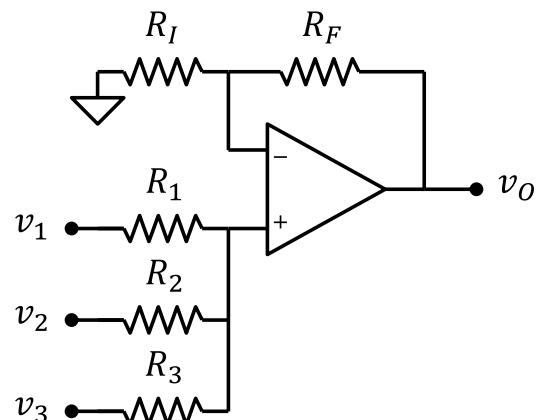
Soluzione

1. Media pesata degli ingressi

$$v_O = \left(1 + \frac{R_F}{R_I}\right) \frac{\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

$$2. R_2 = R_3 = R_1 = 10k\Omega$$

$$3. R_F = 20k\Omega$$



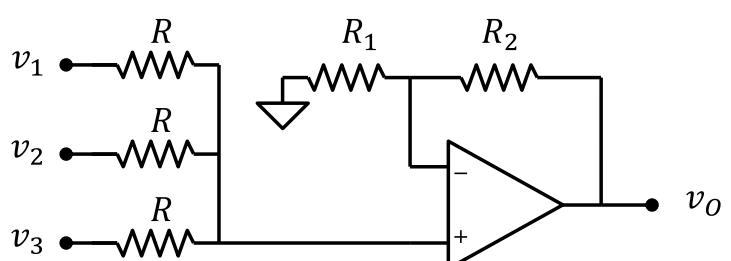
Esercizio 8.8

Dato il circuito in figura, determinare il valore delle resistenze R_1 e R_2 affinché svolga la funzione

$$v_O = \frac{5}{3}(v_1 + v_2 + v_3)$$

Soluzione

$$R_2 = 4R_1$$

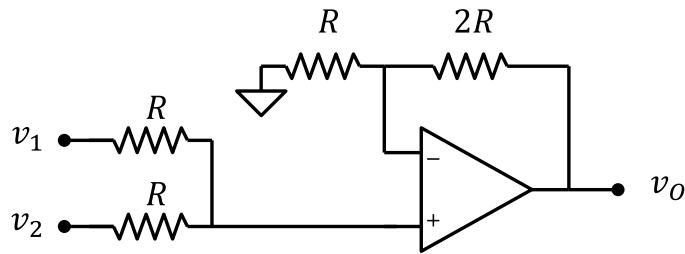


Esercizio 8.9

Calcolare la tensione di uscita del circuito in figura

Soluzione

$$v_o = \frac{3}{2}(v_1 + v_2)$$

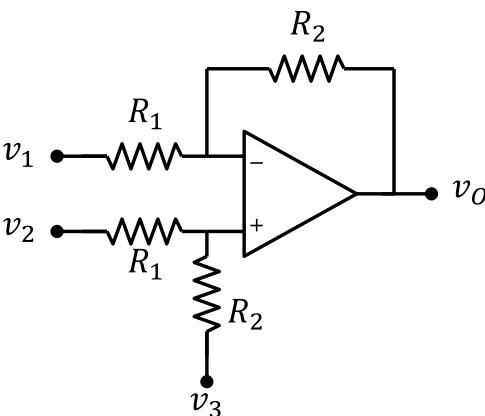


Esercizio 8.10

DATI: $R_1 = 4\text{k}\Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$.

Dato il circuito in figura calcolare:

1. La tensione di uscita in funzione di v_1 , v_2 e v_3 .
2. La tensione di uscita con:
 - a. $v_1 = v_2 = 1\text{V}$ e $v_3 = 0\text{V}$
 - b. $v_1 = 1\text{V}$, $v_2 = 0.5\text{V}$, $v_3 = 2\text{V}$
 - c. $v_1 = 1\text{V}$, $v_2 = 0.5\text{V}$, $v_3 = -1\text{V}$



Soluzione

1. $v_o = (R_2/R_1)(v_2 - v_1) + v_3$
2. a) $v_o = 0\text{V}$
b) $v_o = -0.5\text{V}$
c) $v_o = -3.5\text{V}$

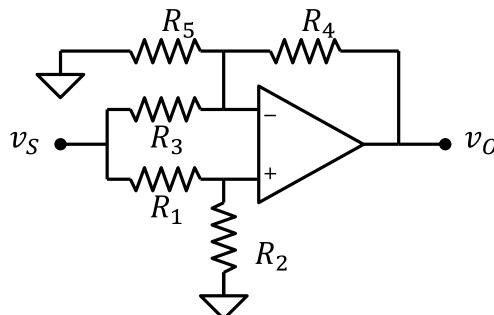
Esercizio 8.11

DATI: $R_1 = R_2 = R_4 = 20\text{k}\Omega$, $R_3 = 5\text{k}\Omega$, $R_5 = 4\text{k}\Omega$

Calcolare il guadagno di tensione del circuito

Soluzione

$$A_v = 1$$



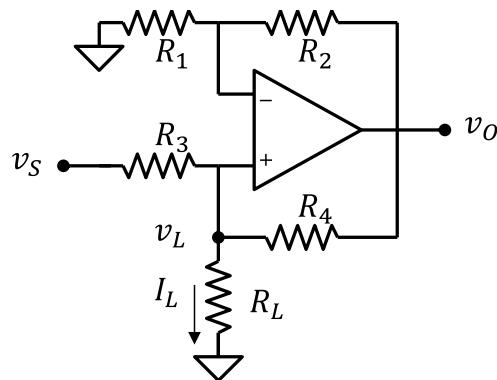
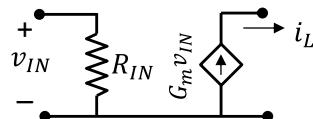
Esercizio 8.12

Dato il circuito in figura che pilota un carico esterno R_L , sapendo che $R_2/R_1 = R_4/R_3$, calcolare:

1. La corrente attraverso la resistenza di carico R_L .
2. La resistenza di uscita del circuito al nodo v_L
3. Disegnare il modello a doppio bipolo dell'amplificatore

Soluzione

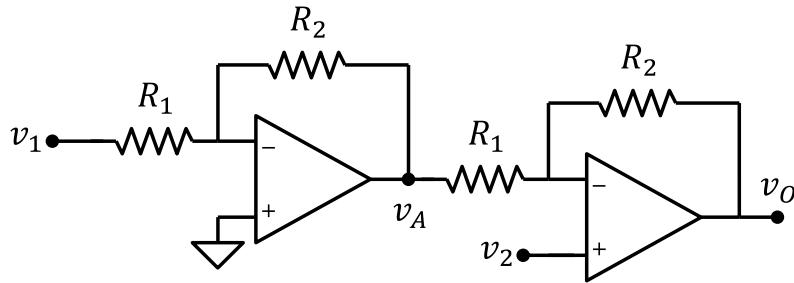
1. $I_L = V_S/R_3$
2. $R_{OUT} = \infty$
3. Modello a doppio bipolo: $g_m = 1/R_3$; $R_{IN} = (R_3 - R_L)/R_3^2$:



Esercizio 8.13

DATI: $R_1 = R_2 = 1\text{k}\Omega$, $v_1 = 10\text{V}$, $v_2 = 5\text{V}$

Calcolare la tensione di uscita v_o del circuito in figura

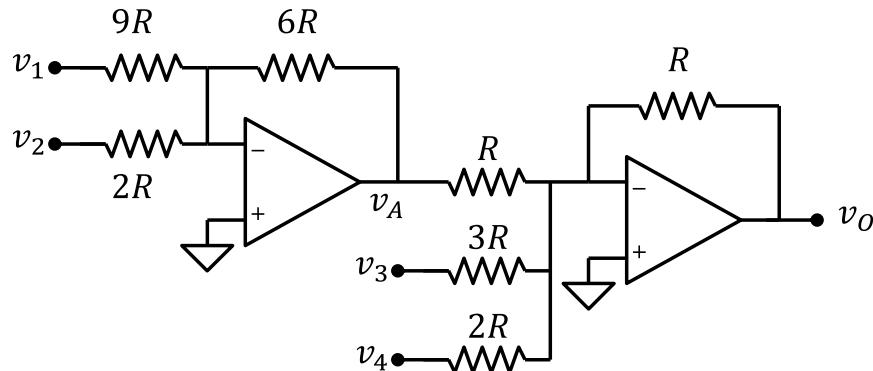


Soluzione

$$v_o = 20\text{V}$$

Esercizio 8.14

Dato il circuito in figura calcolare la tensione di uscita v_o in funzione dei quattro ingressi v_1, v_2, v_3 e v_4 .

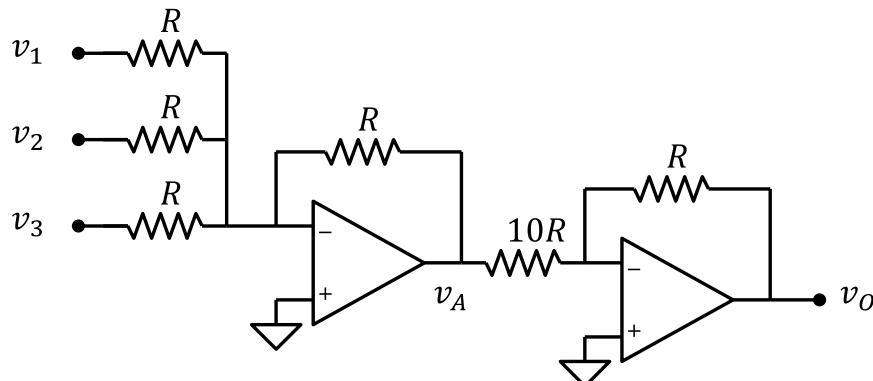


Soluzione:

$$v_o = \frac{2}{3}v_1 + 3v_2 - \frac{1}{3}v_3 - \frac{1}{2}v_4$$

Esercizio 8.15

Dato il circuito in figura, calcolare la tensione di uscita v_o in funzione dei tre ingressi v_1, v_2 e v_3 .



Soluzione

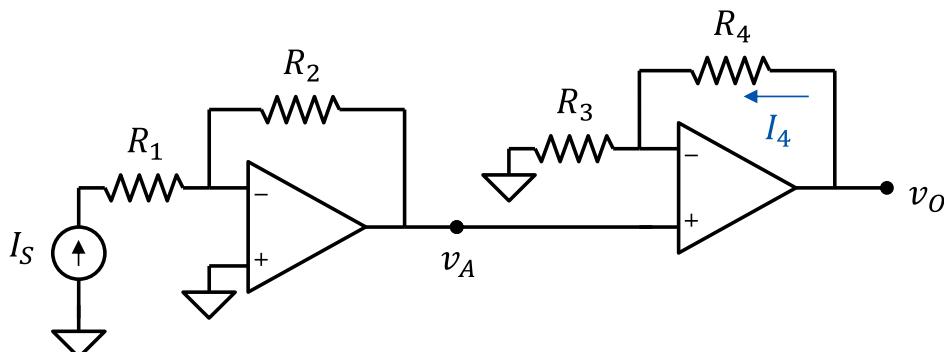
$$v_o = \frac{1}{10}(v_1 + v_2 + v_3)$$

Esercizio 8.16

DATI: $R_1 = R_3 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 100\text{k}\Omega$, $I_S = 10\mu\text{A}$

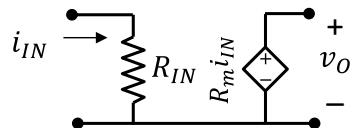
Dato il circuito in figura, calcolare:

1. La corrente I_4 in funzione del valore della resistenza R_4 .
2. Il guadagno di transresistenza da I_S a v_O , la resistenza di ingresso e di uscita dell'amplificatore
3. Disegnare il modello a doppio bipolo



Soluzione

1. $I_4 = -1\text{mA}$
2. $R_m = -2.1\text{M}\Omega$, $R_{IN} = 1\text{k}\Omega$, $R_{OUT} = 0$
3. Modello a doppio bipolo

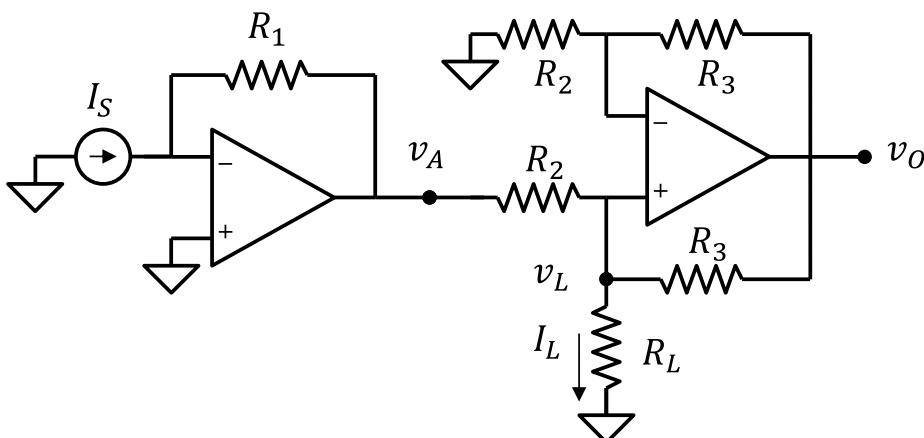


Esercizio 8.17

DATI: $R_1 = 30\text{k}\Omega$, $R_2 = 1\text{k}\Omega$, $R_3 = 100\Omega$

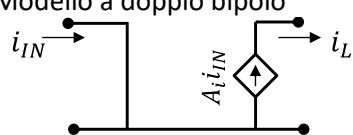
Dato il circuito in figura, calcolare:

1. Il guadagno di corrente da I_S a I_L , la resistenza di ingresso e di uscita dell'amplificatore
2. Disegnare il modello a doppio bipolo



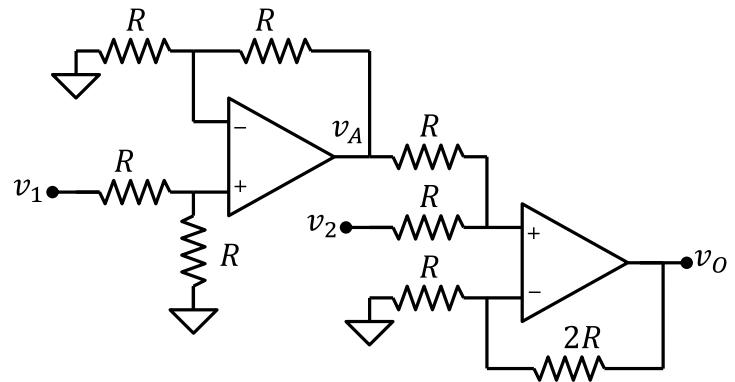
Soluzione

1. $A_i = -30$, $R_{IN} = 0$, $R_{OUT} = \infty$
2. Modello a doppio bipolo



Esercizio 8.18

Calcolare il guadagno del circuito in figura.



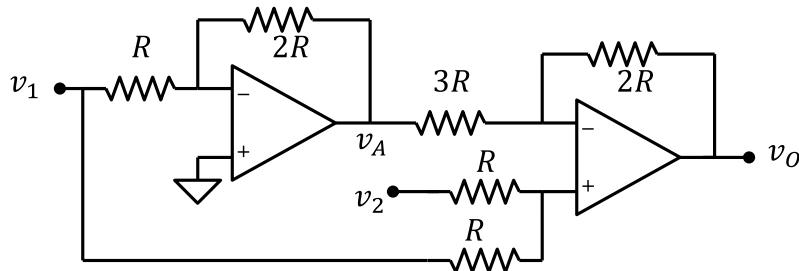
Soluzione

$$v_O = \frac{3}{2}(v_1 + v_2)$$

Esercizio 8.19

Dato il circuito in figura, trovare:

1. La tensione di uscita in funzione degli ingressi v_1 e v_2 .
2. Il valore dell'ingresso v_1 tale che con $v_2 = -7.8V$ la tensione di uscita sia nulla.



Soluzione

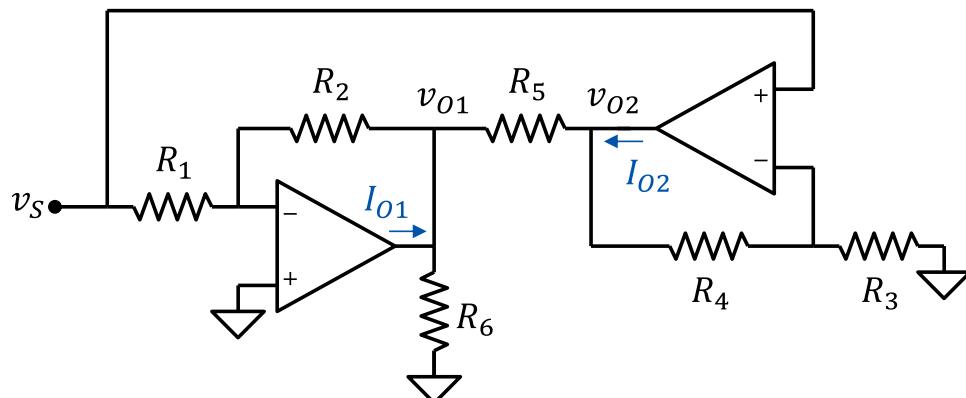
1. $v_O = (13/6)v_1 + (5/6)v_2$
2. $v_i = 3V$

Esercizio 8.20

DATI: $R_1 = 40k\Omega$, $R_2 = 120k\Omega$, $R_3 = 20k\Omega$, $R_4 = 80k\Omega$, $R_5 = 8k\Omega$, $R_6 = 6k\Omega$

Dato il circuito in figura calcolare:

1. I valori delle uscite v_{O1} e v_{O2} con $v_S = 2V$
2. Le correnti erogate dagli operazionali.



Soluzione

1. $v_{O1} = -6V$, $v_{O2} = 10V$
2. $I_{O1} = -3.05mA$, $v_{O2} = 2.1mA$

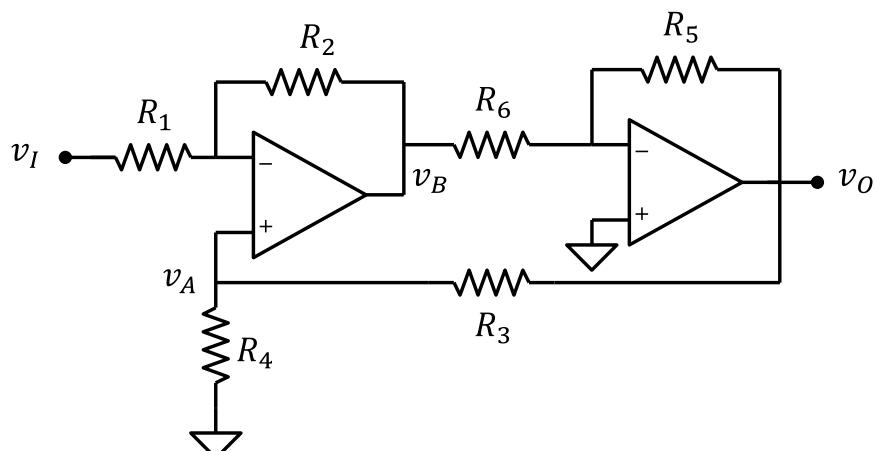
Esercizio 8.21

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$,
 $R_2 = 3\text{k}\Omega$,
 $R_3 = 6\text{k}\Omega$,
 $R_4 = 2\text{k}\Omega$,
 $R_5 = 1\text{k}\Omega$,
 $R_6 = 2\text{k}\Omega$.

Calcolare il guadagno del circuito in figura.

Soluzione

$$A_v = 1\text{V}$$



Esercizio 8.22

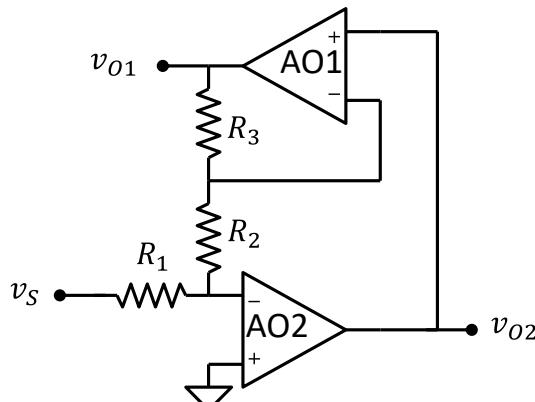
DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $R_3 = 30\text{k}\Omega$,

Dato il circuito in figura, determinare:

1. I guadagni di tensione dall'ingresso v_S all'uscita v_{O1} e da v_S a v_{O2}
2. La resistenza di ingresso.

Soluzione

1. $A_{v1} = -5\text{V}$, $A_{v2} = -2\text{V}$
2. $R_{IN} = 10\text{k}\Omega$



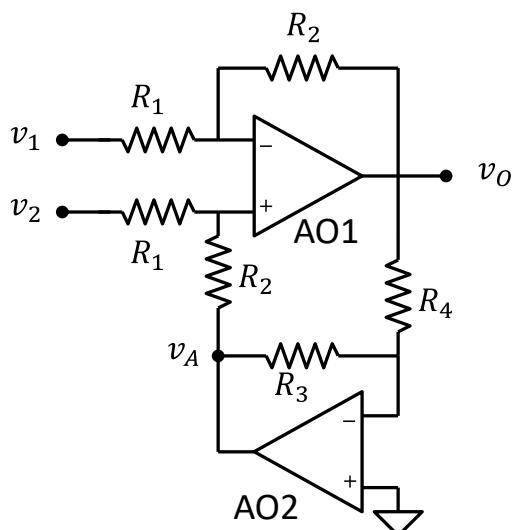
Esercizio 8.23

DATI: $R_1 = 2\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$, $R_3 = R_4 = 5\text{k}\Omega$.

Dato il circuito in figura, determinare la relazione tra gli ingressi v_1 e v_2 e la tensione di uscita v_O .

Soluzione

$$v_O = \frac{R_2}{2R_1}(v_2 - v_1) \quad , \quad A_v = \frac{R_2}{2R_1} = 2.5$$



Esercizio 8.24

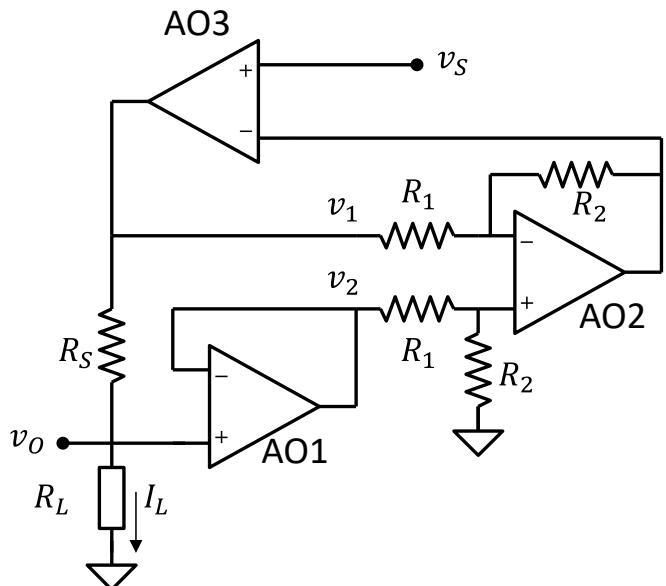
DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 100\text{k}\Omega$,
 $v_s = -2\text{V}$, $R_S = 10\text{k}\Omega$, $R_L = 1.5\text{M}\Omega$

Dato il circuito in figura, determinare:

1. la tensione ai capi del carico R_L e la corrente attraverso il carico
2. le tensioni di uscita di tutti gli operazionali
3. Le correnti erogate dagli operazionali

Soluzione

1. $v_o = 3\text{V}$, $I_L = 2\mu\text{A}$
2. $v_{o1} = 3\text{V}$, $v_{o2} = -2\text{V}$, $v_{o3} = 3.02\text{V}$
3. $I_{o1} = 29.7\mu\text{A}$, $I_{o2} = -49.7\mu\text{A}$, $I_{o3} = 51.7\mu\text{A}$



Esercizio 8.25

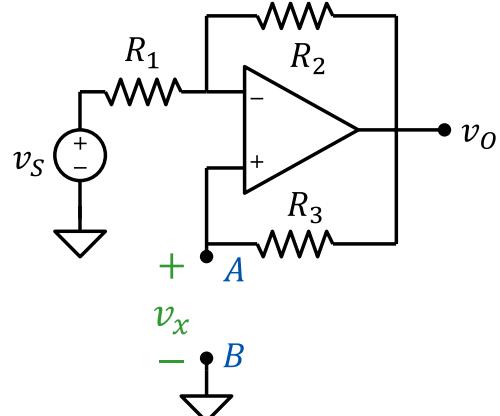
DATI: $R_1 = 5\text{k}\Omega$, $R_2 = 3\text{k}\Omega$, $R_3 = 12\text{k}\Omega$, $v_s = 2\text{V}$

Dato il circuito in figura, determinare:

1. la resistenza equivalente del circuito tra i nodi A e B.
2. Il modello equivalente di thevenin tra i nodi A e B.
3. Il modello equivalente di norton tra i nodi A e B.

