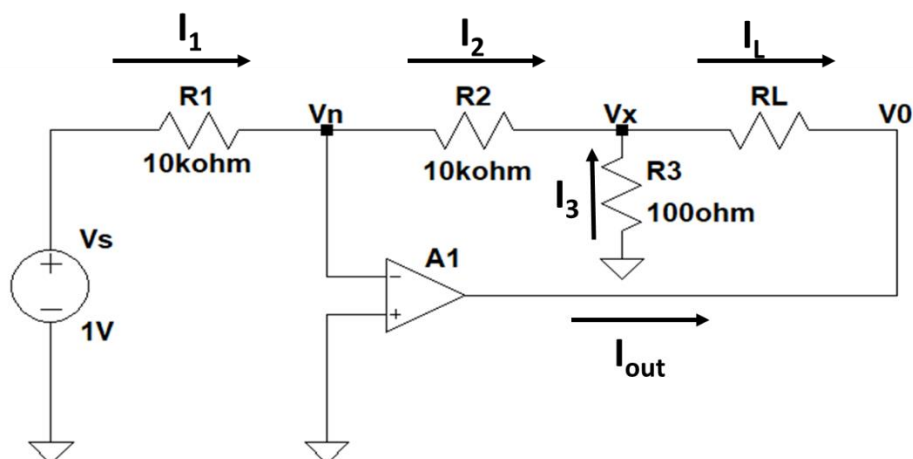


Tema A

Tre esercizi da risolvere in due ore. Scrivere nome e numero di matricola su tutti i fogli con le soluzioni e numerare le pagine.

Esercizio 1 Amplificatore operazionale con rete a T.



Nel circuito in figura A1 è un amplificatore operazionale ideale.

1.1 Calcolare le correnti I_1 , I_2 , e I_3

1.2 Calcolare la tensione V_x

1.3 Calcolare la corrente I_L e la corrente erogata dall'uscita dell'amplificatore I_{out}

1.4 Determinare il massimo valore di R_L per il quale V_o è maggiore di -13 V

1.5 Nel caso in cui R_L vari nell'intervallo da 100 ohm a 1 kohm, qual è la corrispondente variazione di I_L e V_o ?

1.6 Qual è la resistenza di uscita vista tra V_x e V_o ?

1.7 Qual è la resistenza di uscita vista tra V_o e massa?

1.8 Qual è la resistenza di ingresso vista dal generatore V_s ?

1.9 Collegare una resistenza da 1 kohm tra V_o e massa. Di quanto cambiano V_o , I_L e I_{out} ?

1.10 Scrivere l'espressione del guadagno I_L/V_s . Di che tipo di guadagno si tratta? Qual è l'unità di misura corrispondente?

SOLUZIONE

1.1 Calcolare le correnti I_1 , I_2 , e I_3

1.1 La rete di feedback realizza una retroazione negativa; l'amplificatore operazionale è ideale, quindi vale il principio di massa virtuale e $V_- = V_+ = V_n$.

La corrente I_1 è quindi pari a $(V_s - V_n)/R_1 = V_s/R_1 = 1V/10k\Omega = 0.1$ mA. La corrente I_2 ha valore identico, perchè la corrente entrante nell'amplificatore è nulla.

La tensione V_x è data da $V_n - I_2 R_2 = 0 - I_2 R_2 = -0.1$ mA \times 10k Ω = -1V; di conseguenza $I_3 = -V_x/R_3 = 1V/0.1$ k Ω = 10 mA; $I_L = I_2 + I_3 = 10.1$ mA.

1.2 Calcolare la tensione V_x

1.2 $V_x = -1$ V, vedi sopra

1.3 Calcolare la corrente I_L e la corrente erogata dall'uscita dell'amplificatore I_{out}

1.3 $I_L = 10.1 \text{ mA} = -I_{out}$

1.4 Determinare il massimo valore di R_L per il quale V_o è maggiore di -13 V

1.4 $V_o = V_x - I_L R_L > -13 \text{ V}$; $-1 - I_L R_L > -13 \text{ V}$; $12 \text{ V} > 10.1 \text{ mA} \times R_L$; $R_L < 12 \text{ V} / 10.1 \text{ mA}$; $R_L < 1188 \text{ ohm}$

1.5 Nel caso in cui R_L vari nell'intervallo da 100 ohm a 1 kohm , qual è la corrispondente variazione di I_L e V_o ?

1.5 I_L non dipende da R_L . Per $R_L = 100 \text{ ohm}$, $V_o = V_x - I_L R_L = -1 \text{ V} - 10.1 \text{ mA} \times 0.1 \text{ kohm} = -1 - 1.01 \text{ V} = -2.01 \text{ V}$.