Soluzione

1. $R_{EQ} = -20\text{k}\Omega$
2. $V_{TH} = 2\text{V}$, $R_{EQ} = -20\text{k}\Omega$
3. $I_N = -0.1\text{mA}$, $R_{EQ} = -20\text{k}\Omega$



Esercizio 8.26

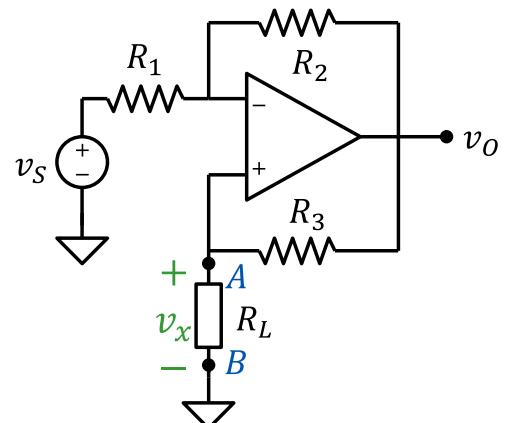
DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $R_3 = 50\text{k}\Omega$, $v_s = 1\text{V}$

Dato il circuito in figura, determinare:

1. Il modello equivalente di thevenin tra i nodi A e B.
2. Il potenziale dei nodi di ingresso e di uscita dell'AO, la corrente erogata dall'AO e il potenziale v_x usando:
 - a. $R_L = 15\text{k}\Omega$
 - b. $R_L = 50\text{k}\Omega$

Soluzione

1. $V_{TH} = 1\text{V}$, $R_{EQ} = -25\text{k}\Omega$
2. a) $v_x = -1.5\text{V}$, $v_o = -6.5\text{V}$, $I_{AO} = -0.35\text{mA}$
 b) $v_x = 2\text{V}$, $v_o = 4\text{V}$, $I_{AO} = 0.14\text{mA}$

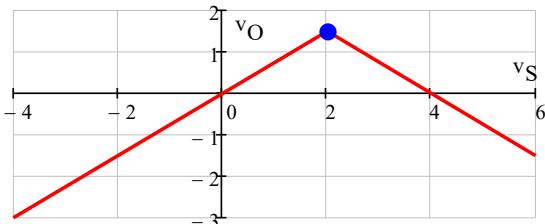


Esercizio 8.27

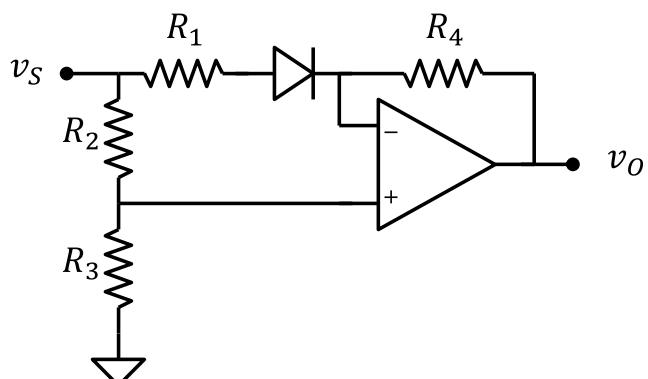
DATI: $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$, $R_3 = 30\text{k}\Omega$, $R_4 = 60\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 0.5\text{V}$

Tracciare la transcaratteristica $v_o(v_s)$ del circuito in figura e calcolare i valori di v_s e v_o corrispondenti ai punti di spezzamento.

Soluzione



Punti di spezzamento: $v_{s1} = 2\text{V}$, $v_{o1} = 1.5\text{V}$



Esercizio 8.28

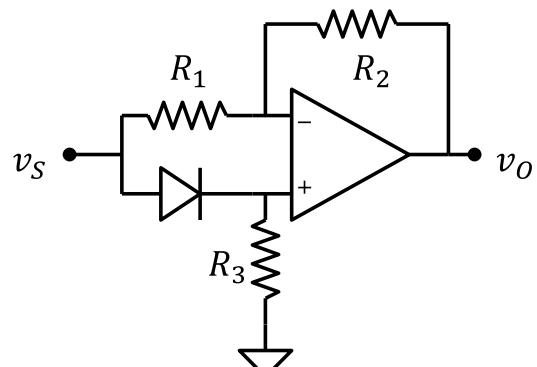
DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 30\text{k}\Omega$, $R_3 = 10\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 0\text{V}$

Tracciare la transcaratteristica $v_o(v_s)$ del circuito in figura e calcolare i valori di v_s e v_o corrispondenti ai punti di spezzamento.

Soluzione



Punti di spezzamento: $v_{s1} = 0\text{V}$, $v_{o1} = 0\text{V}$

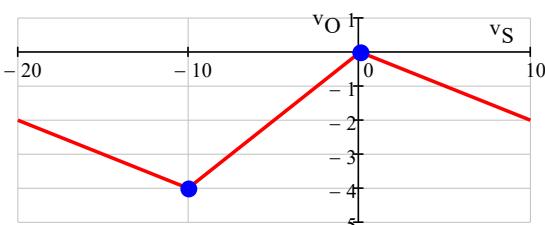


Esercizio 8.29

DATI: $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$, $R_3 = 25\text{k}\Omega$, $R_4 = 5\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 0\text{V}$, $V_Z = 5\text{V}$

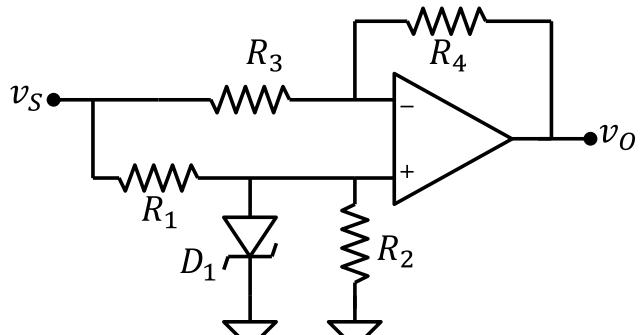
Tracciare la transcaratteristica $v_o(v_s)$ del circuito in figura e calcolare i valori di v_s e v_o corrispondenti ai punti di spezzamento.

Soluzione



Punti di spezzamento:

$v_{s1} = -10\text{V}$, $v_{o1} = -4\text{V}$; $v_{s2} = 0\text{V}$, $v_{o2} = 0\text{V}$

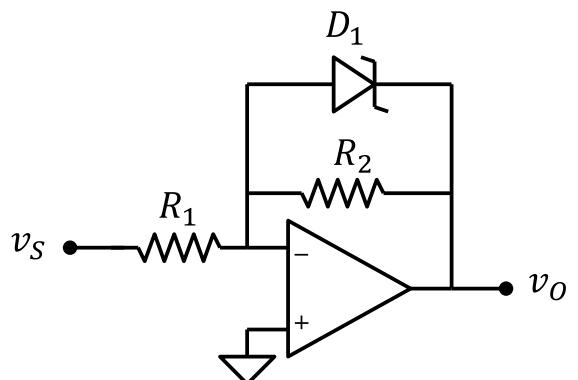
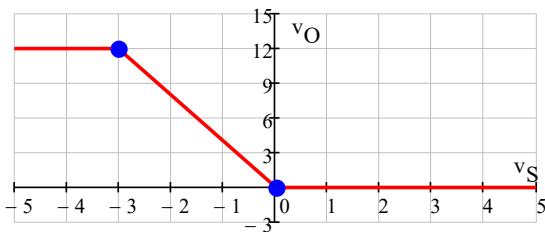


Esercizio 8.30

DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 40\text{k}\Omega$, $V_Z = 12\text{V}$, $V_{ON} = 0\text{V}$

Tracciare la transcaratteristica $v_o(v_s)$ del circuito in figura e calcolare i valori di v_s e v_o corrispondenti ai punti di spezzamento.

Soluzione



Punti di spezzamento:

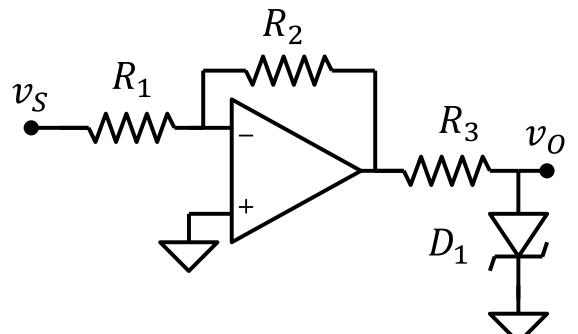
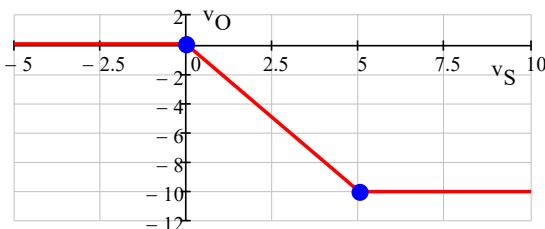
$$v_{s1} = -3\text{V}, v_{o1} = 12\text{V}; \quad v_{s2} = 0\text{V}, v_{o2} = 0\text{V}$$

Esercizio 8.31

DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $R_3 = 100\Omega$, $V_Z = 10\text{V}$, $V_{ON} = 0\text{V}$

Tracciare la transcaratteristica $v_o(v_s)$ del circuito in figura e calcolare i valori di v_s e v_o corrispondenti ai punti di spezzamento.

Soluzione



Punti di spezzamento:

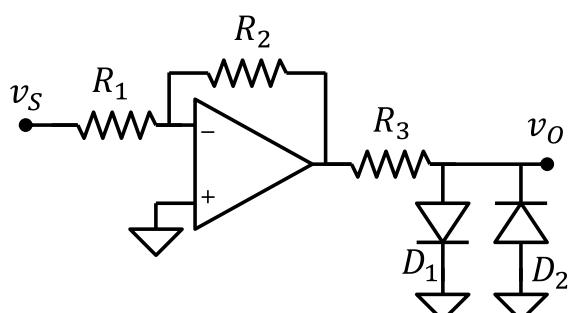
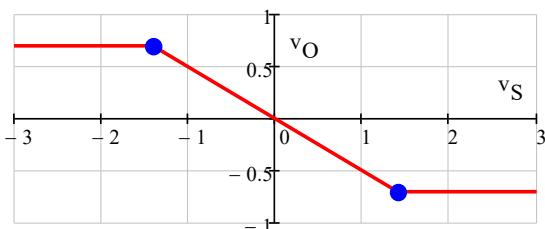
$$v_{s1} = -1.4\text{V}, v_{o1} = 0.7\text{V}; \quad v_{s2} = 1.4\text{V}, v_{o2} = -0.7\text{V}$$

Esercizio 8.32

DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 5\text{k}\Omega$, $R_3 = 100\Omega$, $V_{ON} = 0.7\text{V}$

Tracciare la transcaratteristica $v_o(v_s)$ del circuito in figura e calcolare i valori di v_s e v_o corrispondenti ai punti di spezzamento.

Soluzione



Punti di spezzamento:

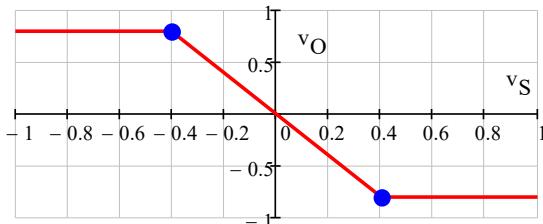
$$v_{s1} = 0\text{V}, v_{o1} = 0\text{V}; \quad v_{s2} = 5\text{V}, v_{o2} = -10\text{V}$$

Esercizio 8.33

DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 0.8\text{V}$

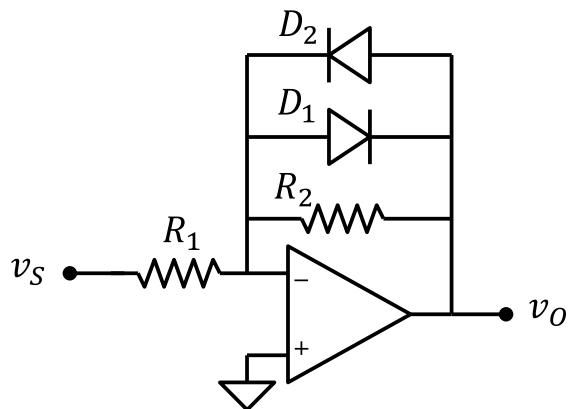
Tracciare la transcaratteristica $v_o(v_s)$ del circuito in figura e calcolare i valori di v_s e v_o corrispondenti ai punti di spezzamento.

Soluzione



Punti di spezzamento:

$$v_{s1} = -0.4\text{V}, v_{o1} = 0.8\text{V}; \quad v_{s2} = 0.4\text{V}, v_{o2} = -0.8\text{V}$$

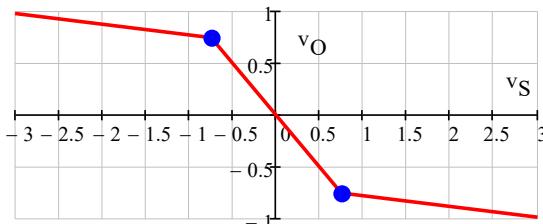


Esercizio 8.34

DATI: $R_1 = 9\text{k}\Omega$, $R_2 = 9\text{k}\Omega$, $R_3 = 1\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 0.75\text{V}$

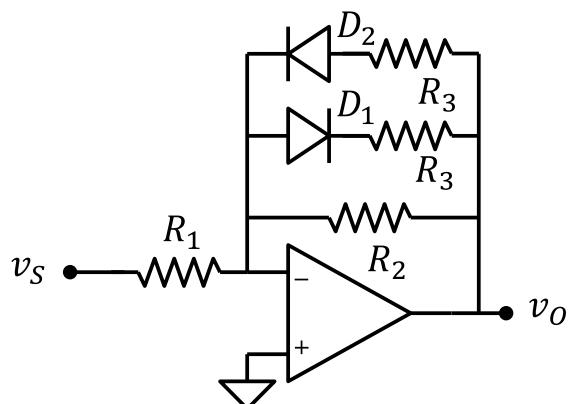
Tracciare la transcaratteristica $v_o(v_s)$ del circuito in figura e calcolare i valori di v_s e v_o corrispondenti ai punti di spezzamento.

Soluzione



Punti di spezzamento:

$$v_{s1} = -0.75\text{V}, v_{o1} = 0.75\text{V}; \quad v_{s2} = 0.75\text{V}, v_{o2} = -0.75\text{V}$$

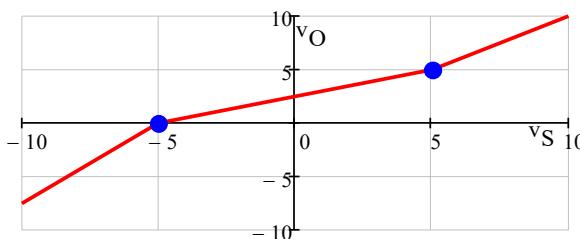


Esercizio 8.35

DATI: $R_1=1\text{k}\Omega$, $R_2=10\text{k}\Omega$, $R_3=2\text{k}\Omega$, $V_B = 5\text{V}$, $V_{ON} = 0\text{V}$

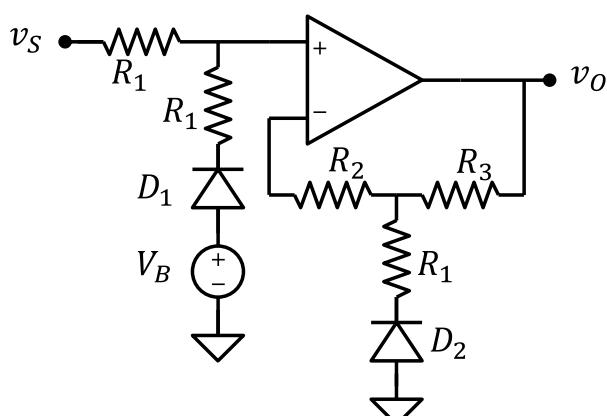
Tracciare la transcaratteristica $v_o(v_s)$ del circuito in figura e calcolare i valori di v_s e v_o corrispondenti ai punti di spezzamento.

Soluzione



Punti di spezzamento:

$$v_{s1} = -5\text{V}, v_{o1} = 5\text{V}; \quad v_{s2} = 5\text{V}, v_{o2} = 5\text{V}$$



9 Amplificatori operazionali reali

Convenzioni e notazioni

Nel seguito sono proposti alcuni esercizi sull'amplificatore operazionale (AO) ideale e reale. Saranno adottate le seguenti convenzioni:

- **Potenziali dei terminali.** Per indicare il potenziale dei tre terminali useremo: v_P per l'ingresso non invertente (+), v_N per l'ingresso invertente (-), v_O per l'uscita. Qualora vi siano più di un AO in un problema si aggiungerà a pedice il numero dell'operazionale. Ad esempio: v_{P1} , v_{P2} , v_{O1} , v_{O2} , ecc.
- **Correnti ai terminali.** Indicheremo I_O la corrente erogata/assorbita dal terminale di uscita. Useremo sempre la convenzione dei generatori per l'uscita: $I_O > 0$ corrente erogata; $I_O < 0$ corrente assorbita. Se necessario (ad esempio in presenza di non idealità) le correnti dei terminali di ingresso saranno indicate con I_N e I_P per i terminali – e + rispettivamente. Per gli ingressi useremo sempre la convenzione degli utilizzatori.
- **Massima tensione del terminale di uscita.** Se non viene specificata la tensione di alimentazione dell'AO sia assume che la tensione di uscita possa assumere qualsiasi valore. Se è specificata la tensione di alimentazione dell'AO, si assume che il potenziale del nodo di uscita saturi verso l'alto e verso il basso al valore della tensione di alimentazione positiva e negativa, rispettivamente. Ad esempio:
 - se viene specificato tra i dati che l'AO è alimentato tra +10V e -10V, sia assume che la tensione di uscita (v_O) debba essere $-10V \leq v_O \leq 10V$.
 - se viene specificato tra i dati che l'AO è alimentato tra 10V e 0V (massa), allora la tensione di uscita deve essere $0 \leq v_O \leq 10V$.
- **Massima corrente erogabile dall'AO.** Se viene specificata la massima corrente erogabile dall'AO, sarà sempre positiva e si applica al modulo della corrente erogata o assorbita. Ad esempio se si specifica $I_{OMAX} = 10mA$, si intende che l'AO può erogare una corrente massima di 10mA e assorbire una corrente massima (in modulo) di -10mA. In altre parole che la corrente I_O entrante o uscente dal terminale di uscita è $-I_{OMAX} \leq I_O \leq I_{OMAX}$. Se non viene specificata la corrente massima, si intende che l'operazionale può erogare qualsiasi corrente.
- **Tensione di offset.** Se specificato, il valore della tensione di offset (V_{OS}) si riferisce alla tensione da sommare al terminale non invertente (+) dell'AO per ottenere tensione nulla all'uscita, cioè tale che $v_O(v_P + V_{OS} - v_N) = 0$. In altre parole, l'AO fornisce tensione nulla in uscita se $v_{ID} = v_P - v_N = -V_{OS}$. Se non specificata, la tensione di offset si intende nulla.
- **Correnti di polarizzazione complessiva dei terminali.** Se vengono specificate le correnti di polarizzazione dei due terminali sono: I_{BN} (per il terminale invertente) e I_{BP} (per il terminale non invertente).
- **Corrente di offset.** Se è specificata la corrente di offset (I_{OS}) sarà intesa come $I_{BP} - I_{BN}$. Se non specificata si sottintende $I_{OS} = 0$.
- **Guadagno di modo differenziale.** Se non specificato, il guadagno dell'AO è considerato infinito. Se specificato sarà sempre positivo e sarà indicato con A .
- **CMRR.** Se non specificato, il CMRR dell'AO è considerato infinito. Se specificato insieme al guadagno differenziale, assumeremo che il guadagno di modo comune sia $A_c = A/CMRR$.

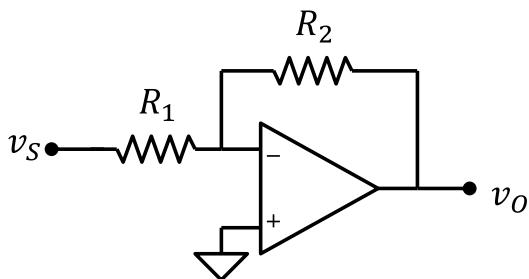
Esercizio 9.1

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 6.8\text{k}\Omega$

AO: Tensione di alimentazione $\pm V_{DD} = \pm 10\text{V}$.

Calcolare la tensione di uscita e del terminale invertente con:

1. $v_S = 1\text{V}$
2. $v_S = -2\text{V}$



Soluzione

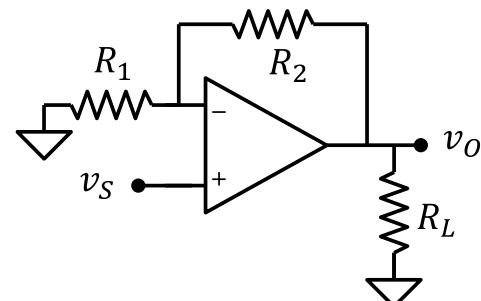
1. $v_O = -6.8\text{V}$, $v_N = 0\text{V}$
2. $v_O = 10\text{V}$, $v_N = -0.46\text{V}$

Esercizio 9.2

DATI: $R_L = 10\text{k}\Omega$

AO: Corrente massima $I_{OMAX} = 1.5\text{mA}$. Tensione di alimentazione $\pm V_{DD} = \pm 10\text{V}$.

Calcolare i valori minimi di R_1 e R_2 tali che il circuito funzioni correttamente con un guadagno $A_v = 100$.



Soluzione

$$R_1 = 200\Omega, R_2 = 19.8\text{k}\Omega$$

Esercizio 9.3

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 8\text{k}\Omega$

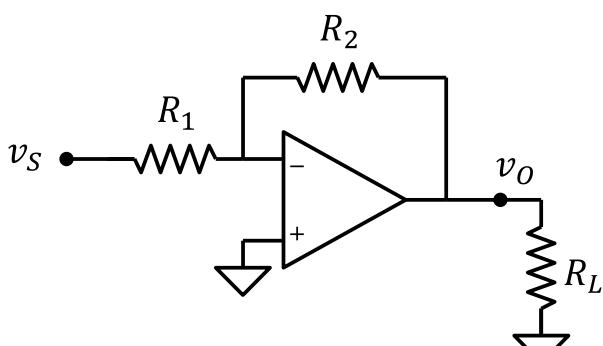
AO: Corrente massima $I_{OMAX} = 4\text{mA}$. Tensione di alimentazione $\pm V_{DD} = \pm 12\text{V}$.

Dato il circuito in figura, assumendo sempre nulla la corrente assorbita dall'amplificatore operazionale, calcolare:

1. La tensione di uscita del circuito e la tensione del terminale non invertente in assenza di carico esterno con segnale di ingresso pari a:
 - a. $v_S = -0.1\text{V}$
 - b. $v_S = -0.5\text{V}$
 - c. $v_S = -1\text{V}$
 - d. $v_S = -2\text{V}$
 - e. $v_S = 5\text{V}$
2. Ripetere il punto 1 includendo un carico esterno $R_L = 2\text{k}\Omega$

Soluzione

1. a) $v_O = 0.8\text{V}$, $v_N = 0\text{V}$;
b) $v_O = 4\text{V}$, $v_N = 0\text{V}$;
c) $v_O = 8\text{V}$, $v_N = 0\text{V}$;
d) $v_O = 12\text{V}$, $v_N = -0.44\text{V}$;
e) $v_O = -12\text{V}$, $v_N = 3.11\text{V}$
2. a) $v_O = 0.8\text{V}$, $v_N = 0\text{V}$;
b) $v_O = 4\text{V}$, $v_N = 0\text{V}$;
c) $v_O = 6.36\text{V}$, $v_N = -0.18\text{V}$
d) $v_O = 6.18\text{V}$, $v_N = -1.09\text{V}$;
e) $v_O = -5.64\text{V}$, $v_N = 3.82\text{V}$



Esercizio 9.4

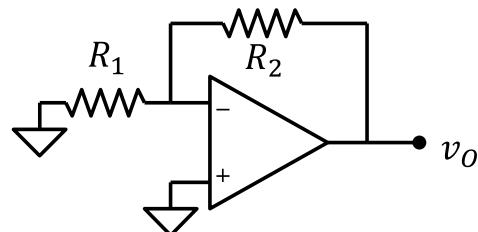
DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 39\text{k}\Omega$

AO: $V_{OS} = 5\text{mV}$.