Per $R_L = 1000 \text{ ohm}$ $V_o = V_x - I_L R_L = -1 \text{ V} - 10.1 \text{ mA} \times 1 \text{ kohm} = -1 - 10.1 \text{ V} = -11.1 \text{ V}$

1.6 Qual è la resistenza di uscita vista tra V_x e V_o ?

1.6 Per calcolare la resistenza vista tra V_x e V_o si toglie R_L e la si sostituisce con un generatore di test V_{test} ; si annulla (cortocircuita) V_s . Di conseguenza $I_1 = 0 = I_2$ e $V_x = 0 \text{ V}$. Perciò anche I_3 è nulla e I_{test} non può che essere nulla. Di conseguenza $R_{out} = V_{test} / I_{test} = \infty$, come ci si attendeva, dato che la corrente di uscita I_L è indipendente dal valore della resistenza R_L .

1.7 Qual è la resistenza di uscita vista tra V_o e massa?

1.7 Per calcolare la resistenza vista tra uscita e massa si applica un generatore di corrente I_{test} all'uscita e si annulla il generatore di ingresso. Come riportato al punto precedente, $I_2 = I_3 = 0$ e di conseguenza anche I_L è nulla e $V_o = 0 \text{ V}$. Ma V_o coincide con V_{test} , perciò $V_{test} / I_{test} = 0 / I_{test} = 0 = R_{out}$

1.8 Qual è la resistenza di ingresso vista dal generatore V_s ?

1.8 La resistenza di ingresso vista da V_s è R_1 cioè 10 kohm

1.9 Collegare una resistenza da 1 kohm tra V_o e massa. Di quanto cambiano V_o , I_L e I_{out} ?

1.9 $V_x = -V_s = -1 \text{ V}$ e $I_L = 10.1 \text{ mA}$ non dipendono da R_L o da una resistenza connessa tra V_o e massa. Di conseguenza, data R_L , V_o non cambia quando si connette una resistenza tra V_o e massa (d'altra parte la resistenza di uscita tra V_o e massa è 0 , quindi V_o non dipende dal carico). $I_L + I_{R1k} = I_{out} = I_L + V_o / R_{1k}$. Con $V_s = 1 \text{ V}$, $I_L = 10.1 \text{ mA}$; poniamo $R_L = 1 \text{ kohm}$, quindi $V_o = -11.1 \text{ V}$; $V_o / R_L = -11.1 / 1 \text{ kohm} = -11.1 \text{ mA}$ (da V_o verso massa), quindi $I_{out} = -10.1 \text{ mA} - 11.1 \text{ mA} = -21.2 \text{ mA}$ (dall'uscita dell'amplificatore verso R_L , quindi una corrente pari a 21.2 mA entra nell'amplificatore).

1.10 Scrivere l'espressione del guadagno I_L / V_s . Di che tipo di guadagno si tratta? Qual è l'unità di misura corrispondente?

1.10 $I_L = I_2 + I_3 = V_s / R_2 + V_s / R_3$; $G_m = I_L / V_s = 1 / R_2 + 1 / R_3 = [\text{A/V}]$ or [Siemens].

E' un guadagno di transconduttanza.