Calcolare la tensione di uscita del circuito

Soluzione

$$v_o = 200\text{mV}$$



Esercizio 9.5

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 39\text{k}\Omega$, $R_B = 3\text{k}\Omega$

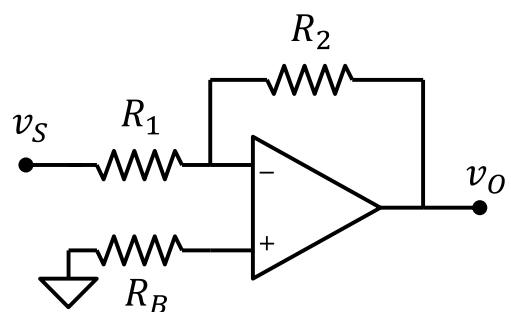
AO: $I_{BP} = 100\text{nA}$, $I_{OS} = 2\text{nA}$.

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. la tensione di uscita con $v_s = 0\text{V}$
2. la tensione di uscita con $v_s = 10\text{mV}$
3. Il valore di R_B per ridurre l'effetto della corrente di bias.
4. La tensione di uscita con $v_s = 0$ e il nuovo valore di R_B

Soluzione

1. $v_o = -8.2 \text{ mV}$
2. $v_o = 391.8 \text{ mV}$
3. $R_B = 975 \Omega$
4. $v_o = -100 \mu\text{V}$



Esercizio 9.6

DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 100\text{k}\Omega$, $R_B = 10\text{k}\Omega$, $v_s = 0\text{V}$

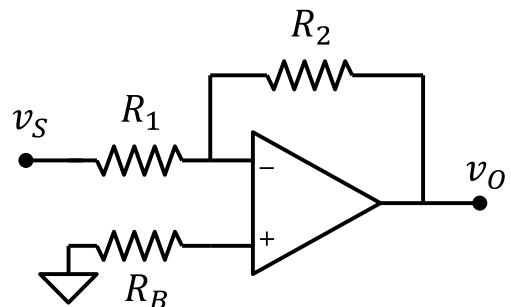
AO: $V_{OS} = -1\text{mV}$, $I_{BP} = 100\text{nA}$, $I_{BN} = 95\text{nA}$.

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. La tensione di uscita supponendo l'operazionale ideale
2. La tensione di uscita considerando le non idealità
3. Il valore di R_B per ridurre l'effetto della corrente di bias.
4. La tensione di uscita con il nuovo valore di R_B

Soluzione

1. $v_o = 0\text{V}$
2. $v_o = -26\text{mV}$
3. $R_B = 90.9\text{k}\Omega$
4. $v_o = -16\text{mV}$



Esercizio 9.7

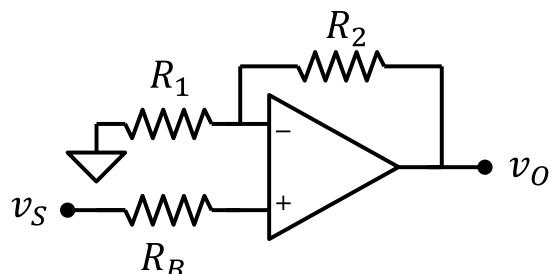
DATI: $R_B = 10\text{k}\Omega$; AO: $I_{BP} = I_{BN} = 10\text{nA}$.

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. Le resistenze R_1 e R_2 in modo tale da ridurre l'effetto di I_{BIAS} e il guadagno del circuito sia $A_v = 100$.
2. La tensione di uscita con $v_s = 0$.

Soluzione

1. $R_1 = 10.1\text{k}\Omega$, $R_2 = 1\text{M}\Omega$
2. $v_o = 0\text{V}$



Esercizio 9.8

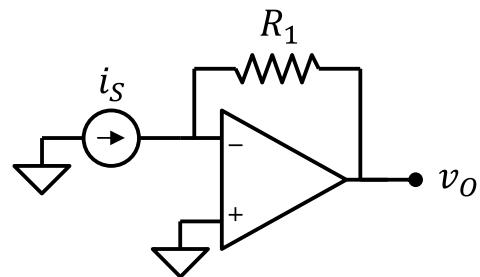
DATI: $R_1 = 100\text{k}\Omega$, $i_S = 20\mu\text{A}$

AO: $V_{OS} = 2\text{mV}$, $I_{BP} = 150\text{nA}$, $I_{BN} = 120\text{nA}$.

Calcolare la tensione di uscita del circuito. Quanto sarebbe se l'amplificatore operazionale fosse ideale?

Soluzione

$$v_O = -1.983\text{mV} \text{ (idealmente } v_O = -2\text{mV)}$$



Esercizio 9.9

DATI: $R_1 = 200\text{k}\Omega$, $R_2 = 40\text{k}\Omega$, $i_S = 15\mu\text{A}$

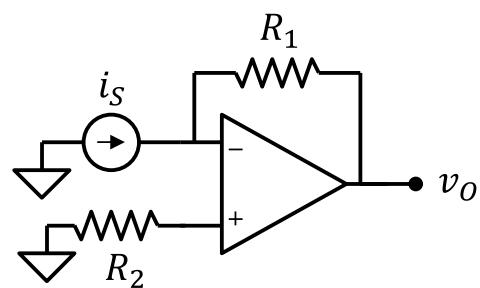
AO: $V_{OS} = -2\text{mV}$, $I_{BP} = 100\text{nA}$, $I_{BN} = 120\text{nA}$.

Dato il circuito in figura:

1. Calcolare la tensione di uscita del circuito.
2. Determinare il valore di R_2 che annulla l'effetto delle correnti di bias

Soluzione

1. $v_O = -3.984\text{V}$
2. $R_2 = 160\text{k}\Omega$



Esercizio 9.10

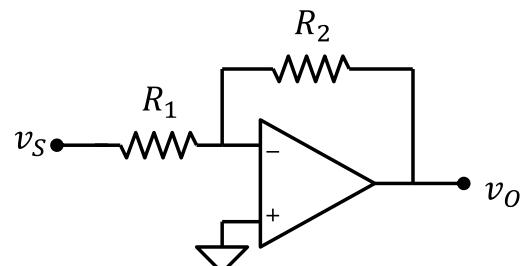
DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 220\text{k}\Omega$, $v_S = 10\text{mV}$

AO: Guadagno di modo differenziale $A = 10^4$.

Calcolare la tensione di uscita del circuito. Quanto sarebbe se il guadagno fosse infinito?

Soluzione

$$v_O = -2.15\text{V} \text{ (idealmente } v_O = -2.2\text{V)}$$



Esercizio 9.11

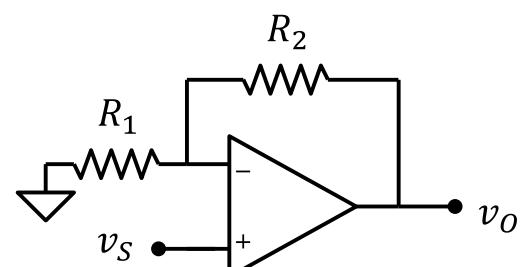
DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 220\text{k}\Omega$, $v_S = 10\text{mV}$

AO: $A = 10^4$.

Calcolare la tensione di uscita del circuito. Quanto sarebbe se trascurassimo l'effetto delle non idealità

Soluzione

$$v_O = 2.16\text{V} \text{ (idealmente } v_O = 2.21\text{V)}$$



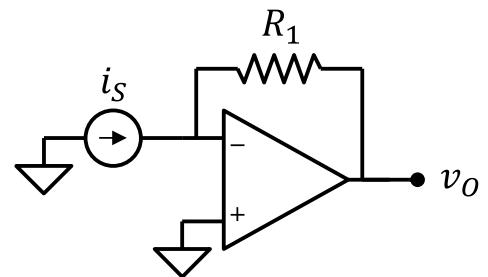
Esercizio 9.12

DATI: $R_1 = 10k\Omega$, $i_S = 0.5mA$

AO: $A = 10^3$.

Dato il circuito in figura:

1. Calcolare la tensione di uscita e il guadagno di transresistenza del circuito.
2. Quanto sarebbero il guadagno e la tensione se trascurassimo l'effetto delle non idealità



Soluzione

1. $v_O = -4.995V$; $R_m = -9.99k\Omega$
2. $v_O = -5V$; $R_m = -10k\Omega$

Esercizio 9.13

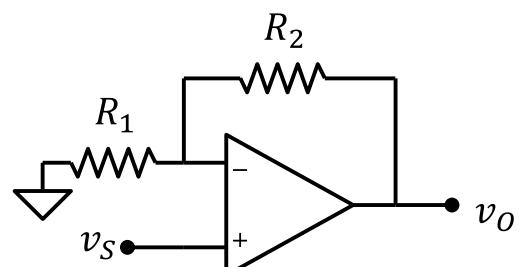
DATI: $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 99k\Omega$, $v_S = 50mV$

AO: CMRR = 100.

Calcolare la tensione di uscita del circuito. Quanto sarebbe la tensione di uscita, se il CMRR fosse infinito?

Soluzione

$$v_O = 5.05V \text{ (idealmente } v_O = 5V)$$



Esercizio 9.14

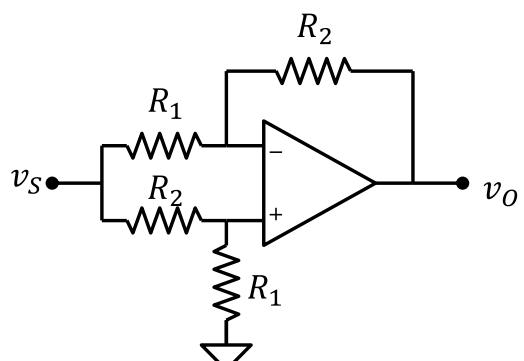
DATI: $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 9k\Omega$, $v_S = 0.5mV$;

AO: CMRR = 100.

Calcolare la tensione di uscita del circuito. Quanto sarebbe la tensione di uscita, se il CMRR fosse infinito?

Soluzione

$$v_O = -3.995V \text{ (idealmente } v_O = -4V)$$



Esercizio 9.15

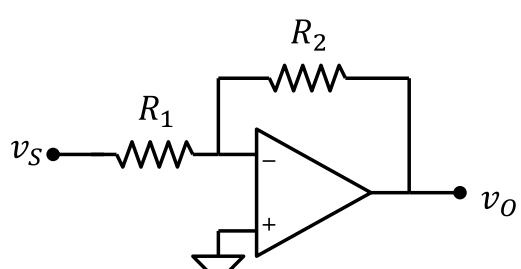
DATI: $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$; AO: Tensione di alimentazione $\pm V_{CC} = \pm 20V$, $V_{OS} = 0.1V$

Calcolare la tensione di uscita del circuito con:

1. $v_S = 1V$
2. $v_S = 2V$
3. $v_S = -2V$

Soluzione

1. $v_O = -8.9V$
2. $v_O = -18.9V$
3. $v_O = 20V$



Esercizio 9.16

DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 90\text{k}\Omega$; $R_B = 50\text{k}\Omega$

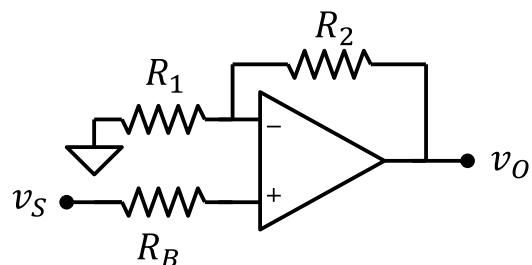
AO: $V_{OS} = 1\text{mV}$, $I_{BP} = I_{BN} = 100\text{nA}$

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. La tensione di uscita assumendo $v_S = 0\text{V}$
2. Il valore di v_S tale da annullare la tensione di uscita

Soluzione

1. $v_O = -31\text{mV}$
2. $v_S = 3.1\text{mV}$



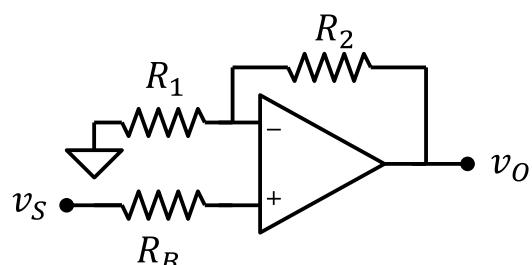
Esercizio 9.17

DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$;

AO: $V_{OS} = 2\text{mV}$, $I_{BP} = I_{BN} = 100\text{nA}$, $\text{CMRR} = 40$

Dato il circuito in figura, calcolare:

1. La tensione di uscita assumendo $R_B = 0\Omega$ e $v_S = 0\text{V}$
2. La tensione di uscita assumendo $R_B = 10\text{k}\Omega$ e $v_S = 0\text{V}$
3. Il valore di v_S tale da annullare la tensione di uscita nelle condizioni del punto 2



Soluzione

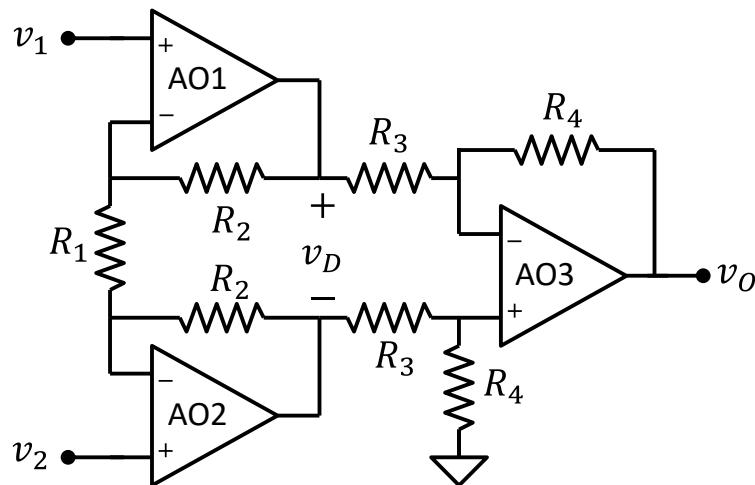
1. $v_O = 5\text{mV}$
2. $v_O = 2.95\text{mV}$
3. $v_S = -1.44\text{mV}$

Esercizio 9.18

DATI: $R_1 = 2\text{k}\Omega$, $R_2 = 49\text{k}\Omega$, $R_3 = 5\text{k}\Omega$, $R_4 = 10\text{k}\Omega$, $v_1 = 2\text{V}$, $v_2 = 2.1\text{V}$

Dato il circuito in figura, calcolare la tensione di uscita v_O e la tensione v_D :

1. assumendo tutti gli AO ideali.
2. assumendo che tutti gli AO abbiano $V_{OS} = 5\text{mV}$ e $\text{CMRR} = 100$
3. assumendo che tutti gli AO abbiano $V_{OS} = 5\text{mV}$, $\text{CMRR} = 100$ e $I_{BN} = I_{BP} = 100\text{nA}$



Soluzione

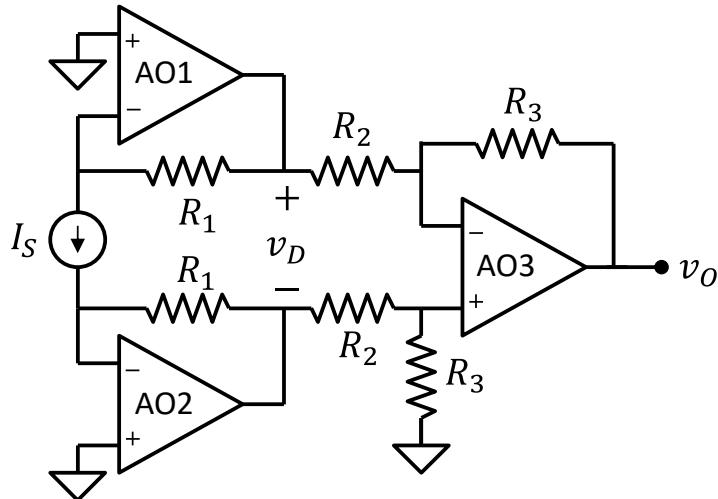
1. $v_O = 10\text{V}$, $v_D = -5\text{V}$
2. $v_O = 10.20701\text{V}$, $v_D = -5.05\text{V}$
3. $v_O = 10.20711\text{V}$, $v_D = -5.05\text{V}$

Esercizio 9.19

DATI: $R_1 = 45\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$, $R_3 = 10\text{k}\Omega$, $I_S = 0.1\text{mA}$

Dato il circuito in figura, calcolare la tensione di uscita v_O e la tensione v_D :

1. assumendo tutti gli AO ideali.
2. assumendo che tutti gli AO abbiano $V_{OS} = 10\text{mV}$ e $CMRR = 100$
3. Quanto vale la tensione di uscita v_O nelle condizioni del punto 2 se $I_S = 0$?



Soluzione

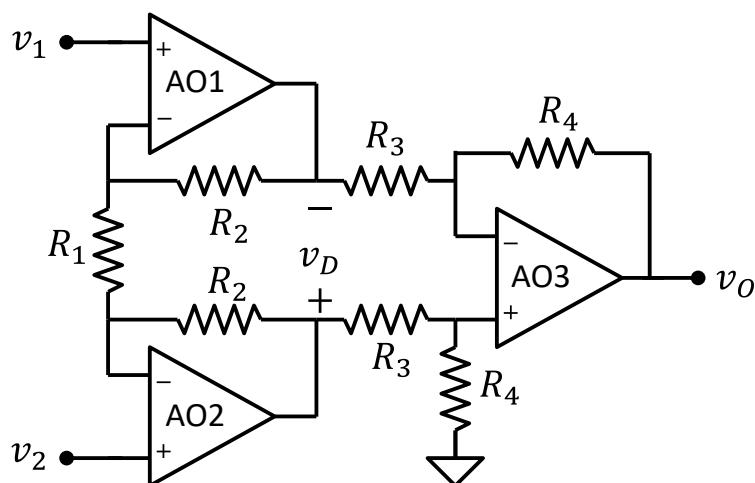
1. $v_O = 9\text{V}$, $v_D = -9\text{V}$
2. $v_O = 9\text{V}$, $v_D = -9.0249\text{V}$
3. $v_O = 20.1\text{mV}$

Esercizio 9.20

DATI: $R_1 = 12\text{k}\Omega$, $R_2 = 54\text{k}\Omega$, $R_3 = 50\text{k}\Omega$, $R_4 = 150\text{k}\Omega$, $v_1 = 2\text{V}$, $v_2 = 2.5\text{V}$

Dato il circuito in figura, calcolare la tensione di uscita v_O e la tensione v_D :

1. assumendo tutti gli AO ideali.
2. assumendo che tutti gli AO abbiano $I_{BN} = I_{BP} = 100\text{nA}$
3. assumendo che tutti gli AO abbiano $I_{BN} = 80\text{nA}$ e $I_{BP} = 120\text{nA}$



Soluzione

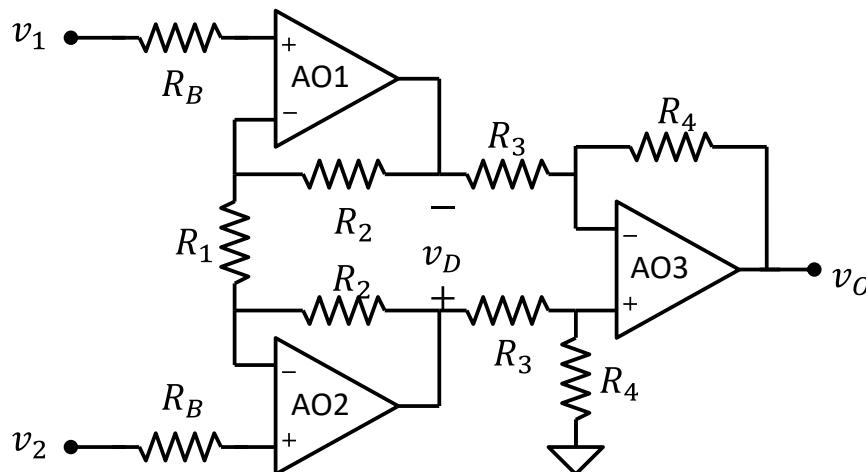
1. $v_O = 5\text{V}$, $v_D = 15\text{V}$
2. $v_O = 5\text{V}$, $v_D = 15\text{V}$
3. $v_O = 5\text{V}$, $v_D = 14.994\text{V}$

Esercizio 9.21

DATI: $R_1 = 6\text{k}\Omega$, $R_2 = 240\text{k}\Omega$, $R_3 = 50\text{k}\Omega$, $R_4 = 100\text{k}\Omega$, $v_1 = 1\text{V}$, $v_2 = 1.1\text{V}$

Dato il circuito in figure:

- Calcolare la tensione di uscita v_o , la tensione di modo differenziale v_D e la tensione di modo comune all'uscita del primo stadio, assumendo tutti gli AO ideali.
- Assumendo che tutti gli AO abbiano $I_{BN} = 80\text{nA}$ e $I_{BP} = 120\text{nA}$, calcolare il valore della resistenza R_B che annulla l'effetto della corrente di bias.



Soluzione

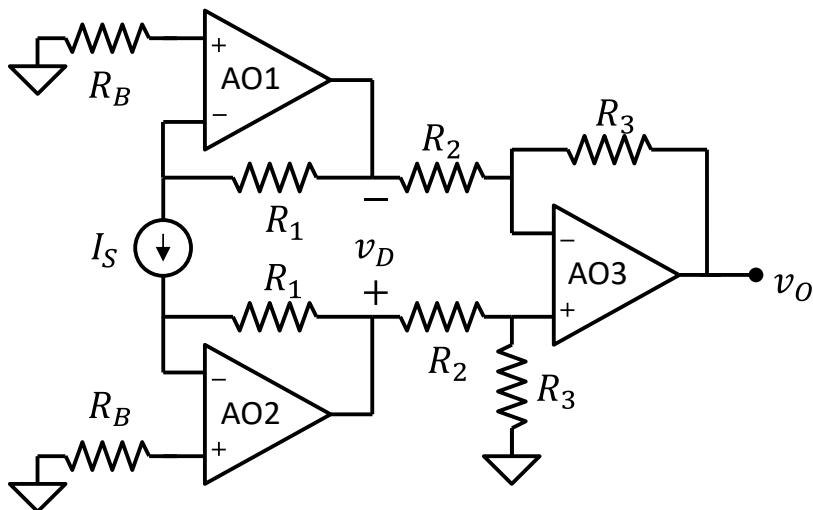
- $v_o = 16.2\text{V}$, $v_D = 8.1\text{V}$, $v_C = 1.05\text{V}$
- $R_B = 160\text{k}\Omega$

Esercizio 9.22

DATI: $R_1 = 300\text{k}\Omega$, $R_2 = 100\text{k}\Omega$, $R_3 = 100\text{k}\Omega$, $I_S = 10\mu\text{A}$

Dato il circuito in figure:

- Calcolare la tensione di uscita v_o , la tensione di modo differenziale v_D e la tensione di modo comune all'uscita del primo stadio, assumendo tutti gli AO ideali.
- Assumendo che tutti gli AO abbiano $I_{BN} = 100\text{nA}$ e $I_{BP} = 100\text{nA}$, calcolare il valore della resistenza R_B che annulla l'effetto della corrente di bias.