Il guadagno in tensione è invece $A_v = V_o / V_s$

$V_o = V_x - (I_2 + I_3) R_L = -V_s - ((V_s / R_2) + (V_s / R_3)) R_L$

$A_v = -(1 + (R_L / R_2) + (R_L / R_3))$

Simulazione SPICE

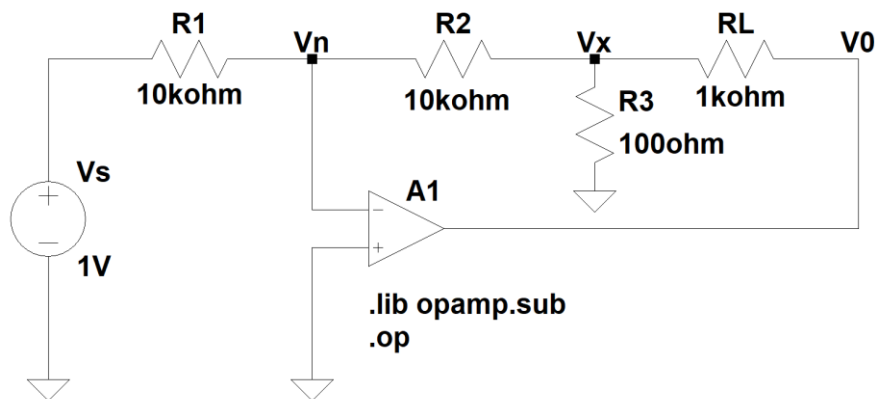
Per la simulazione utilizziamo il modello di default dell'operazionale in LTSpice, modificando il valore del guadagno ad anello aperto A_{ol} . Scegliamo un valore pari a 10^9 V/V , come approssimazione del guadagno infinito dell'opamp ideale.

Le istruzioni da inserire sono

.lib opamp.sub *per richiamare il sottocircuito che rappresenta l'opamp

.op *per simulare correnti e tensioni in DC con la tensione V_s applicata

Poniamo inizialmente $R_L = 1 \text{ kohm}$



Il listato SPICE corrispondente è il seguente:

```
*opamp con rete di feedback a T
XA1 Vn 0 V0 opamp Aol=1000MEG GBW=10Meg
R2 Vn Vx 10kohm
RL Vx V0 1kohm
R3 0 Vx 100ohm
R1 Vn N001 10kohm
Vs N001 0 1V
.lib opamp.sub
.op
.backanno
.end
```

I risultati della simulazione con $R_L = 1 \text{ kohm}$ sono:

--- Operating Point ---

V(v0):	-11.1	voltage
V(vn):	1.11101e-008	voltage
V(vx):	-1	voltage
V(n001):	1	voltage
I(R1):	-0.0001	device_current
I(R3):	0.01	device_current
I(Rl):	0.0101	device_current
I(R2):	0.0001	device_current
I(Vs):	-0.0001	device_current
Ix(a1:3):	0.0101	subckt_current

Come avevamo calcolato, la tensione di uscita V_0 è -11.1 V, $V_x = -1\text{V}$, la corrente nelle resistenze R_1 e R_2 è 0.1 mA, la corrente nella resistenza R_3 è 10mA. la corrente nella resistenza R_L è 10.1 mA. La corrente di uscita dell'amplificatore è 10.1 mA.

I risultati della simulazione con $R_L = 100 \text{ ohm}$ sono:

--- Operating Point ---

V(v0):	-2.01	voltage
V(vn):	2.0201e-009	voltage
V(vx):	-1	voltage
V(n001):	1	voltage
I(R1):	-0.0001	device_current
I(R3):	0.01	device_current
I(R1):	0.0101	device_current
I(R2):	0.0001	device_current
I(Vs):	-0.0001	device_current
Ix(a1:3):	0.0101	subckt_current

La tensione di uscita V_0 diventa -2.01V. Si noti che le correnti non cambiano.

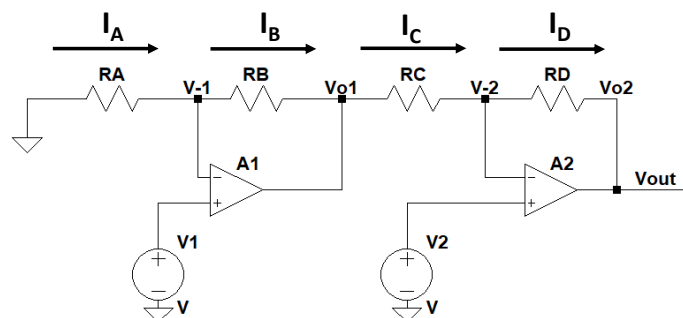
Ora colleghiamo una resistenza R_4 da 1kohm tra V_0 e massa con $R_L = 1\text{kohm}$; il risultato della simulazione è il seguente. Come trovato precedentemente V_0 , $I(R3)$, $I(R1)$ e $I(RL)$ non cambiano

--- Operating Point ---

V(v0):	-11.1	voltage
V(vn):	1.11212e-008	voltage
V(vx):	-1	voltage
V(n001):	1	voltage
I(R4):	-0.0111	device_current
I(R1):	-0.0001	device_current
I(R3):	0.01	device_current
I(R1):	0.0101	device_current
I(R2):	0.0001	device_current
I(Vs):	-0.0001	device_current
Ix(a1:3):	0.0212	subckt_current

La corrente $I(R4)$ (da V_0 a massa) è data da $V_0/R_4 = -11.1/1000 = -11.1 \text{ mA}$. La corrente all'uscita dell'amplificatore, entrante nell'amplificatore e quindi positiva, è data da $I_{\text{out}} = I_L - I(R4) = 10.1 \text{ mA} + 11.1 \text{ mA} = 21.2 \text{ mA}$.