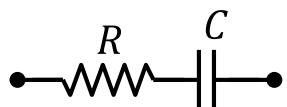


Soluzione

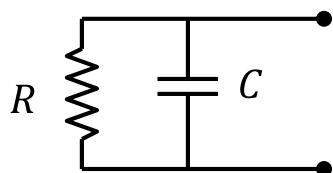
- $v_o = -6\text{V}$, $v_D = -6\text{V}$, $v_C = 0\text{V}$
- $R_B = 100\text{k}\Omega$

10 Filtri con operazionali

Esempi di impedenze di circuiti RC

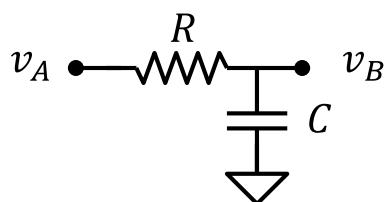


$$Z = R + \frac{1}{j\omega C} = \frac{1 + j\omega RC}{j\omega C}$$

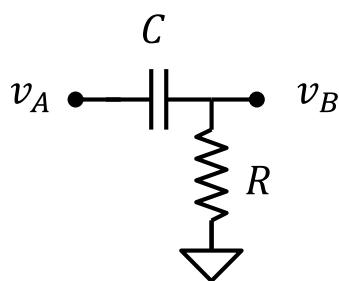


$$Z = \frac{\frac{R}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega RC}$$

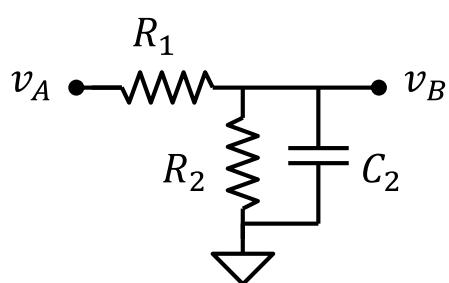
Regola del partitore di tensione applicata ad alcuni circuiti RC



$$v_B = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} v_A = \frac{1}{1 + j\omega RC} v_A$$



$$v_B = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} v_A = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} v_A$$



$$v_B = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \frac{1}{1 + j\omega \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_2} v_A$$

Esercizio 10.1

Tracciare il diagramma di Bode di modulo e fase delle seguenti funzioni:

$$a) W(s) = A \frac{1 + \frac{s}{\omega_z}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{P3}}\right)}$$

$$\begin{aligned}A &= 100; \\ \omega_z &= 10 \text{ rad/s}, \omega_{P1} = 100 \text{ rad/s}, \\ \omega_{P2} &= 10^4 \text{ rad/s}, \omega_{P3} = 10^6 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

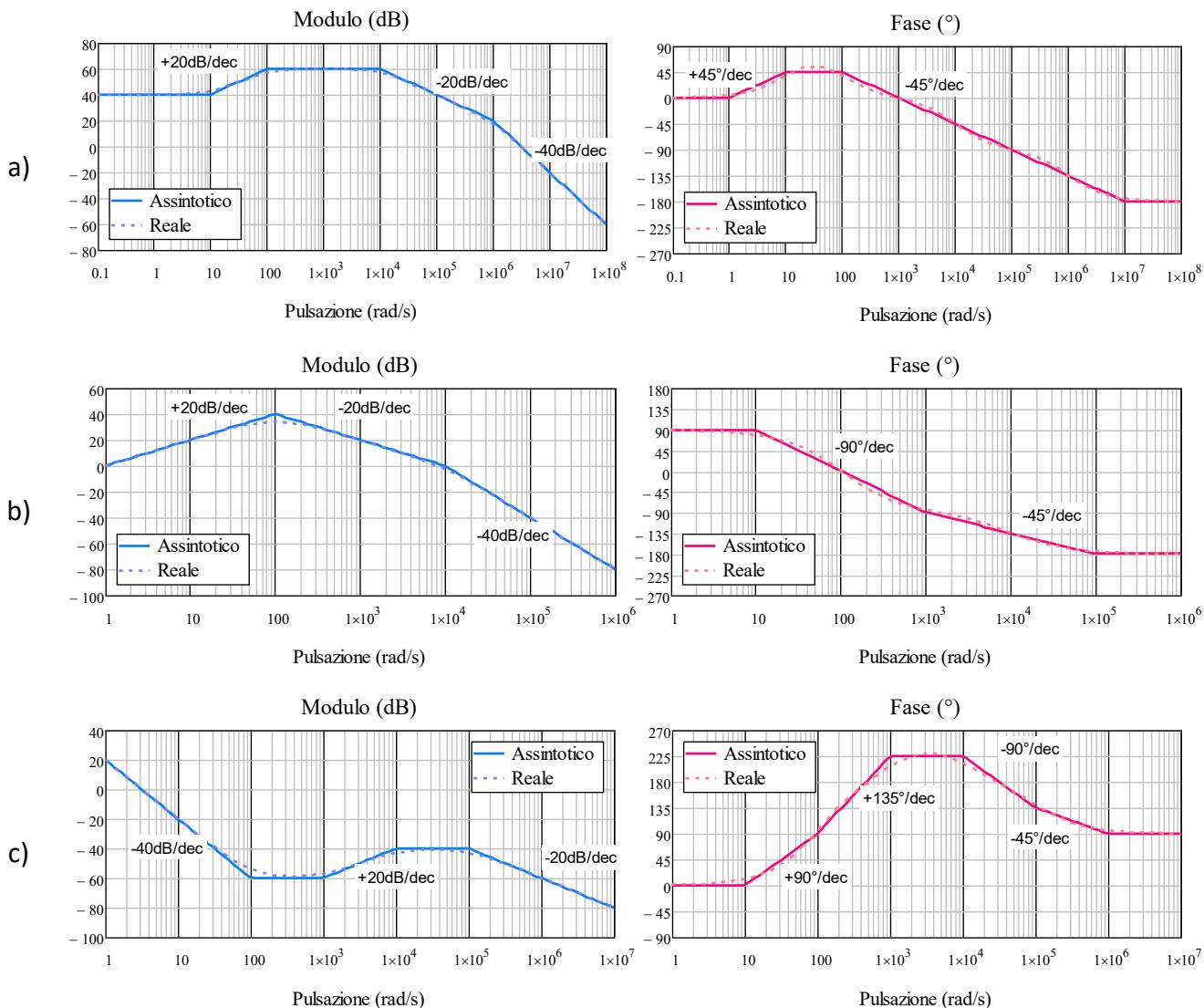
$$b) W(s) = A \frac{\frac{s}{\omega_0}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right)^2 \left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right)}$$

$$\begin{aligned}A &= 1 \\ \omega_0 &= 1 \text{ rad/s} \\ \omega_{P1} &= 100 \text{ rad/s}, \omega_{P2} = 10^4 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

$$c) W(s) = A \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{Z1}}\right)^2 \left(1 + \frac{s}{\omega_{Z2}}\right)}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 \left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right)}$$

$$\begin{aligned}A &= -10, \\ \omega_0 &= 1 \text{ rad/s}, \\ \omega_{Z1} &= 100 \text{ rad/s}, \omega_{Z2} = 10^3 \text{ rad/s}, \\ \omega_{P1} &= 10^4 \text{ rad/s}, \omega_{P2} = 10^5 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

Soluzione



Esercizio 10.2

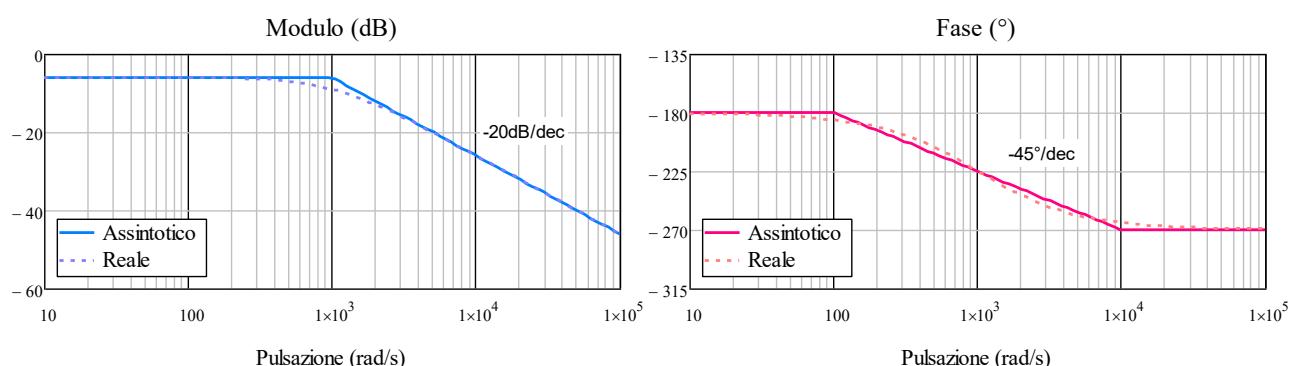
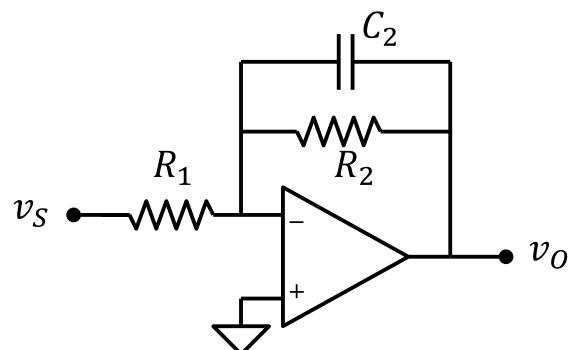
DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 5\text{k}\Omega$, $C_2 = 200\text{nF}$;

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale, determinare la funzione di trasferimento e tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase.

Soluzione

$$W(s) = A \frac{1}{(1 + \frac{s}{\omega_p})}$$

$$A = -0.5, \omega_p = 10^3\text{rad/s}$$



Esercizio 10.3

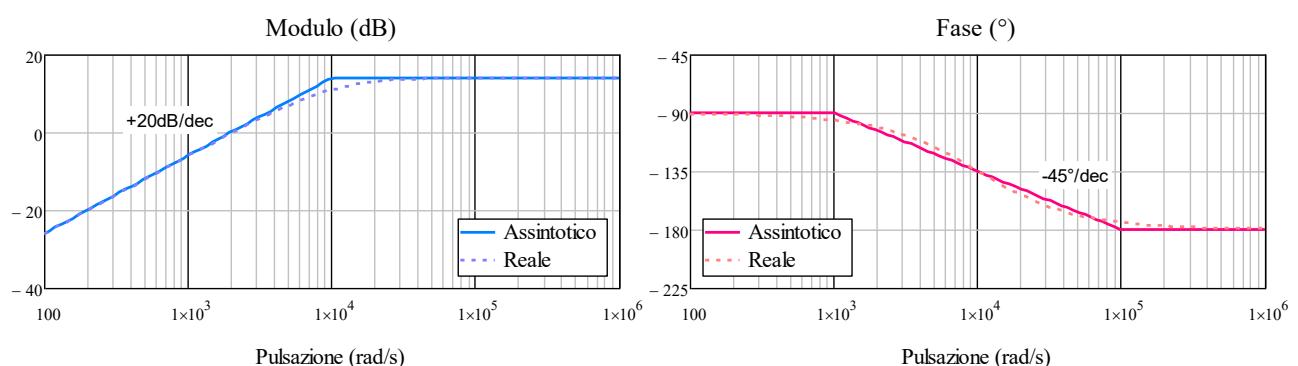
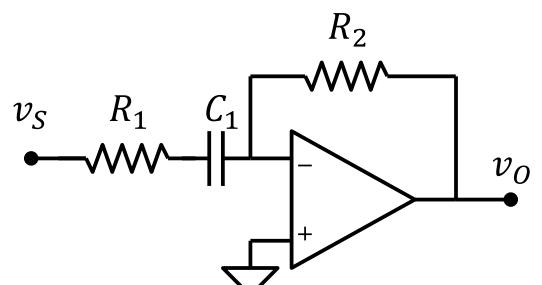
DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 50\text{k}\Omega$, $C_1 = 10\text{nF}$;

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale, determinare la funzione di trasferimento e tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase.

Soluzione

$$W(s) = A \frac{\frac{s}{\omega_p}}{(1 + \frac{s}{\omega_p})}$$

$$A = -5, \omega_p = 10^4\text{rad/s}$$



Esercizio 10.4

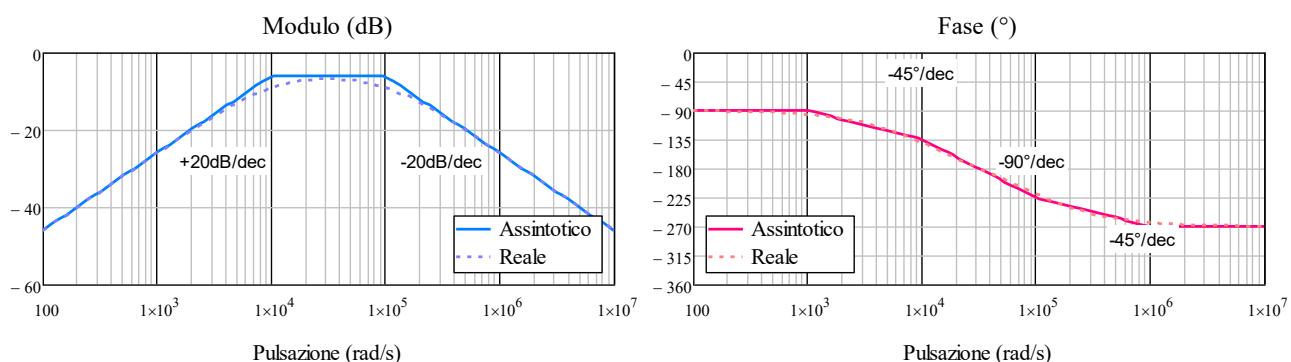
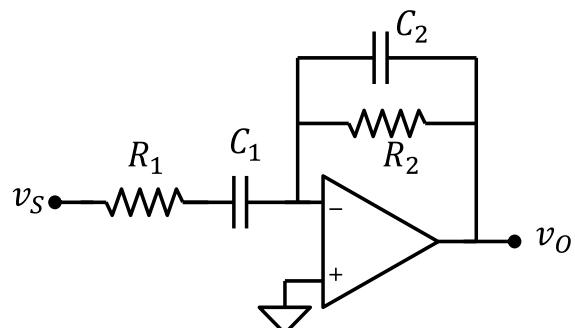
DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 5\text{k}\Omega$, $C_1 = 10\text{nF}$, $C_2 = 2\text{nF}$;

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale, determinare la funzione di trasferimento e tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase.

Soluzione

$$W(s) = A \frac{\frac{s}{\omega_{p1}}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)}$$

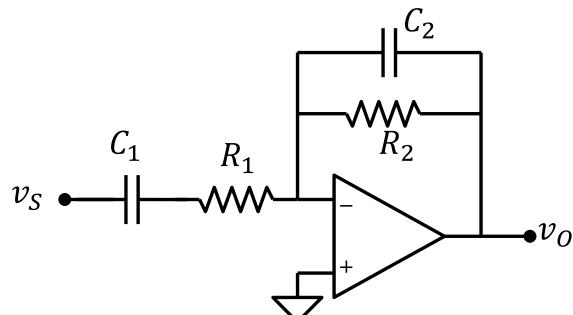
$$A = -0.5, \omega_{p1} = 10^4\text{rad/s}, \omega_{p2} = 10^5\text{rad/s},$$



Esercizio 10.5

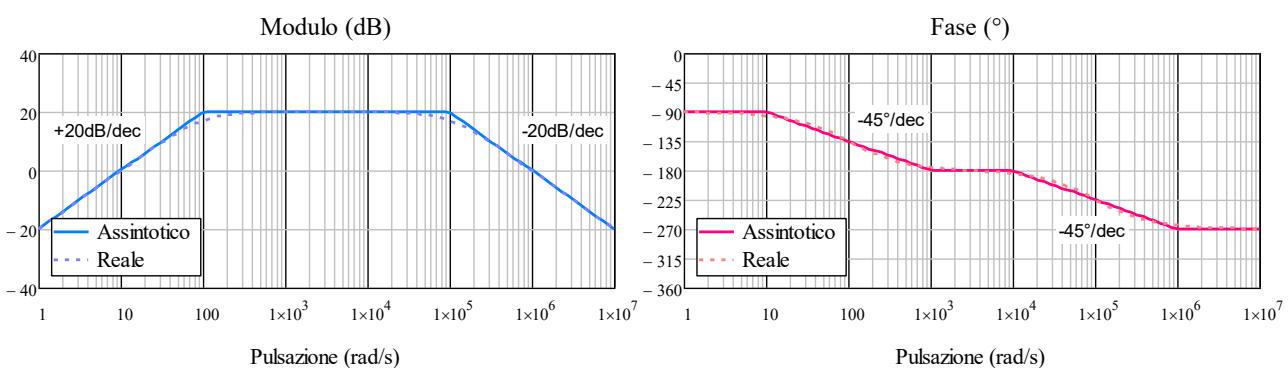
Dato il filtro passa-banda in figura:

- Dimensionare le resistenze R_1 e R_2 e le capacità C_1 e C_2 in modo tale che la banda dia compresa tra $\omega_L = 100\text{rad/s}$ $\omega_H = 10^5\text{rad/s}$, il guadagno al centro della banda sia $A_v = 20\text{dB}$ e la resistenza di ingresso misurata con $\omega \gg \omega_H$ sia $R_{IN} = 10\text{k}\Omega$.
- Tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase



Soluzione

- $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 100\text{k}\Omega$, $C_1 = 1\mu\text{F}$, $C_2 = 0.1\text{nF}$
- Diagramma di bode



Esercizio 10.6

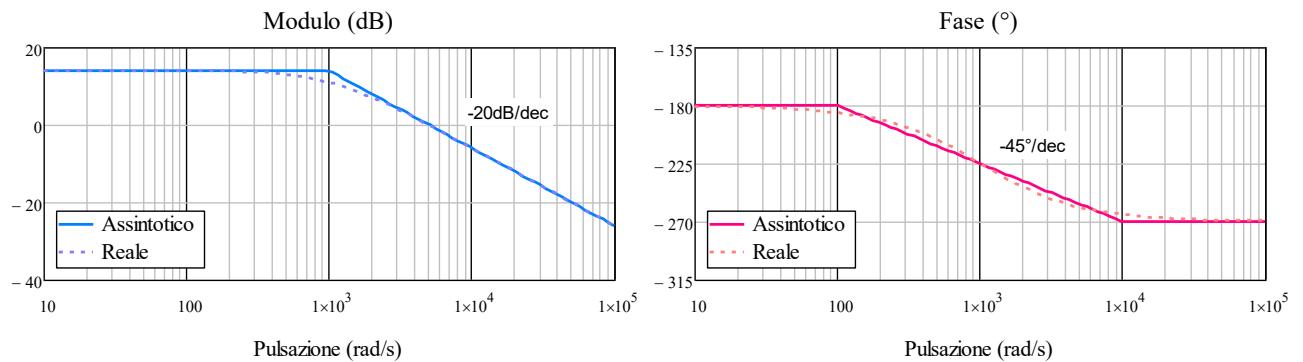
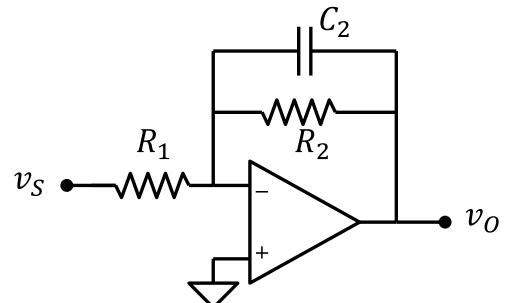
DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$

Dato il circuito in figura che realizza un filtro passa-basso con un amplificatore operazionale ideale:

- Calcolare il valore di R_1 affinché il guadagno in banda abbia modulo 5
- Calcolare il valore di C_2 affinché la frequenza di taglio sia $\omega_T = 1000\text{rad/s}$
- Tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase

Soluzione

- $R_1 = 2\text{k}\Omega$
- $C_2 = 1200\text{nF}$
- Diagramma di Bode



Esercizio 10.7

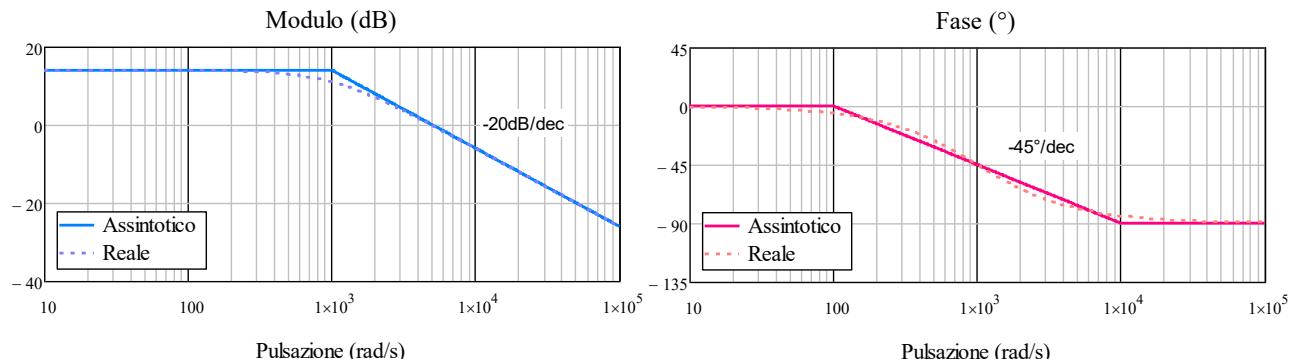
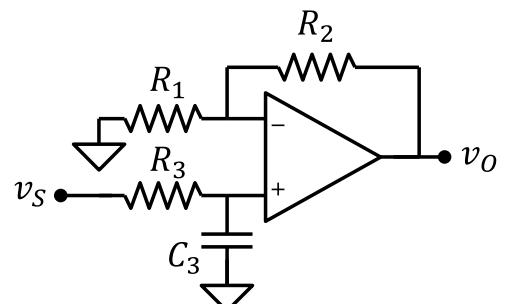
DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_3 = 20\text{k}\Omega$

Dato il circuito in figura che realizza un filtro passa-basso non invertente:

- Trovare la funzione di trasferimento.
- Calcolare il valore di R_2 affinché il guadagno a bassa frequenza sia 5
- Calcolare il valore di C_3 affinché il polo sia a 1000 rad/s
- Tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase

Soluzione

- $W(s) = \frac{A}{1+s/\omega_P}$
- $R_2 = 40\text{k}\Omega$
- $C_3 = 50\text{nF}$
- Diagramma di Bode



Esercizio 10.8

DATI: $R_1 = R_2 = 100\text{k}\Omega$, $R_3 = 100\Omega$, $C_3 = 20\mu\text{F}$

Dato il circuito in figura che realizza un filtro passa-basso non invertente:

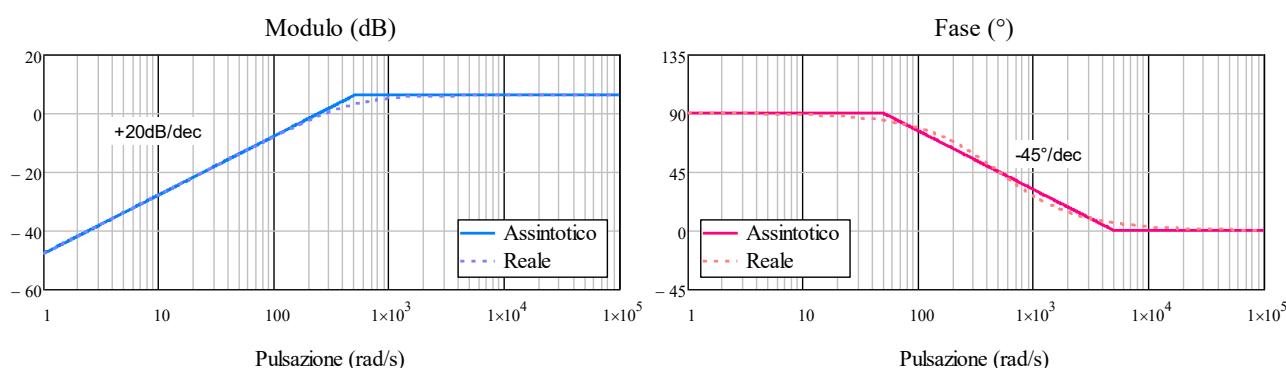
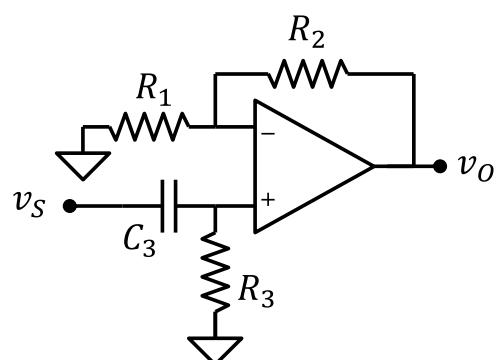
1. Trovare la funzione di trasferimento
2. Tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase

Soluzione

1. Funzione di trasferimento ($A = 2$, $\omega_p = 100\text{rad/s}$)

$$W(s) = A \frac{\frac{s}{\omega_p}}{(1 + \frac{s}{\omega_p})} = 2 \frac{\frac{s}{100}}{1 + \frac{s}{100}}$$

2. Diagramma di Bode



Esercizio 10.9

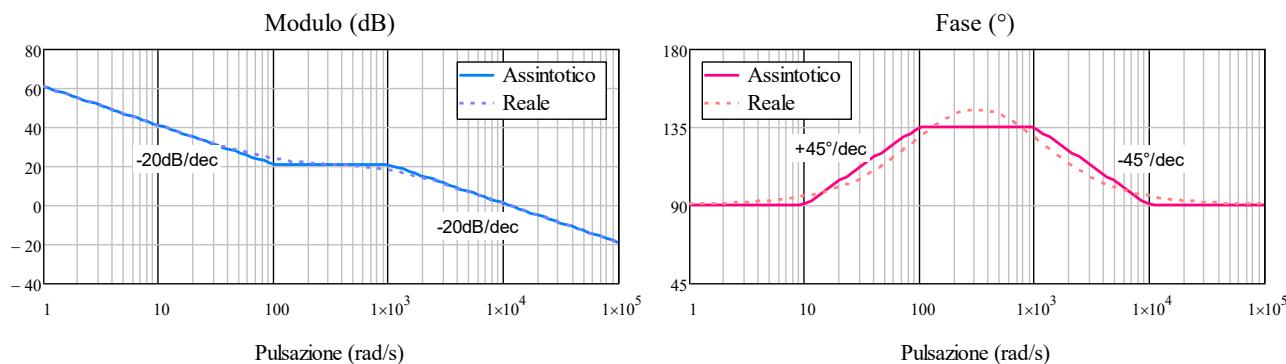
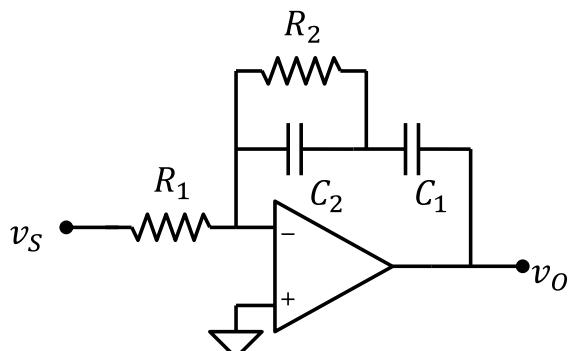
DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$, $C_1 = 990\text{nF}$, $C_2 = 10\text{nF}$

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale, determinare la funzione di trasferimento e tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase.