Esercizio 2 Amplificatore differenziale



Nel circuito in figura, A1 e A2 sono due amplificatori operazionali ideali.

2.1 Utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti, scrivere l'espressione di V_{01} e $V_{02}=V_{\text{out}}$ in funzione di R_A , R_B , R_C , R_D .

2.2 Scrivere V_1 e V_2 in funzione di $V_{\text{id}}/2$ e V_{cm} . Scrivere l'espressione del guadagno differenziale e del guadagno di modo comune secondo la formula $V_{\text{out}} = A_d V_{\text{id}} + A_{\text{cm}} V_{\text{cm}}$

2.3 Sia $R_D/R_C = 10$. Trovare il valore di R_B/R_A per il quale il guadagno differenziale A_d vale 30. Quanto vale il guadagno di modo comune A_{cm} ? Quanto vale il fattore di reiezione di modo comune CMRR?

2.4 Sia $R_A = 1\text{k}\Omega$, $R_B = 2\text{k}\Omega$, $R_C = 3\text{k}\Omega$, $R_D = 4\text{k}\Omega$, $V_1 = 2\text{V}$ e $V_2 = 3\text{V}$. Calcolare V_{out} , I_A , I_B , I_C , I_D , e la corrente erogata/assorbita dall'uscita degli amplificatori operazionali

2.5 Trovare la condizione corrispondente ad $A_{cm} = 0$

Soluzione

2.1 Utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti, scrivere l'espressione di V_{01} e $V_{02}=V_{out}$ in funzione di R_A , R_B , R_C , R_D .

2.1 Poniamo $V_1 \neq 0$ e $V_2 = 0\text{V}$. La tensione al morsetto invertente del 1mo amplificatore, V_{-1} è uguale a V_1 per il principio di massa virtuale. La corrente I_A è data da $-V_1/R_A$ ed è uguale a I_B . Ma $I_B = (V_1 - V_{01})/R_B$. Quindi $-V_1/R_A = V_1/R_B - V_{01}/R_B$. Perciò $V_{01} = V_1 \times R_B(1/R_A + 1/R_B)$ ovvero $V_{01} = V_1(1 + R_B/R_A)$. Poichè $V_2 = 0\text{V}$, $V_{-2} = 0\text{V}$. $I_C = V_{01}/R_C = I_D = -V_{out}/R_D$. Quindi $V_{out} = -V_{01}(R_D/R_C) = -V_1(1 + R_B/R_A)(R_D/R_C)$

Ora poniamo $V_1 = 0$ e $V_2 \neq 0$. Dato che I_A e I_B sono nulle, V_{01} è pari a 0V . Quindi I_C è data da $-V_2/R_C$ (per il principio di massa virtuale) ed è uguale a I_D (perchè nell'ingresso invertente dell'opamp non può entrare corrente). $V_{out} = V_2 - I_D R_D = V_2 + V_2(R_D/R_C) = V_2(1 + R_D/R_C)$.

Le due espressioni di V_{01} , V_{out} nei due casi potevano essere ricavate direttamente dalle espressioni del guadagno della configurazione invertente e non invertente.