Soluzione

$$W(s) = -\frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right)}{\frac{s}{\omega_0}\left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right)}$$

$$\omega_0 = 1.11 \cdot 10^3 \text{ rad/s}, \omega_{z1} = 100 \text{ rad/s}, \omega_{p1} = 10^3 \text{ rad/s},$$



Esercizio 10.10

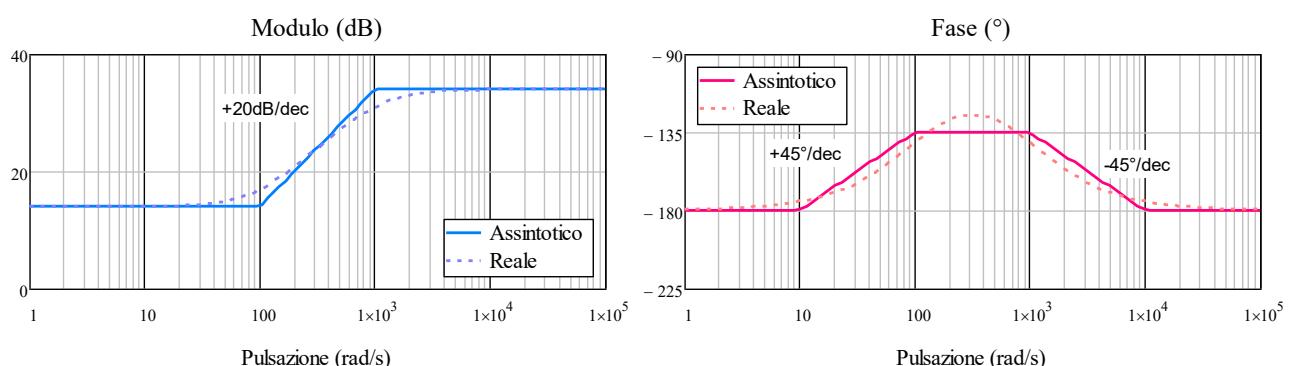
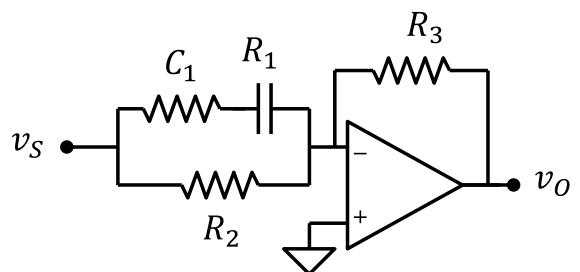
DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 9\text{k}\Omega$, $R_3 = 45\text{k}\Omega$; $C_1 = 1\mu\text{F}$

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale, determinare la funzione di trasferimento e tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase.

Soluzione

$$W(s) = A \frac{1 + \frac{s}{\omega_Z}}{1 + \frac{s}{\omega_P}}$$

$A = -5$, $\omega_Z = 100\text{rad/s}$, $\omega_P = 1000\text{rad/s}$,



Esercizio 10.11

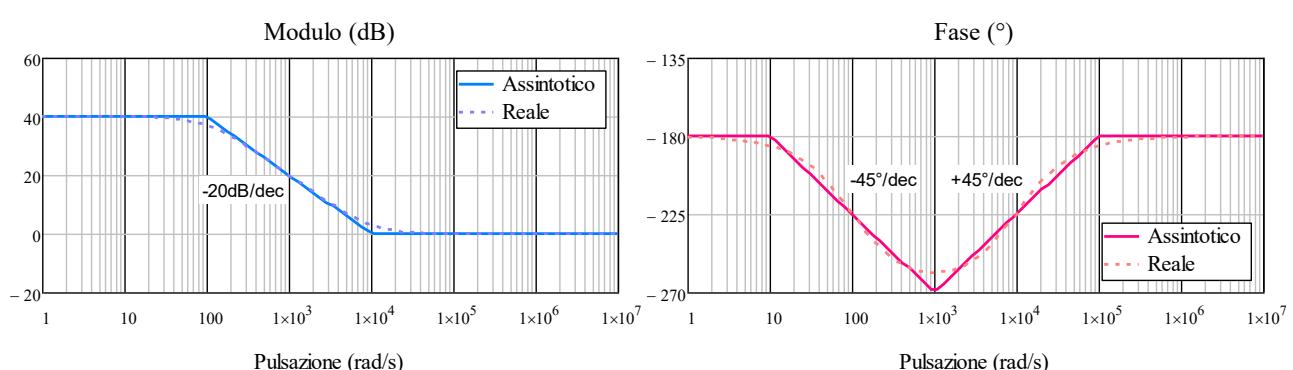
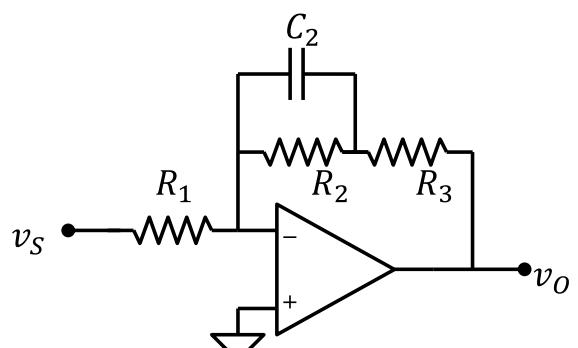
DATI: $R_1 = 2\text{k}\Omega$, $R_2 = 198\text{k}\Omega$, $R_3 = 2\text{k}\Omega$, $C_2 = 5\text{nF}$

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale, determinare la funzione di trasferimento e tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase.

Soluzione

$$W(s) = A \frac{1 + \frac{s}{\omega_Z}}{1 + \frac{s}{\omega_P}}$$

$A = -100$, $\omega_Z = 100\text{rad/s}$, $\omega_P = 10^4\text{rad/s}$,



Esercizio 10.12

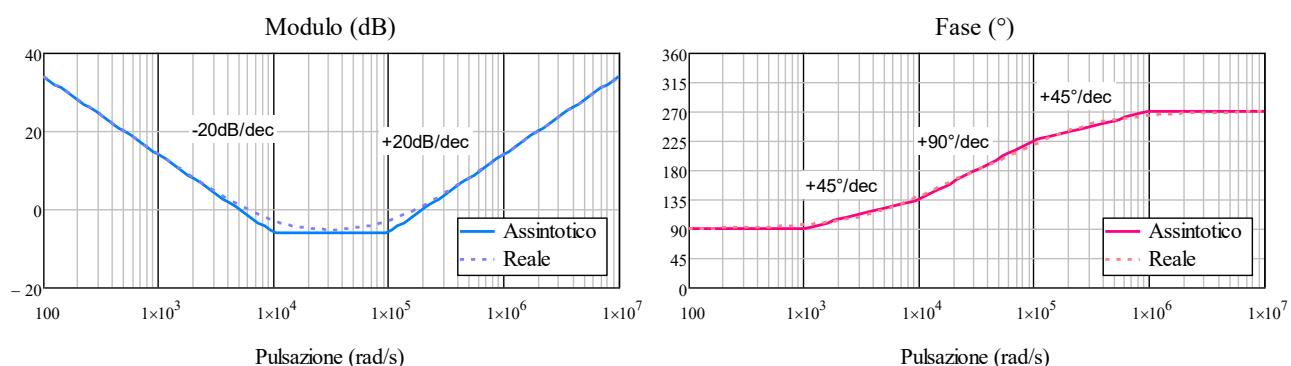
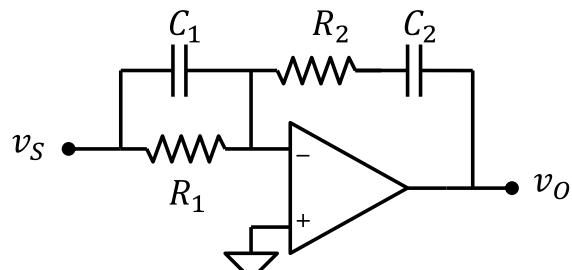
DATI: $R_1 = 2\text{k}\Omega$, $R_2 = 198\text{k}\Omega$, $R_3 = 2\text{k}\Omega$, $C_2 = 5\text{nF}$;

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale, determinare la funzione di trasferimento e tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase.

Soluzione

$$W(s) = A \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{\frac{s}{\omega_{z1}}}$$

$$A = -0.5, \omega_{z1} = 10^5 \text{rad/s}, \omega_{z2} = 10^4 \text{rad/s},$$



Esercizio 10.13

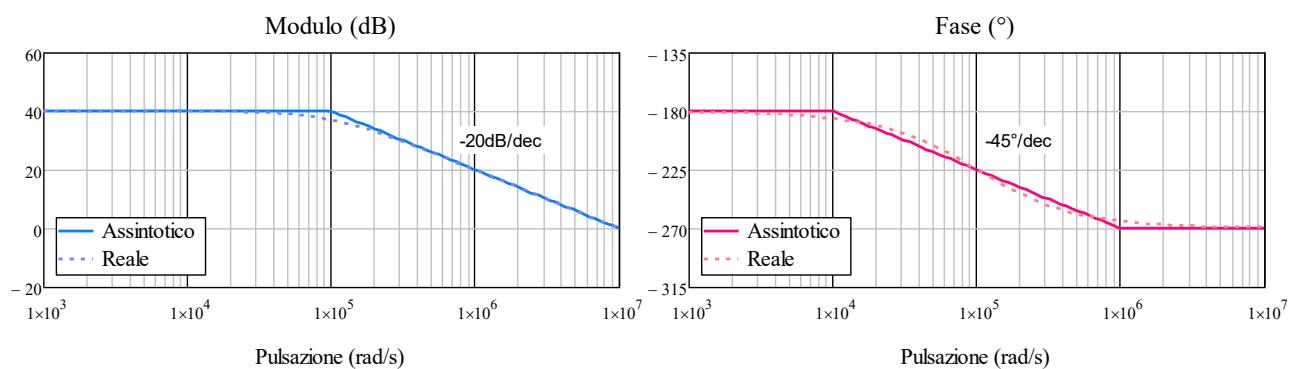
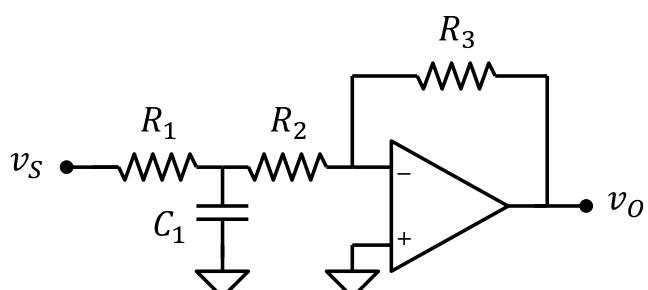
DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 1\text{k}\Omega$, $R_3 = 200\text{k}\Omega$; $C_1 = 20\text{nF}$

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale, determinare la funzione di trasferimento e tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase.

Soluzione

$$W(s) = \frac{A}{\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)}$$

$$A = -100, \omega_p = 10^5 \text{rad/s},$$



Esercizio 10.14

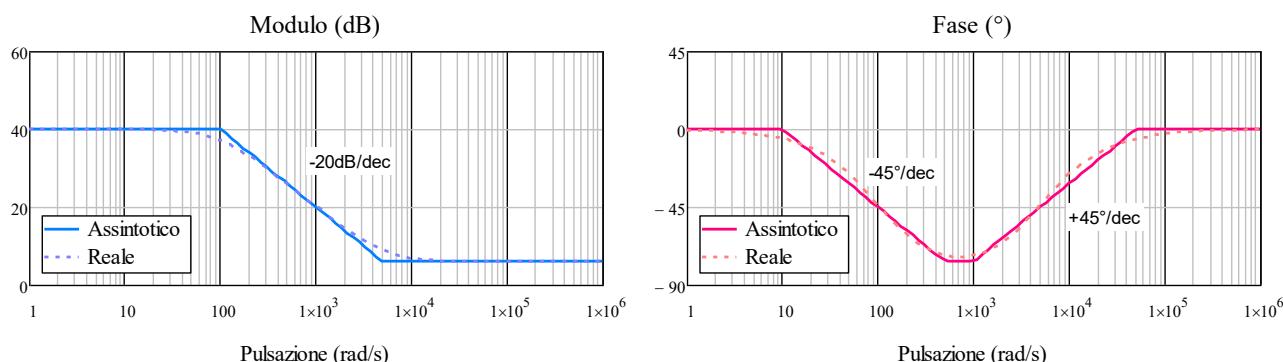
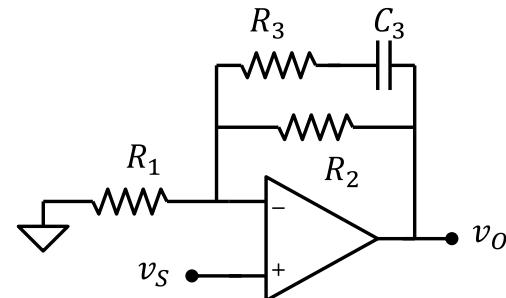
DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 99\text{k}\Omega$, $R_3 = 1\text{k}\Omega$; $C_3 = 100\text{nF}$;

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale:

1. Calcolare il guadagno in condizioni stazionarie ($\omega = 0$)
2. Calcolare il guadagno ad alta frequenza ($\omega \rightarrow \infty$)
3. Ricavare l'espressione della funzione di trasferimento
4. Tracciare il diagramma di Bode asintotico di modulo e fase

Soluzione

1. $A(0) = 100$
2. $A(\infty) = 1.99$
3. $W(s) = A \frac{(1+s/\omega_{Z1})}{(1+s/\omega_{P1})}$
 $A=100$, $\omega_{Z1} = 5 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$, $\omega_{P1} = 100 \text{ rad/s}$
4. Diagramma di Bode



Esercizio 10.15

DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$, $R_3 = 10\text{k}\Omega$;

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale:

1. Ricavare l'espressione della funzione di trasferimento in funzione di ω
2. Determinare il valore della capacità C tale che la posizione dello zero sia in $\omega_{Z1} = 1000\text{rad/s}$
3. Tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase

Soluzione

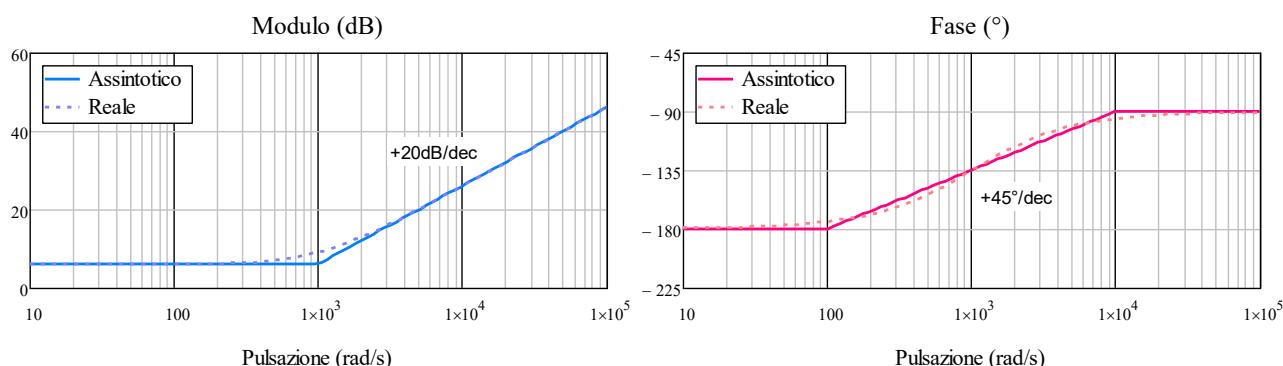
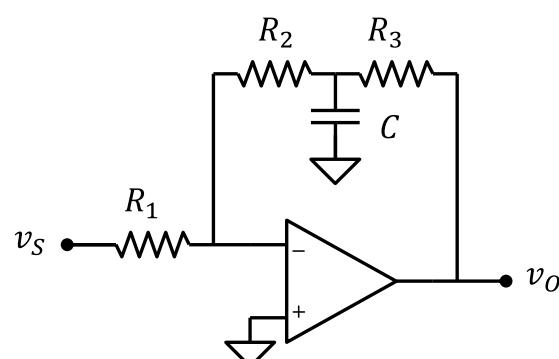
1. Funzione di trasferimento:

$$W(s) = A \left(1 + \frac{s}{\omega_{Z1}} \right)$$

$$A = -2, \omega_{Z1} = [C \cdot (R_2 || R_3)]^{-1}$$

$$2. C = 200\text{nF}$$

3. Diagramma di Bode



Esercizio 10.16

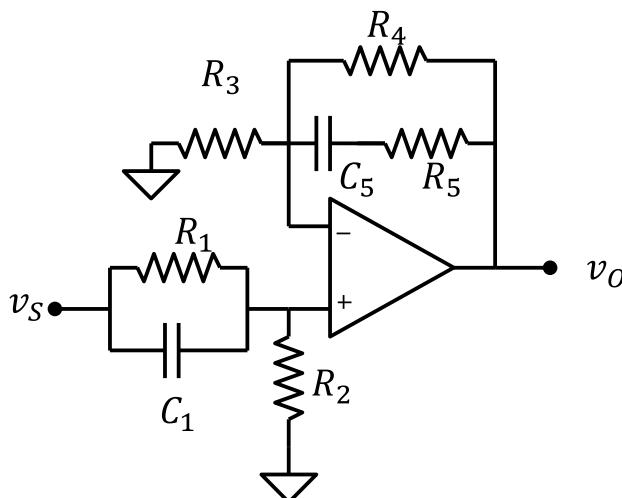
DATI: $R_2 = 1\text{k}\Omega$, $R_3 = 1\text{k}\Omega$, $R_4 = 99\text{k}\Omega$; $C_1 = 111\text{nF}$, $C_5 = 918\text{nF}$

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale:

1. Calcolare le resistenze R_1 e R_5 affinché:
 - in condizioni stazionarie ($\omega = 0$) la resistenza di ingresso sia $10\text{k}\Omega$
 - il modulo del guadagno in $\omega=0$ sia uguale a quello per $\omega \rightarrow \infty$
2. Ricavare l'espressione della funzione di trasferimento in funzione di ω
3. Tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase
4. Usando il diagramma di Bode asintotico, calcolare ampiezza e fase del segnale di uscita, quando all'ingresso è presente il segnale: $v_S = V_{S1} \sin(\omega_1 t + \phi_1) + V_{S2} \sin(\omega_2 t + \phi_2)$

$$V_{S1} = 10\text{mV} \quad \omega_1 = 10^6\text{rad/s} \quad \phi_1 = 180^\circ$$

$$V_{S2} = 1\text{mV} \quad \omega_2 = 690\text{rad/s} \quad \phi_2 = 90^\circ$$



Soluzione

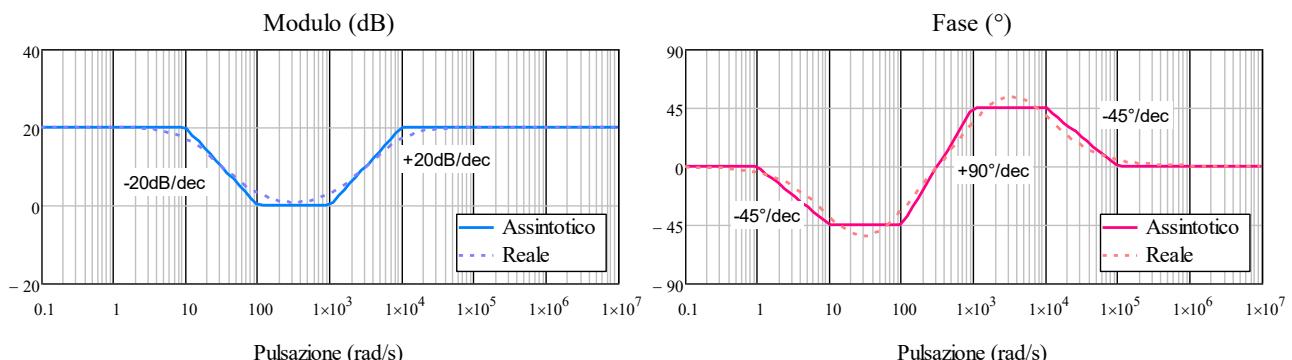
$$1. R_1 = 9\text{k}\Omega, R_5 = 9.9\text{k}\Omega$$

2. Funzione di trasferimento:

$$W(s) = A \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{Z1}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{Z2}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right)}$$

$$A = 0.1, \omega_{Z1} = 100\text{rad/s}, \omega_{Z2} = 10^3\text{rad/s}, \omega_{P1} = 10\text{rad/s}, \omega_{P2} = 10^4\text{rad/s}$$

3. Diagramma di Bode



$$4. v_O = V_{O1} \sin(\omega_1 t + \phi_{O1}) + V_{O2} \sin(\omega_2 t + \phi_{O2})$$

$$V_{O1} = 0.1\text{V}, \quad \phi_{O1} = 180^\circ$$

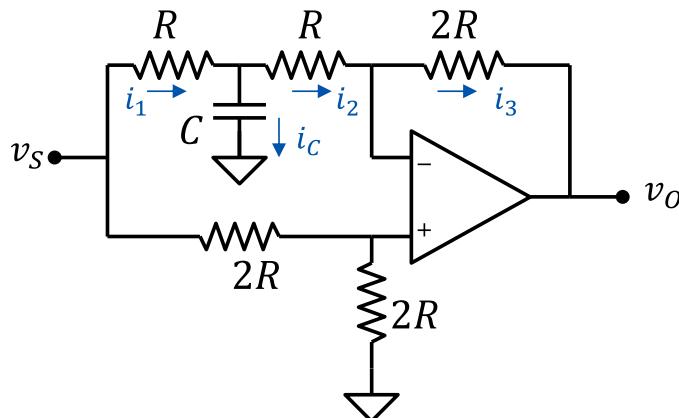
$$V_{O2} = 1\text{mV}, \quad \phi_{O2} = 120^\circ$$