Sommando le due soluzioni, secondo il principio di sovrapposizione degli effetti si ottiene

$$V_{out} = V_2 \left(1 + \frac{R_D}{R_C}\right) - V_1 \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) \left(\frac{R_D}{R_C}\right) = V_2 \left(1 + \frac{R_D}{R_C}\right) - V_1 \left(\frac{R_B R_D}{R_A R_C} + \frac{R_D}{R_C}\right)$$

E' evidente che le condizioni di bilanciamento dell'amplificatore differenziale sono date da

$$\frac{R_B R_D}{R_A R_C} = 1, \quad \text{ovvero} \quad \frac{R_B}{R_A} = \frac{R_C}{R_D}$$

2.2 Scrivere V_1 e V_2 in funzione di $V_{id}/2$ e V_{cm} . Scrivere l'espressione del guadagno differenziale e del guadagno di modo comune secondo la formula $V_{out} = A_d V_{id} + A_{cm} V_{cm}$

2.2 Scrivo V_1 e V_2 in funzione di v_{id} e v_{icm} :

$$V_1 = v_{icm} - v_{id}/2$$

$$V_2 = v_{icm} + v_{id}/2$$

in questo modo $V_2 - V_1 = v_{id}$ e $(V_1 + V_2)/2 = v_{icm}$

Sostituisco nell'espressione della tensione di uscita V_{out} e trovo il guadagno differenziale e di modo comune:

$$V_{out} = V_2 \left(1 + \frac{R_D}{R_C}\right) - V_1 \left(\frac{R_B R_D}{R_A R_C} + \frac{R_D}{R_C}\right) = \left(v_{icm} + \frac{v_{id}}{2}\right) \left(1 + \frac{R_D}{R_C}\right) - \left(v_{icm} - \frac{v_{id}}{2}\right) \left(\frac{R_B R_D}{R_A R_C} + \frac{R_D}{R_C}\right)$$

$$V_{out} = v_{icm} \left(1 + \frac{R_D}{R_C}\right) + \frac{v_{id}}{2} \left(1 + \frac{R_D}{R_C}\right) - v_{icm} \left(\frac{R_B R_D}{R_A R_C} + \frac{R_D}{R_C}\right) + \frac{v_{id}}{2} \left(\frac{R_B R_D}{R_A R_C} + \frac{R_D}{R_C}\right)$$

$$V_{out} = v_{icm} \left(1 + \frac{R_D}{R_C} - \frac{R_B R_D}{R_A R_C} - \frac{R_D}{R_C} \right) + \frac{v_{id}}{2} \left(1 + \frac{R_D}{R_C} + \frac{R_B R_D}{R_A R_C} + \frac{R_D}{R_C} \right)$$

$$V_{out} = v_{icm} \left(1 - \frac{R_B R_D}{R_A R_C} \right) + \frac{v_{id}}{2} \left(1 + 2 \frac{R_D}{R_C} + \frac{R_B R_D}{R_A R_C} \right)$$

quindi il guadagno di modo comune è $A_{cm} = \left(1 - \frac{R_B R_D}{R_A R_C} \right)$ mentre quello differenziale è dato da

$A_d = \frac{1}{2} \left(1 + 2 \frac{R_D}{R_C} + \frac{R_B R_D}{R_A R_C} \right)$. La condizione perchè il guadagno di modo comune sia nullo è

$\frac{R_B R_D}{R_A R_C} = 1$. Sotto questa condizione $A_d = 1 + \frac{R_D}{R_C}$

2.3 Sia $R_D/R_C = 10$. Trovare il valore di R_B/R_A per il quale il guadagno differenziale A_d vale 30. Quanto vale il guadagno di modo comune A_{cm} ? Quanto vale il fattore di reiezione di modo comune CMRR?

2.3 Poniamo $R_D/R_C = 10$. Poichè deve essere $A_d = \frac{1}{2} \left(1 + 2 \frac{R_D}{R_C} + \frac{R_B R_D}{R_A R_C} \right) = 30$ V/V si ha

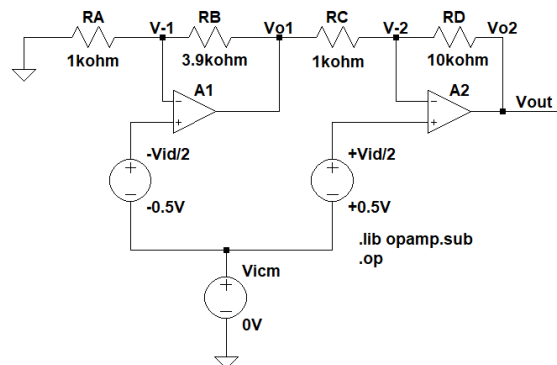
$30 = \frac{1}{2} \left(1 + 20 + 10 \frac{R_B}{R_A} \right)$, quindi $\frac{R_B}{R_A} = \frac{60 - 1 - 20}{10} = 3.9$. Di conseguenza $A_{cm} = \left(1 - \frac{R_B R_D}{R_A R_C} \right) = 1 - 10 \times 3.9 = -38$ V/V.

Il rapporto di reiezione di modo comune è dato da $CMRR = 20 \log (|A_d|/|A_{cm}|) = 20 \log(30/38) = 20 \log(0.789) = -2.05$ dB

- 0.11 dB.

2.3.1 Simulazione SPICE

Nel seguito sono presentati i circuiti utilizzati per la simulazione SPICE e i risultati della simulazione nel punto operativo (DC) relativi rispettivamente a un segnale differenziale puro $v_{id} = 1V$ e a un segnale di modo comune della stessa ampiezza.

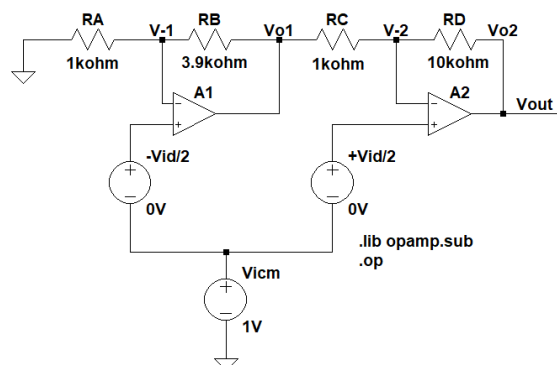


Circuito utilizzato per valutare l'amplificazione differenziale nelle condizioni richieste nella domanda 2.3

--- Operating Point ---

V(v-1):	-0.5	voltage
V(vo1):	-2.45	voltage
V(v-2):	0.5	voltage
V(vout):	30	voltage
V(n001):	-0.5	voltage
V(n002):	0.5	voltage
V(n003):	0	voltage
I(Rd):	0.00295	device_current
I(Rc):	0.00295	device_current
I(Rb):	-0.0005	device_current
I(Ra):	-0.0005	device_current
I(Vcm):	0	device_current
I(+vid/2):	0	device_current
I(-vid/2):	0	device_current
Ix(a1:3):	0.00345001	subckt_current
Ix(a2:3):	-0.00294999	subckt_current

Risultato della simulazione di correnti e tensioni nel punto operativo del circuito relativo alla domanda 2_3 quando è applicato un segnale differenziale puro pari a 1V



Circuito utilizzato per la simulazione delle correnti e tensioni risultanti dall'applicazione di un segnale di modo comune pari a 1V

--- Operating Point ---

```

V(v-1) :      1          voltage
V(vo1) :      4.9        voltage
V(v-2) :      1          voltage
V(vout) :     -38        voltage
V(n001) :      1          voltage
V(n002) :      1          voltage
V(n003) :      1          voltage
I(Rd) :      -0.0039     device_current
I(Rc) :      -0.0039     device_current
I(Rb) :      0.001       device_current
I(Ra) :      0.001       device_current
I(Vicm) :      0         device_current
I(+vid/2) :      0        device_current
I(-vid/2) :      0        device_current
Ix(a1:3) :    -0.00490007 subckt_current
Ix(a2:3) :      0.00390008 subckt_current

```

Risultato della simulazione del comportamento del circuito conseguente alla applicazione di un segnale di modo comune pari a 1V.

2.4 Sia $R_A = 1\text{kohm}$, $R_B = 2\text{kohm}$, $R_C = 3\text{kohm}$, $R_D = 4\text{kohm}$, $V_1 = 2\text{V}$ e $V_2 = 3\text{V}$. Calcolare V_{out} , I_A , I_B , I_C , I_D , e la corrente erogata/assorbita dall'uscita degli amplificatori operazionali

2.4 $R_A = 1\text{kohm}$, $R_B = 2\text{kohm}$, $R_C = 3\text{kohm}$, $R_D = 4\text{kohm}$, $V_1 = 2\text{V}$ e $V_2 = 3\text{V}$

$$V_{out} = V_2 \left(1 + \frac{R_D}{R_C} \right) - V_1 \left(\frac{R_B R_D}{R_A R_C} + \frac{R_D}{R_C} \right) = 3 \left(1 + \frac{4}{3} \right) - 2 \left(\frac{2 \cdot 4}{1 \cdot 3} + \frac{4}{3} \right) = 3