Esercizio 10.17

DATI: $R = 2\text{k}\Omega$, $C = 100\text{nF}$

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale:

1. Ricavare l'espressione della funzione di trasferimento in funzione di ω
2. Tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase
3. Usando il diagramma di Bode asintotico, calcolare ampiezza e fase del segnale di uscita, quando all'ingresso è presente il segnale $v_S = V_S \sin(\omega_S t + \phi_S)$ con: $V_S = 5\text{V}$, $\phi_S = 45^\circ$ e pulsazione:
 - a. $\omega_S = 400 \text{ rad/s}$
 - b. $\omega_S = 5000 \text{ rad/s}$
 - c. $\omega_S = 20000 \text{ rad/s}$



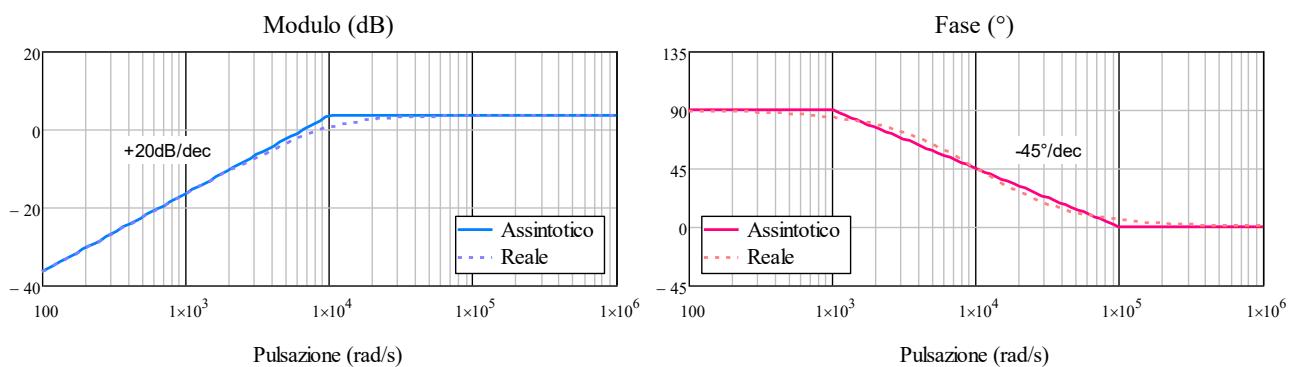
Soluzione

1. Funzione di trasferimento:

$$W(s) = A \frac{\frac{s}{\omega_{p1}}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right)}$$

$$A = 1.5, \omega_{p1} = 10^4 \text{ rad/s}$$

2. Diagramma di Bode



3. $v_O = V_O \sin(\omega_S t + \phi_O)$:

- a) $V_O = 0.3\text{V}, \phi_O = 135^\circ$
- b) $V_O = 3.75\text{V}, \phi_O = 103.5^\circ$
- c) $V_O = 7.5\text{V}, \phi_O = 76.5^\circ$

Esercizio 10.18

DATI: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 200\text{k}\Omega$, $R_3 = 1\text{k}\Omega$, $R_4 = 5\text{k}\Omega$, $R_5 = 3.3\text{k}\Omega$; $C_2 = 50\text{pF}$, $C_3 = 10\mu\text{F}$, $C_4 = 20\text{nF}$; $V_B = 1\text{V}$

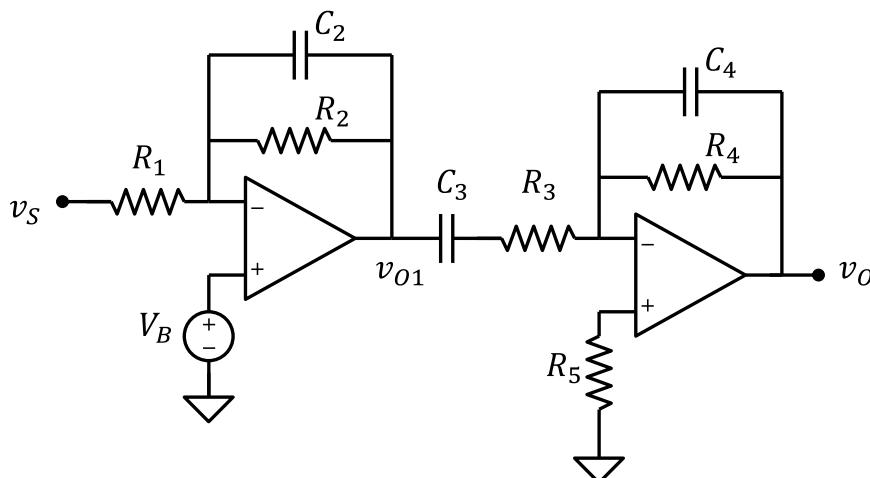
Dato il circuito in figura, realizzato con amplificatori operazionali ideali:

1. Calcolare la resistenza di ingresso
2. La tensione di uscita in condizioni stazionarie ($\omega = 0$) con $v_S = 200\text{mV}$.
3. Ricavare l'espressione della funzione di trasferimento in funzione di ω
4. Tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase
5. Usando il diagramma di Bode asintotico, calcolare ampiezza e fase del segnale di uscita, quando all'ingresso è presente il segnale: $v_S = V_{S0} + V_{S1} \sin(\omega_1 t + \phi_1) + V_{S2} \sin(\omega_2 t + \phi_2)$, con:

$$V_{S0} = 1\text{V}$$

$$V_{S1} = 10\text{mV} \quad \omega_1 = 10^3 \text{rad/s} \quad \phi_1 = 180^\circ$$

$$V_{S2} = 300\text{mV} \quad \omega_2 = 10^6 \text{rad/s} \quad \phi_2 = 90^\circ$$



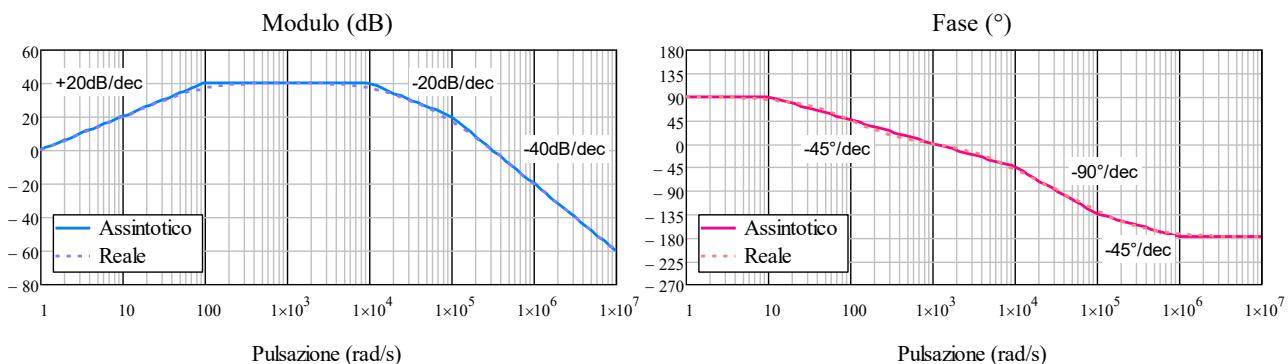
Soluzione

1. $R_{IN} = 10\text{k}\Omega$
2. $v_O = 0\text{V}$
3. Funzione di trasferimento:

$$W(s) = A \frac{\frac{s}{\omega_{P1}}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{P3}}\right)}$$

$$A = 100, \omega_{P1} = 100\text{rad/s}, \omega_{P2} = 10^4\text{rad/s}, \omega_{P3} = 10^6\text{rad/s}$$

4. Diagramma di Bode



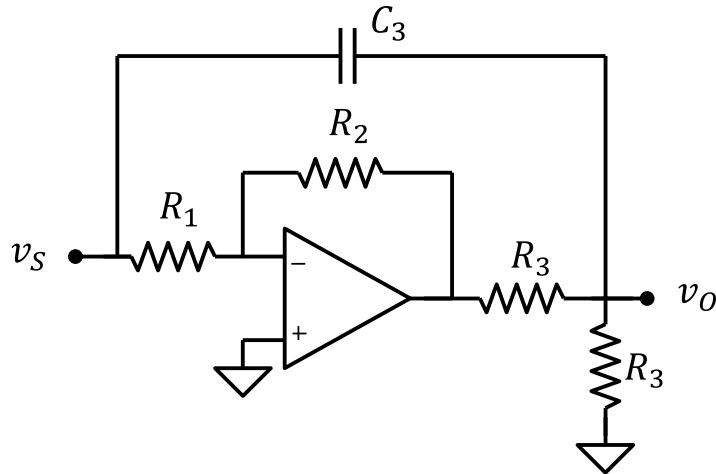
5. $v_O = V_{O0} + V_{O1} \sin(\omega_1 t + \phi_{O1}) + V_{O2} \sin(\omega_2 t + \phi_{O2})$
 $V_{O0} = 0\text{V}$, $\phi_{O1} = 180^\circ$
 $V_{O2} = 30\text{mV}$, $\phi_{O2} = -90^\circ$

Esercizio 10.19

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $R_3 = 5\text{k}\Omega$, $C_3 = 400\text{nF}$

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale:

1. Ricavare l'espressione della funzione di trasferimento in funzione di ω
2. Tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase
3. Usando il diagramma di Bode asintotico, calcolare ampiezza e fase del segnale di uscita, quando all'ingresso è presente il segnale $v_S = V_S \sin(\omega_S t + \phi_S)$ con: $V_S = 1\text{V}$, $\phi_S = 45^\circ$ e pulsazione $\omega_S = 2000 \text{ rad/s}$.



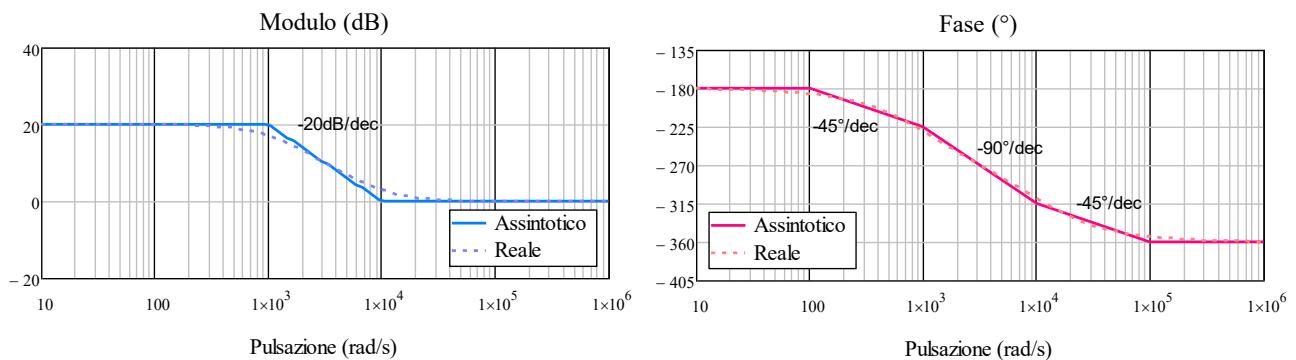
Soluzione

1. Funzione di trasferimento:

$$W(s) = A \frac{\left(1 - \frac{s}{\omega_{z1}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right)}$$

$A = -10$, $\omega_{p1} = 10^3 \text{ rad/s}$, $\omega_{z1} = 10^4 \text{ rad/s}$

2. Diagramma di Bode



$$3. v_O = V_O \sin(\omega_S t + \phi_O); V_O = 5\text{V}, \quad \phi_O = -252^\circ$$

Esercizio 10.20

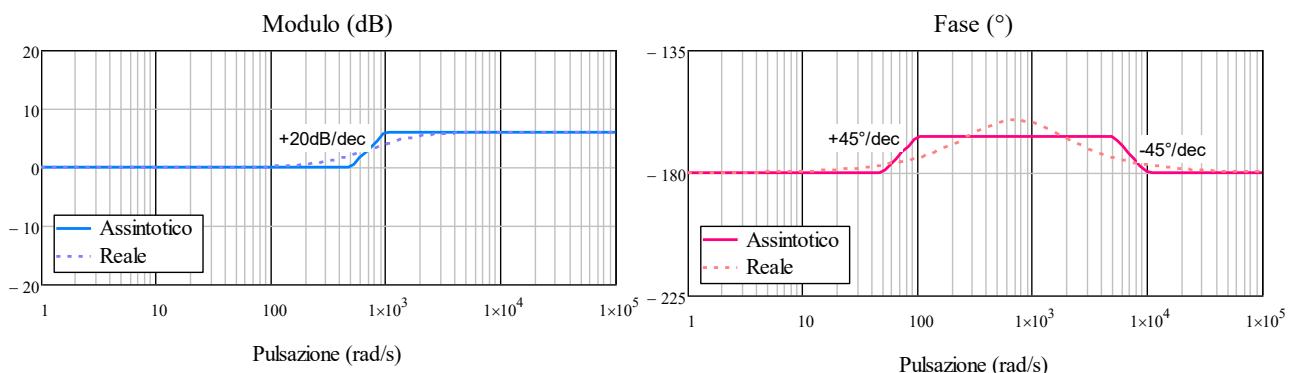
DATI: $R = 10k\Omega$, $C = 100nF$

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale ideale:

1. Ricavare l'espressione della funzione di trasferimento Tracciare il diagramma di Bode asintotico del modulo e della fase
2. Usando il diagramma di Bode asintotico, calcolare ampiezza e fase del segnale di uscita, con il segnale di ingresso: $v_S = V_S \sin(\omega_1 t + \phi_1)$ con: $V_S = 5V$, $\omega_1 = 3 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$, $\phi_1 = 60^\circ$

Soluzione

1. $W(\omega) = -\frac{1+j\omega/\omega_{Z1}}{1+j\omega/\omega_{P1}}$,
 $\omega_{Z1} = 500 \text{ rad/s}$, $\omega_{P1} = 10^3 \text{ rad/s}$
2. Diagramma di Bode



3. $v_O = V_O \sin(\omega_1 t + \phi_0)$; $V_O = 10V$, $\phi_0 = -106^\circ$

Esercizio 10.21

DATI: $R_1 = R_2 = 1k\Omega$, $R_3 = 10k\Omega$

$C_1 = 250nF$, $C_2 = 80nF$.

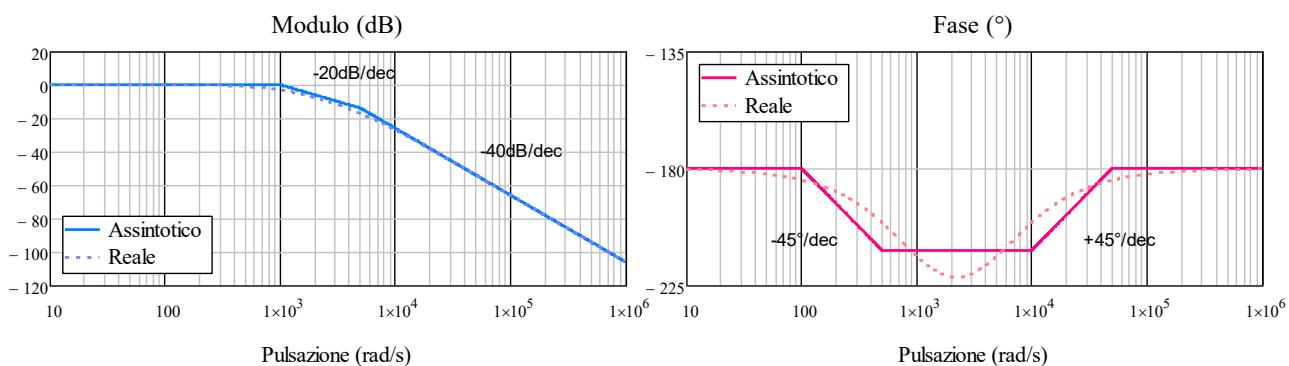
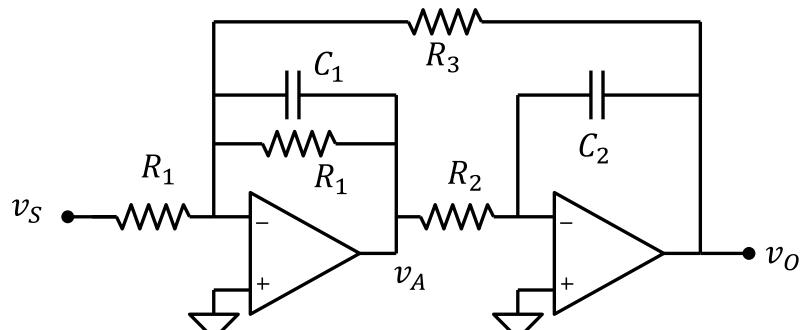
Dato il circuito in figura, trovare la funzione di trasferimento e tracciare il diagramma di bode.

Soluzione

$$W(s) = \frac{A}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right)}$$

$$A = -10,$$

$$\omega_{P1} = 10^3 \text{ rad/s}, \omega_{P2} = -5 \cdot 10^4 \text{ rad/s}$$



Esercizio 10.22

Tracciare il diagramma di Bode di modulo e fase delle seguenti funzioni:

$$a) W(s) = \frac{B}{as^2 + bs + c}$$

$$\begin{aligned} B &= 40 \\ a &= 1\mu\text{s} \\ b &= 1\text{ms} \end{aligned}$$

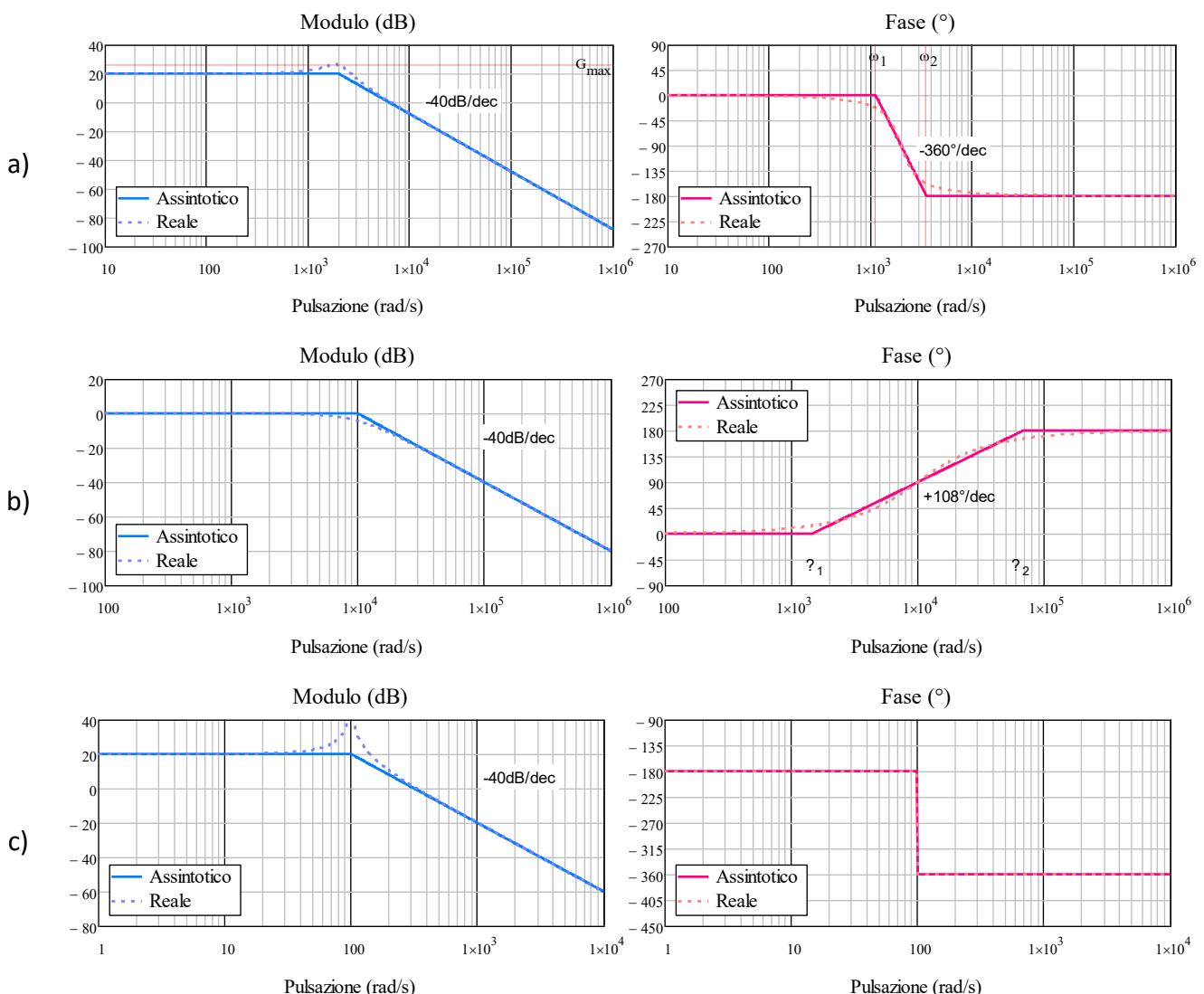
$$b) W(s) = \frac{A}{1 - \left(\frac{s}{\omega_1}\right) + \left(\frac{s}{\omega_2}\right)^2}$$

$$\begin{aligned} A &= 1 \\ \omega_1 &= 5 \cdot 10^3 \text{ rad/s} \\ \omega_2 &= 10^4 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

$$c) W(s) = \frac{A}{1 + \left(\frac{s}{\omega_p}\right)^2}$$

$$\begin{aligned} A &= -10 \\ \omega_p &= 100 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

Soluzione



Esercizio 10.23

Tracciare il diagramma di Bode di modulo e fase delle seguenti funzioni:

$$a) W(s) = \frac{K \left(\frac{s}{\omega_0} \right)^2}{1 + \left(\frac{s}{\omega_1} \right) + \left(\frac{s}{\omega_2} \right)^2}$$

$$\begin{aligned} K &= 10 \\ \omega_0 &= 500 \text{ rad/s} \\ \omega_1 &= 2000 \text{ rad/s} \\ \omega_2 &= 1000 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

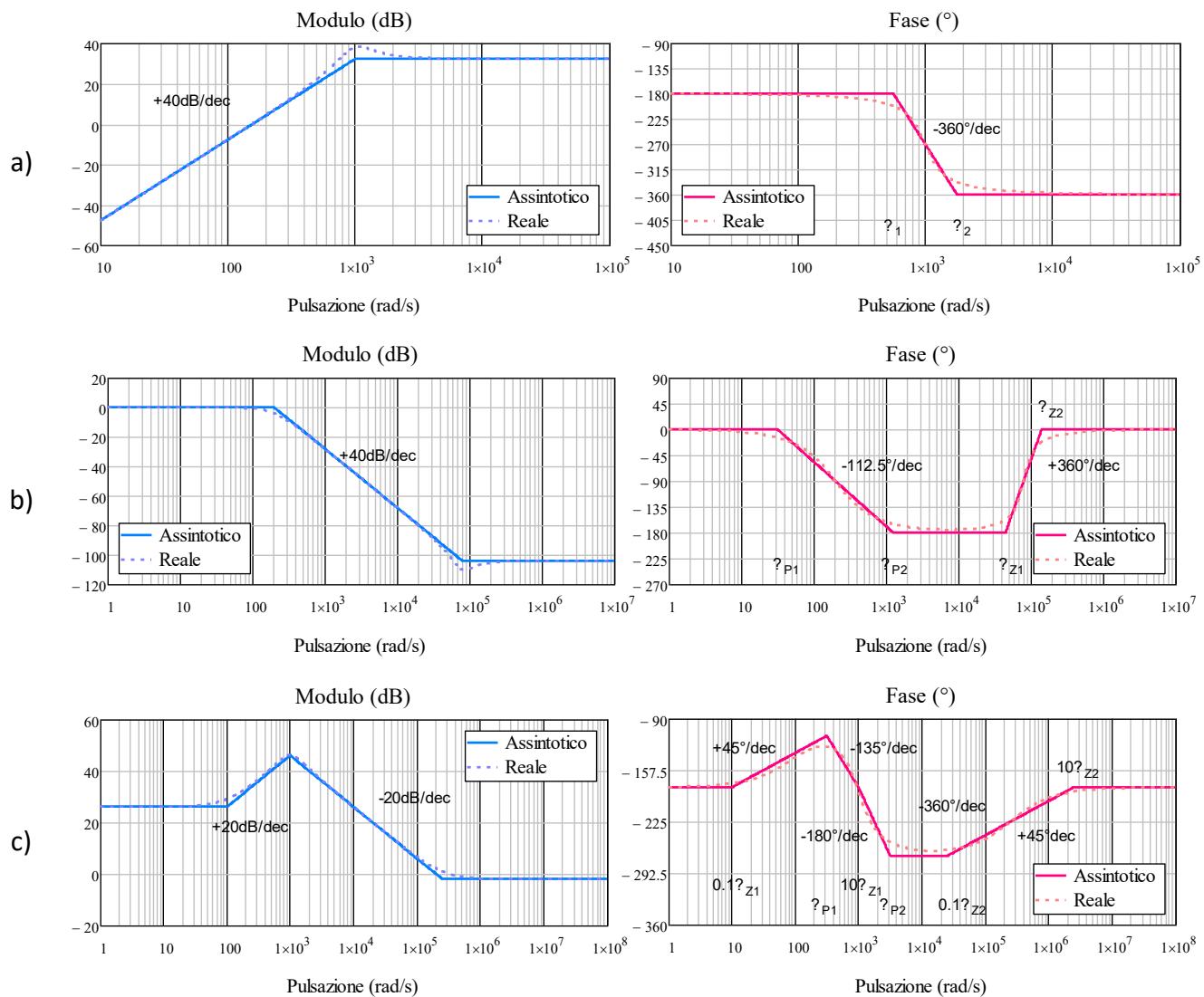
$$b) W(s) = \frac{1 + \left(\frac{s}{\omega_1} \right) + \left(\frac{s}{\omega_2} \right)^2}{1 + \left(\frac{s}{\omega_3} \right) + \left(\frac{s}{\omega_4} \right)^2}$$

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 1.6 \cdot 10^5 \text{ rad/s}, \\ \omega_2 &= 8 \cdot 10^4 \text{ rad/s} \\ \omega_3 &= 125 \text{ rad/s}, \\ \omega_4 &= 200 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

$$c) W(s) = A \frac{1 + \left(\frac{s}{\omega_1} \right) + \left(\frac{s}{\omega_2} \right)^2}{1 + \left(\frac{s}{\omega_3} \right) + \left(\frac{s}{\omega_4} \right)^2}$$

$$\begin{aligned} A &= -20 \\ \omega_1 &= 100 \text{ rad/s}, \\ \omega_2 &= 5000 \text{ rad/s} \\ \omega_3 &= 1000 \text{ rad/s}, \\ \omega_4 &= 1000 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

Soluzione

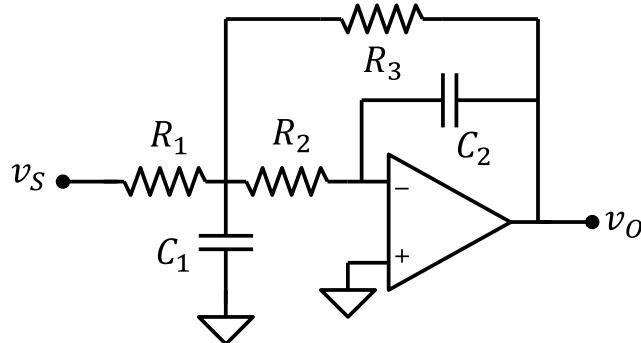


Esercizio 10.24

DATI: $R_1 = 4\text{k}\Omega$, $C_1 = 500\text{nF}$, $R_2 = 2\text{k}\Omega$, $C_2 = 1\text{nF}$, $R_3 = 40\text{k}\Omega$

Dato il circuito in figura:

1. Trovare la funzione di trasferimento da v_S a v_O .
2. Calcolare il valore massimo del modulo del guadagno vicino al polo.
3. Disegnare i diagrammi di Bode asintotici di modulo e fase.
4. Sapendo che all'ingresso è applicato il segnale: $v_S(t) = V_s \sin \omega_S t$ con $V_s = 0.2\text{V}$ e $\omega_S = 4000\text{rad/s}$, calcolare modulo e fase del segnale di uscita dal diagramma di bode asintotico.

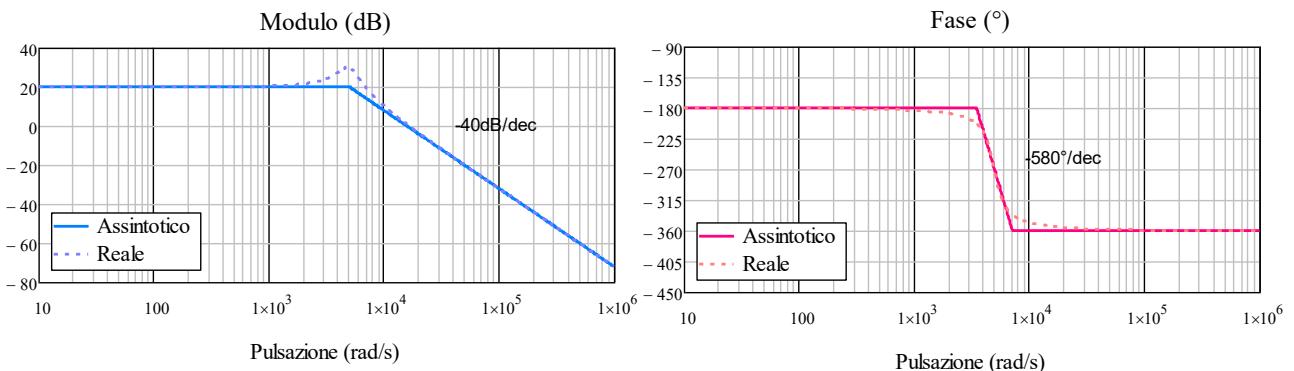


Soluzione

4. Funzione di trasferimento
($A = -10$, $\omega_p = 5000\text{rad/s}$, $\delta = 0.155$)

$$W(s) = \frac{A}{1 + 2\delta \frac{s}{\omega_p} + \left(\frac{s}{\omega_p}\right)^2}$$

5. $W_{\max} = 30.3\text{dB}$
6. Diagramma di bode:



7. $V_o = 2\text{V}$, $\phi_o = -214^\circ$

Esercizio 10.25

Dato il circuito in figura in cui $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$:

- Trovare la funzione di trasferimento da v_S a v_O .
- Trovare i valori di C_1 , C_2 e R_3 in modo tale che il guadagno a bassa frequenza abbia modulo 1, il polo sia $\omega_P = 2 \cdot 10^4 \text{ rad/s}$ e $Q = 1/\sqrt{2}$
- Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.

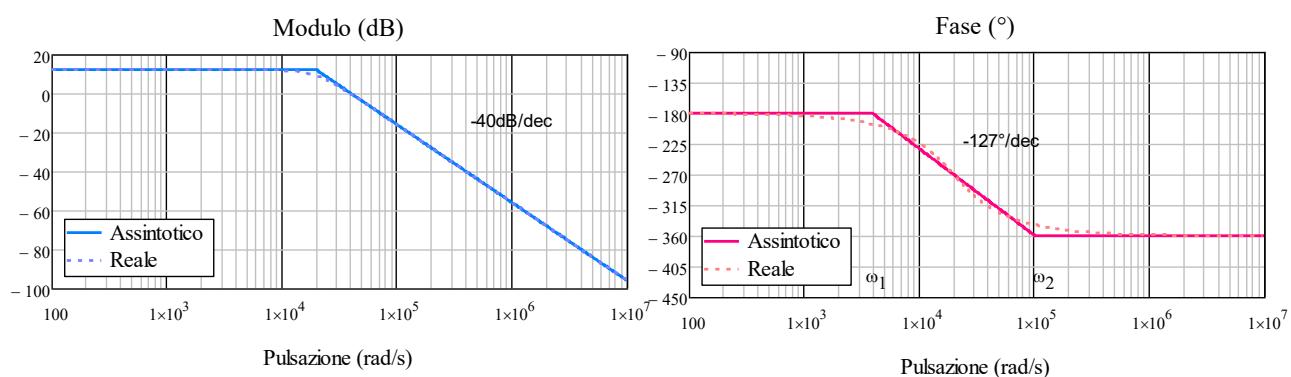
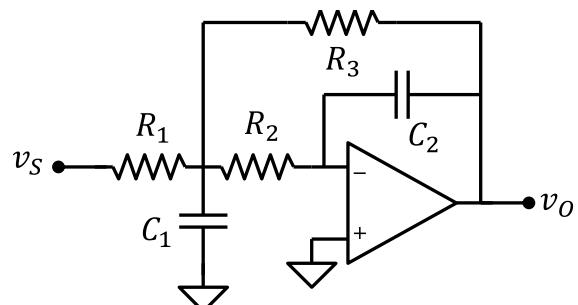
Soluzione

- Funzione di trasferimento

$$W(s) = \frac{A}{1 + 2\delta \frac{s}{\omega_P} + \left(\frac{s}{\omega_P}\right)^2}$$

- $R_3 = 40\text{k}\Omega$, $C_1 = 7.95\text{nF}$, $C_2 = 0.786\text{nF}$

- Diagramma di bode:



Esercizio 10.26

Dato il circuito in figura in cui $R = 10\text{k}\Omega$:

- Trovare la funzione di trasferimento da v_S a v_O .
- Trovare C_1 e C_2 affinché il polo sia a $\omega_P = 10^4 \text{ rad/s}$ e la pendenza del diagramma asintotico della fase sia $-180^\circ/\text{dec}$.
- Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.

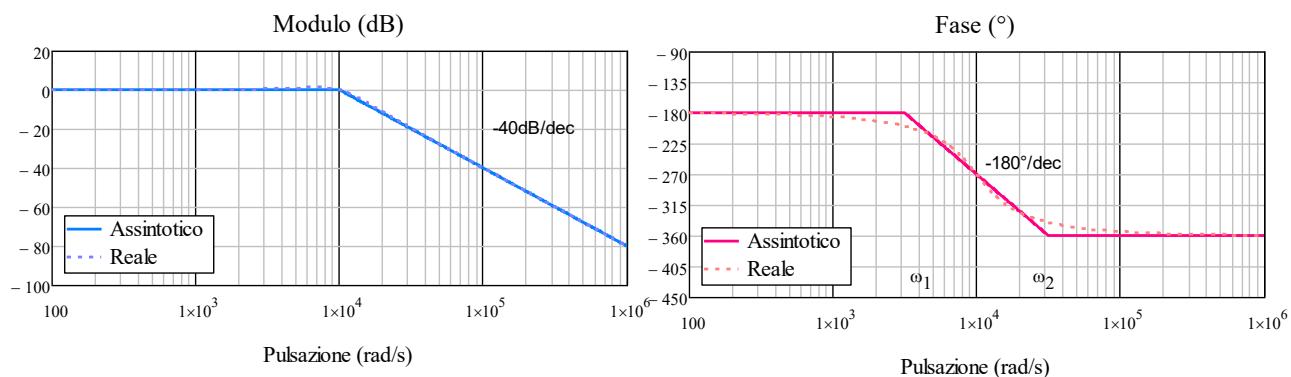
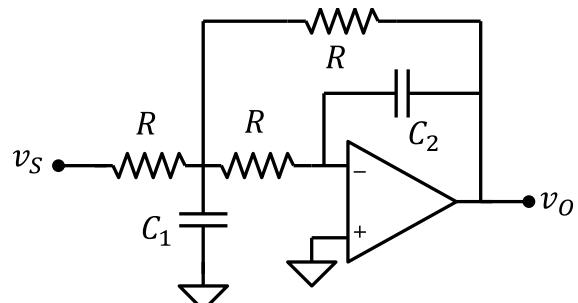
Soluzione

- Funzione di trasferimento

$$W(s) = \frac{A}{1 + 2\delta \frac{s}{\omega_P} + \left(\frac{s}{\omega_P}\right)^2}$$

- $C_1 = 7.95\text{nF}$, $C_2 = 0.786\text{nF}$

- Diagramma di bode:

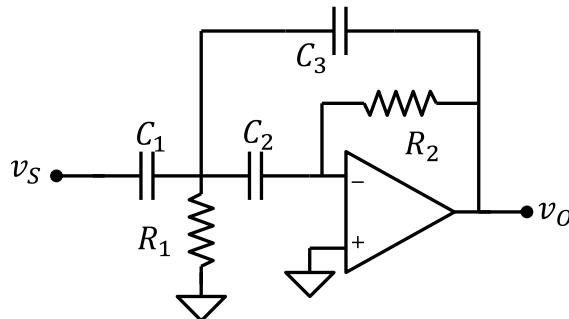


Esercizio 10.27

DATI: $R_1 = 2\text{k}\Omega$, $C_1 = 400\text{nF}$, $R_2 = 200\text{k}\Omega$, $C_2 = 1\mu\text{F}$, $C_3 = 40\text{nF}$

Dato il circuito in figura:

1. Trovare la funzione di trasferimento da v_S a v_O .
2. Calcolare il punto di massimo del guadagno intorno al polo.
3. Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.
4. Calcolare modulo e fase del segnale di uscita, sapendo che all'ingresso è applicato il segnale $v_S = V_{S0} + V_{S1} \sin \omega_S t$ con $V_{S0} = V_{S1} = 1\text{V}$ e $\omega_S = 100\text{rad/s}$

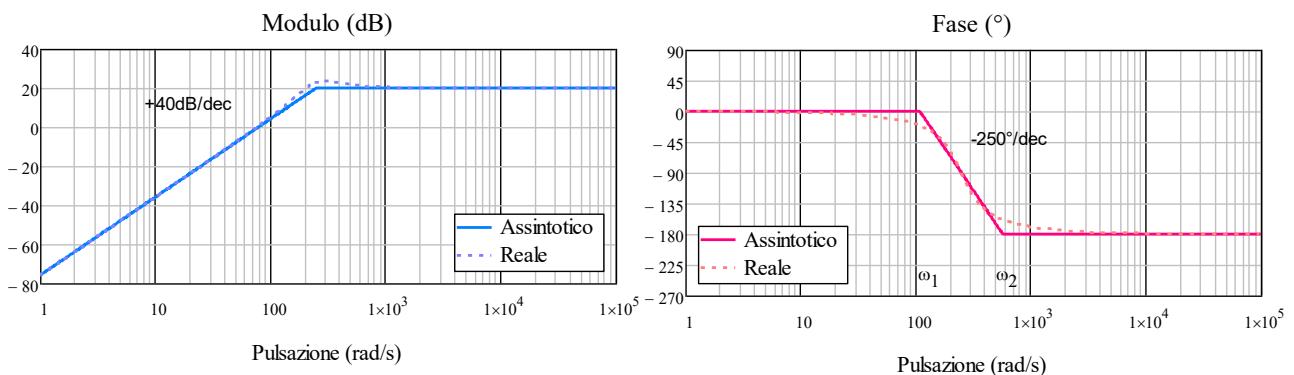


Soluzione

1. Funzione di trasferimento ($A = -10$, $\omega_p = 250\text{rad/s}$, $\delta = 0.36$)

$$W(s) = \frac{A \left(\frac{s}{\omega_p} \right)^2}{1 + 2\delta \frac{s}{\omega_p} + \left(\frac{s}{\omega_p} \right)^2}$$

2. $|W|_{\max} = 23.4\text{dB}$
3. Diagramma di bode:



4. $v_O = V_o \sin(\omega_S t + \phi_o)$ con $V_o = 1.6\text{V}$, $\phi_o = 0^\circ$

Esercizio 10.28

Dato il circuito in figura in cui $R_1 = 5\text{k}\Omega$. Sapendo che $C_1 = C_2$:

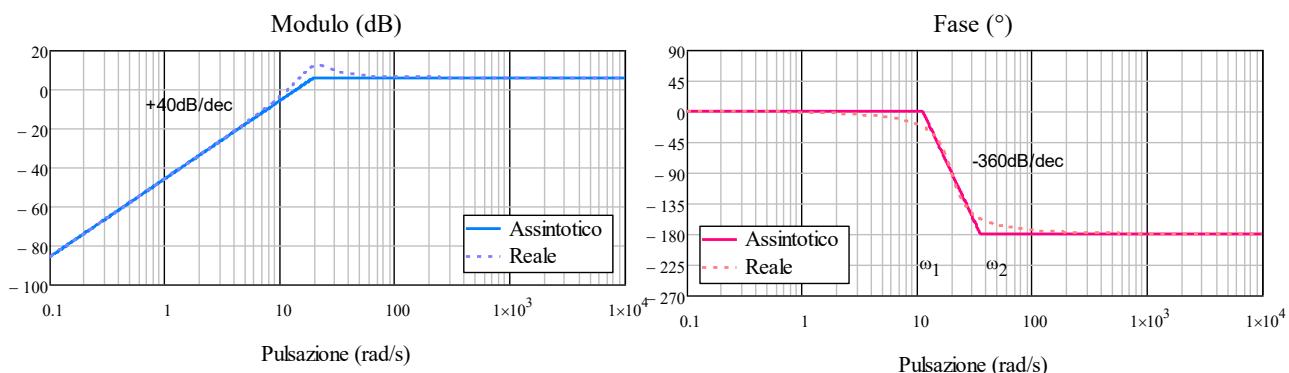
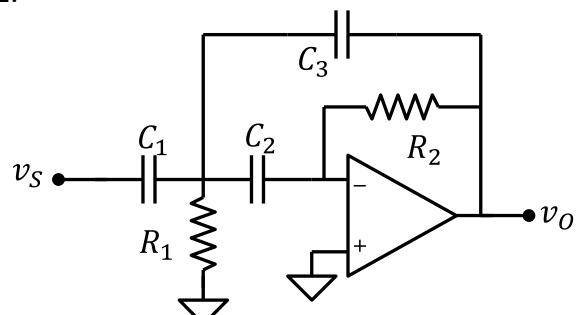
1. Trovare la funzione di trasferimento da v_S a v_O .
2. Trovare il valore di C e C_3 affinché $\omega_P = 20\text{rad/s}$, la pendenza del diagramma asintotico della fase sia $-360^\circ/\text{dec}$. e il guadagno ad alta frequenza sia $A = -2$.
3. Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.

Soluzione

1. Funzione di trasferimento ($\delta = 0.25$)

$$W(s) = \frac{A(s/\omega_P)^2}{1 + 2\delta(s/\omega_P) + (s/\omega_P)^2}$$

2. $C_1 = C_2 = 2\mu\text{F}$, $C_3 = 1\mu\text{F}$
3. Diagramma di bode:



Esercizio 10.29

DATI: $R_1 = 25\text{k}\Omega$, $C_1 = 2\mu\text{F}$, $R_2 = 50\text{k}\Omega$, $C_2 = 2\mu\text{F}$, $C_3 = 1\mu\text{F}$

Dato il circuito in figura:

1. Trovare la funzione di trasferimento da v_S a v_O .
2. Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.

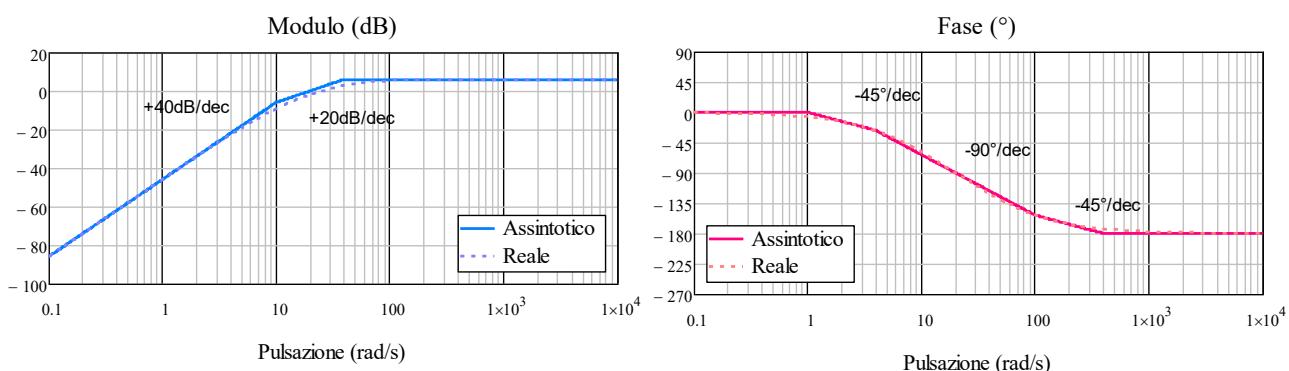
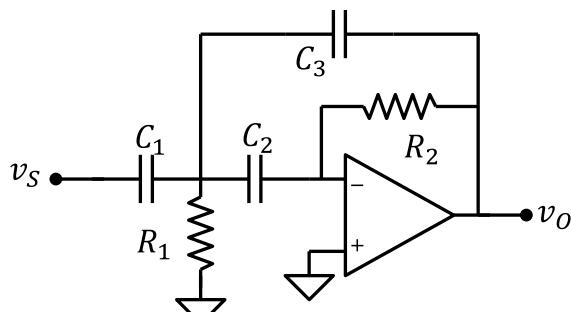
Soluzione

1. Funzione di trasferimento

$$(A = -2, \omega_{P1} = 10\text{rad/s}, \omega_{P2} = 40\text{rad/s}, \omega_0 = 20\text{rad/s})$$

$$W(s) = \frac{A \left(\frac{s}{\omega_0} \right)^2}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}} \right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}} \right)}$$

2. Diagramma di bode:



Esercizio 10.30

DATI: $R_1 = 20\text{k}\Omega$, $C_1 = 10\text{nF}$, $R_2 = 20\text{k}\Omega$, $C_2 = 10\text{nF}$, $R_3 = 40\text{k}\Omega$

Dato il circuito in figura:

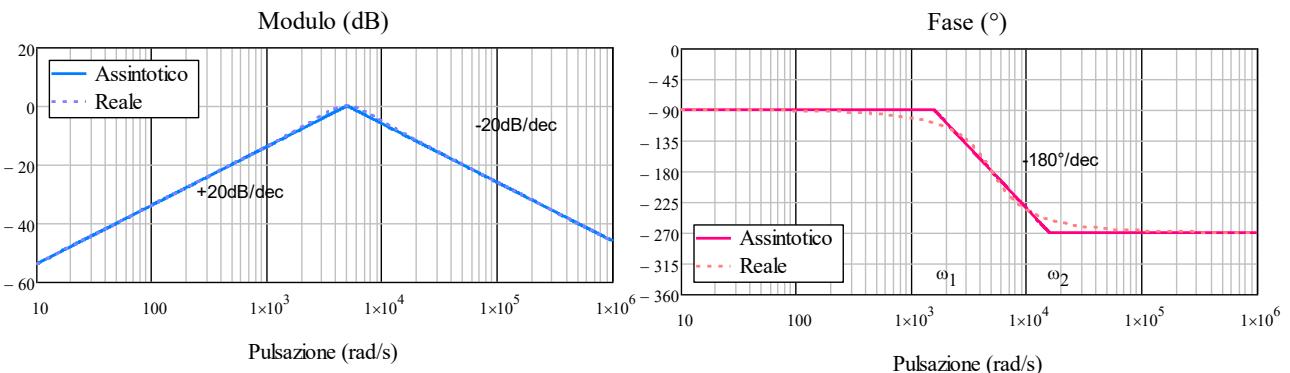
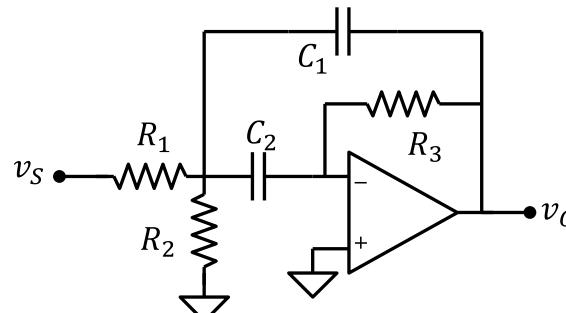
- Trovare la funzione di trasferimento da v_s a v_o .
- Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.

Soluzione

- Funzione di trasferimento
($A = -1$, $\omega_p = 5000\text{rad/s}$, $\delta = 0.5$)

$$W(s) = \frac{A \frac{s}{\omega_p}}{1 + 2\delta \frac{s}{\omega_p} + \left(\frac{s}{\omega_p}\right)^2}$$

- Diagramma di bode:



Esercizio 10.31

DATI: $C = 10\text{nF}$

Dato il circuito in figura:

- Trovare la funzione di trasferimento da v_s a v_o .
- Trovare il valore di R affinché il polo sia in $\omega_p = 3000\text{rad/s}$.
- Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.

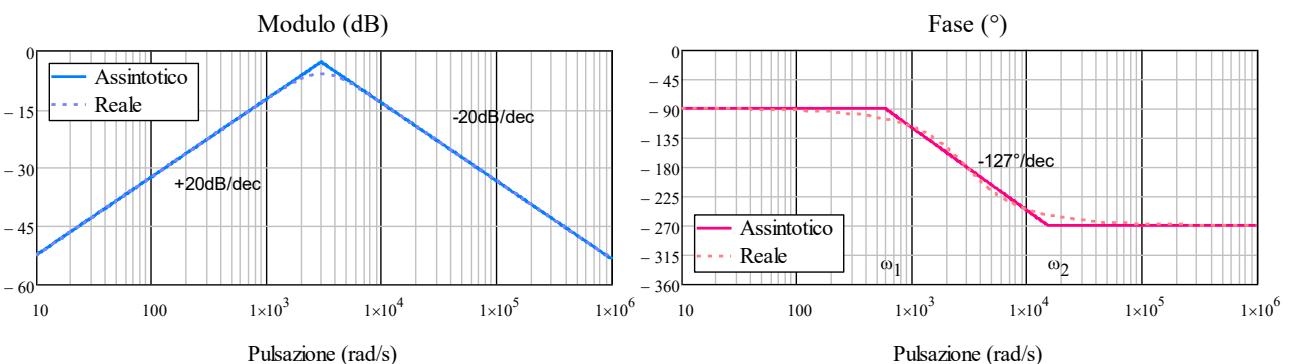
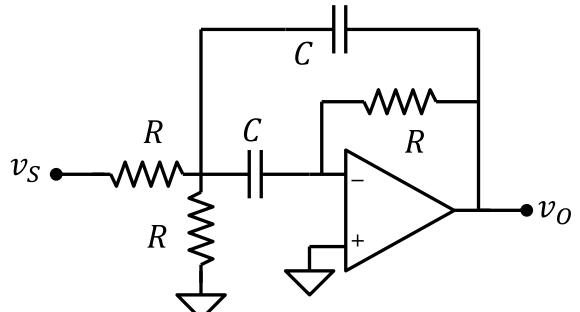
Soluzione

- Funzione di trasferimento ($A = -0.707$, $\delta = 0.707$)

$$W(s) = A \frac{\frac{s}{\omega_p}}{1 + 2\delta \left(\frac{s}{\omega_p}\right) + \left(\frac{s}{\omega_p}\right)^2}$$

- $R = 47.1\text{k}\Omega$

- Diagramma di bode:

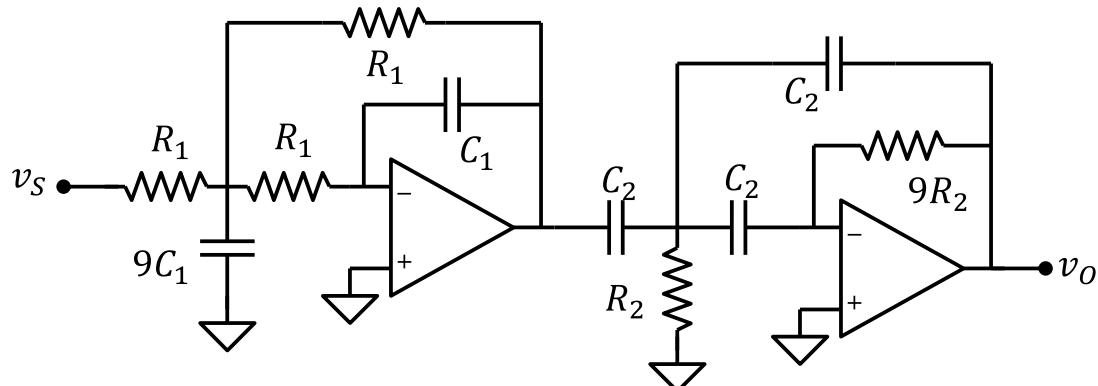


Esercizio 10.32

DATI: $R_1 = 10k\Omega$, $C_1 = 3.33nF$, $R_2 = 100\Omega$, $C_2 = 33.3\mu F$

Dato il circuito in figura:

1. Trovare la funzione di trasferimento da v_S a v_O .
2. Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase

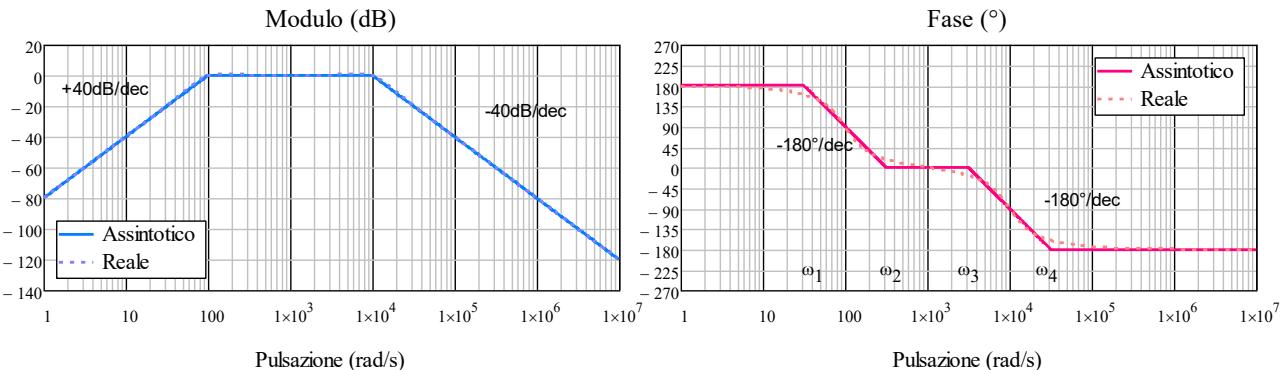


Soluzione

1. Funzione di trasferimento
($p_1 = 10^4 \text{ rad/s}$, $\delta_1 = 0.5$, $p_2 = 100 \text{ rad/s}$, $\delta_2 = 0.5$)

$$W(s) = \frac{\left(\frac{s}{p_2}\right)^2}{\left[1 + 2\delta_1 \frac{s}{p_1} + \left(\frac{s}{p_1}\right)^2\right] \left[1 + 2\delta_2 \frac{s}{p_2} + \left(\frac{s}{p_2}\right)^2\right]}$$

2. Diagramma di bode:



Esercizio 10.33

DATI: $C_1 = 20\text{nF}$, $C_2 = 80\text{nF}$, $R = 10\text{k}\Omega$, $R_A = 1\text{k}\Omega$, $R_B = 5\text{k}\Omega$

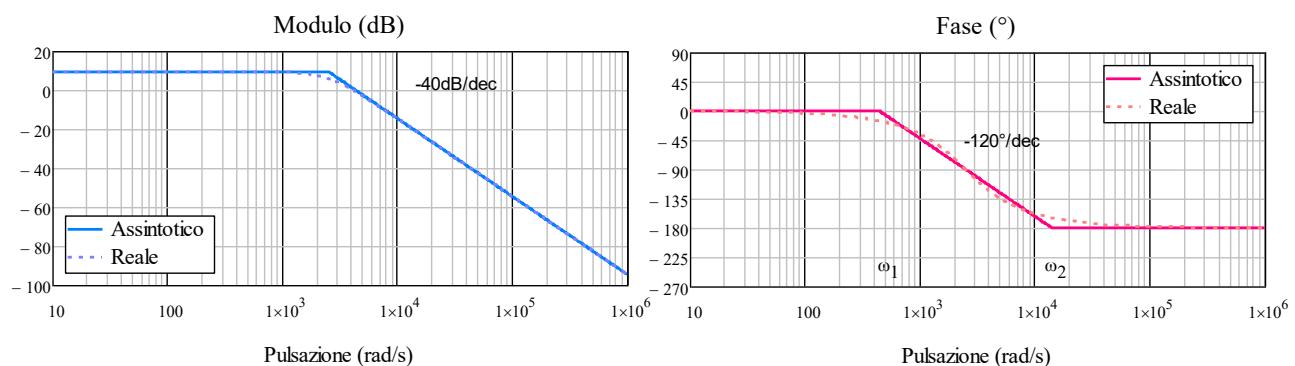
Dato il circuito in figura:

1. Trovare la funzione di trasferimento
2. Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.

Soluzione

1. Funzione di trasferimento
($A = 6$, $\delta = 0.75$, $\omega_p = 2500\text{rad/s}$)
- $$W(s) = \frac{A}{1 + 2\delta \left(\frac{s}{\omega_p}\right) + \left(\frac{s}{\omega_p}\right)^2}$$

2. Diagramma di bode:



Esercizio 10.34

Dato il circuito in figura in cui $R = 10\text{k}\Omega$:

1. Trovare la funzione di trasferimento da v_s a v_o .
2. Trovare il valore di C affinché il polo sia in $\omega_p = 5000\text{rad/s}$.
3. Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.

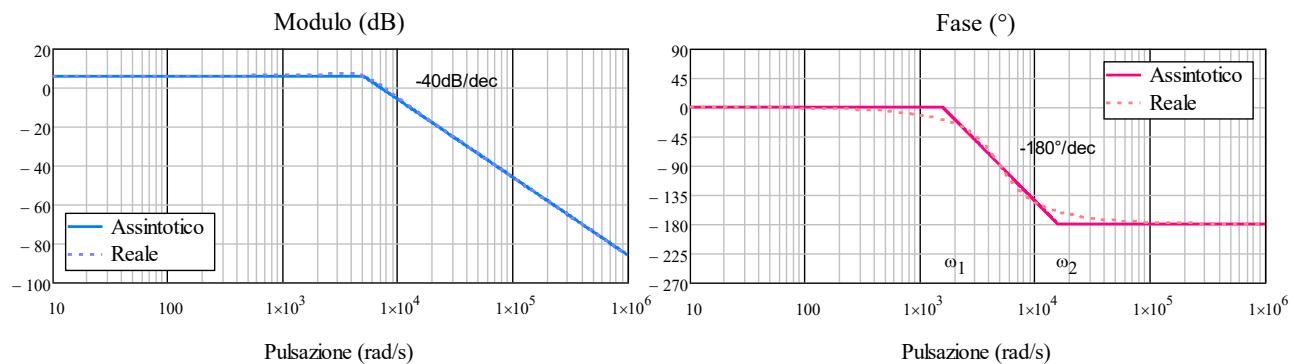
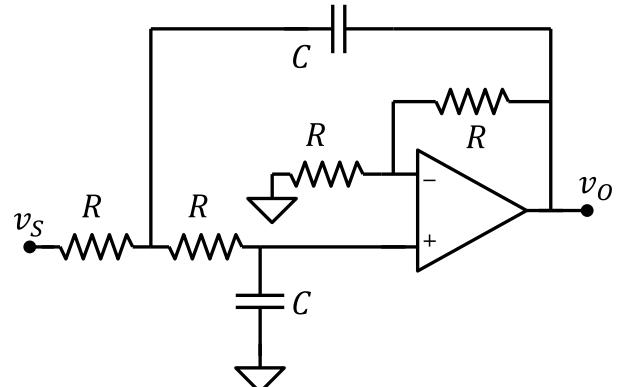
Soluzione

1. Funzione di trasferimento ($A=2$, $\delta=0.5$)

$$W(s) = \frac{A}{1 + 2\delta \left(\frac{s}{\omega_p}\right) + \left(\frac{s}{\omega_p}\right)^2}$$

2. $C = 20\text{nF}$

3. Diagramma di bode:



Esercizio 10.35

DATI: $C = 1\mu F$, $R_1 = 40k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$, $R_A = 1k\Omega$, $R_B = 7k\Omega$

Dato il circuito in figura:

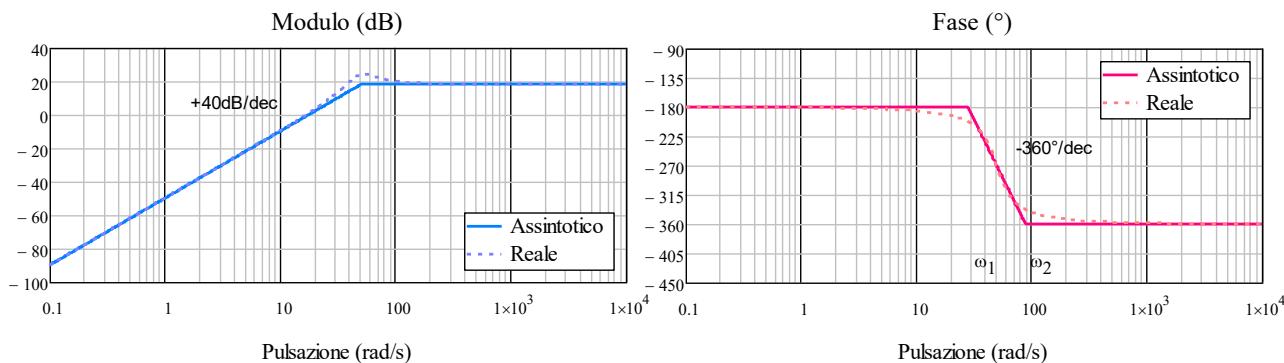
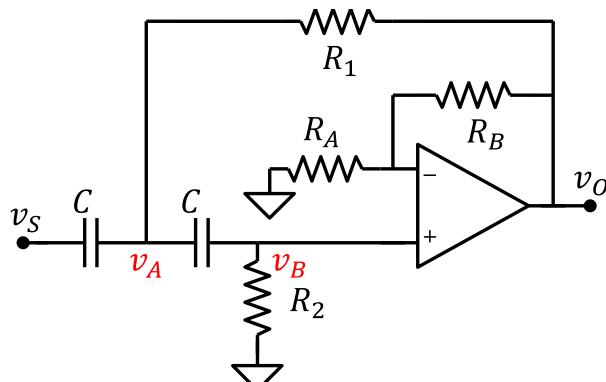
1. Trovare la funzione di trasferimento
2. Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.

Soluzione

1. Funzione di trasferimento
($A = 8$, $\delta = 0.25$, $\omega_p = 50\text{rad/s}$)

$$W(s) = \frac{A(s/\omega_p)^2}{1 + 2\delta(s/\omega_p) + (s/\omega_p)^2}$$

2. Diagramma di bode:



Esercizio 10.36

DATI: $C = 200nF$, $R = 5k\Omega$, $R_A = 10k\Omega$, $R_B = 14k\Omega$

Dato il circuito in figura:

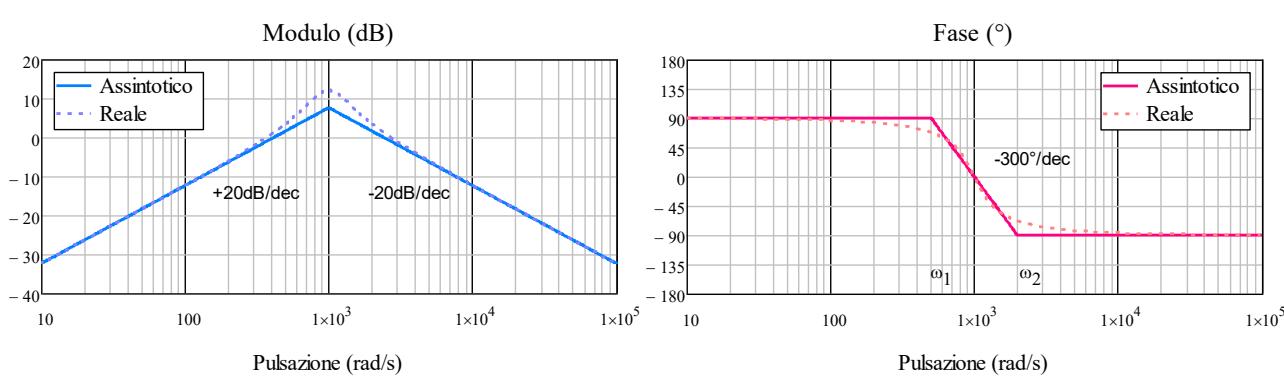
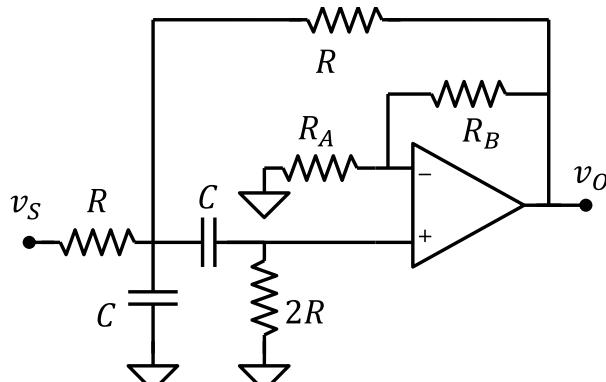
1. Trovare la funzione di trasferimento
2. Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.
3. Calcolare il valore asintotico e reale di $|W(s)|$

Soluzione

1. Funzione di trasferimento
($A = 2.4$, $\delta = 0.3$, $\omega_p = 1000\text{rad/s}$)

$$W(s) = A \frac{s/\omega_p}{1 + 2\delta(s/\omega_p) + (s/\omega_p)^2}$$

2. Diagramma di bode:



$$3. |W|_{\max} = 12\text{dB}$$

Esercizio 10.37

Dato il circuito in figura in cui $C = 20\text{nF}$, $R = 10\text{k}\Omega$

- Trovare la funzione di trasferimento
- Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.
- Calcolare il valore asintotico e reale di $|W(s)|$

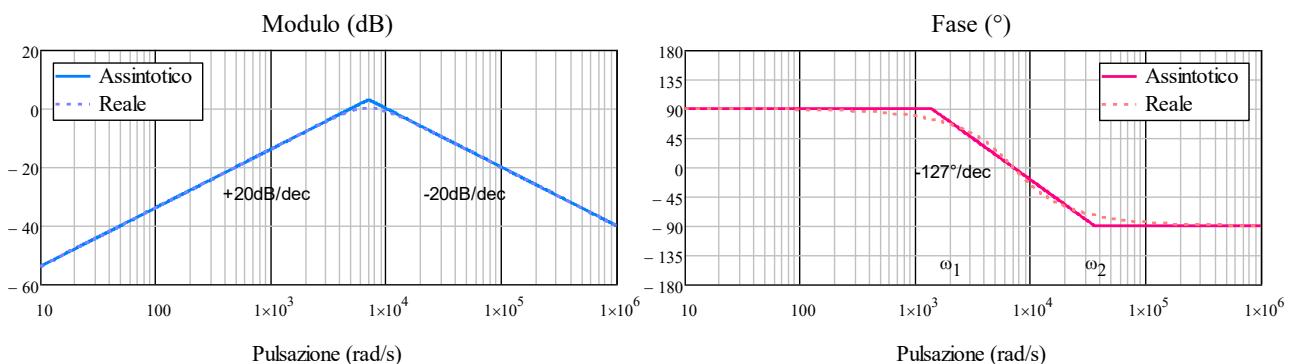
Soluzione

- Funzione di trasferimento

$$(A = 2, \delta = 0.707, \omega_p = 7070\text{rad/s})$$

$$W(s) = A \frac{s/\omega_p}{1 + 2\delta(s/\omega_p) + (s/\omega_p)^2}$$

- Diagramma di bode:



$$3. |W|_{\max} = 6\text{dB}$$

Esercizio 10.38

Dato il circuito in figura in cui $C = 20\text{nF}$, $R = 10\text{k}\Omega$:

- Trovare la funzione di trasferimento
- Determinare il valore di R_B tale che la pendenza del diagramma di bode asintotico della fase intorno al polo sia $900^\circ/\text{dec}$. Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.
- Calcolare il valore asintotico e reale di $|W(s)|$

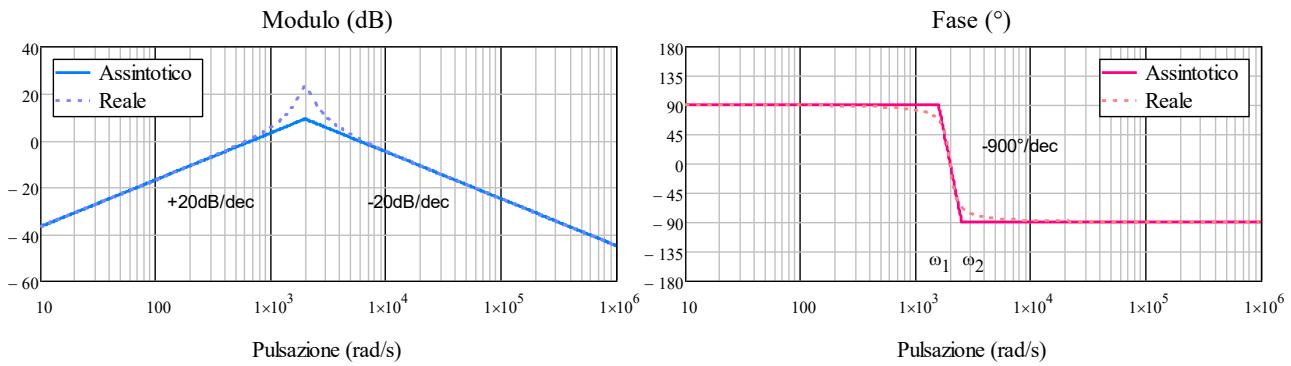
Soluzione

- Funzione di trasferimento ($\omega_p = 2000\text{rad/s}$)

$$W(s) = A \frac{s/\omega_p}{1 + 2\delta(s/\omega_p) + (s/\omega_p)^2}$$

$$2. R_B = 18\text{k}\Omega (\delta = 0.1)$$

- Diagramma di bode:



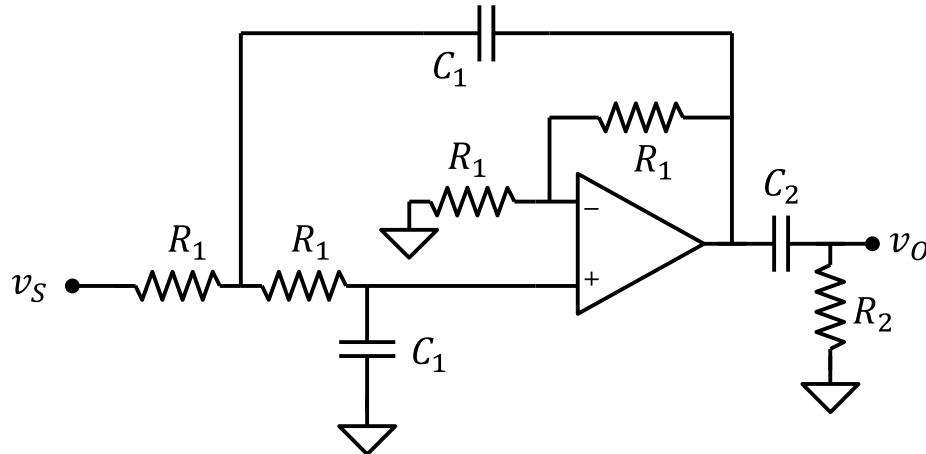
$$4. |W|_{\max} = 22.9\text{dB}$$

Esercizio 10.39

DATI: $R_1 = 25\text{k}\Omega$ $C_1 = 4\text{nF}$, $R_2 = 100\text{k}\Omega$ $C_2 = 100\text{nF}$

Dato il circuito in figura

1. Trovare la funzione di trasferimento
2. Disegnare i diagrammi di Bode di modulo e fase.



Soluzione

1. Funzione di trasferimento
($A = 2$, $\delta = 0.5$, $\omega_{P1} = 10^4\text{rad/s}$, $\omega_{P2} = 100\text{rad/s}$)

$$W(s) = \frac{A \frac{s}{\omega_{P2}}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right) \left[1 + 2\delta \left(\frac{s}{\omega_{P1}}\right) + \left(\frac{s}{\omega_{P1}}\right)^2\right]}$$

2. Diagramma di bode:

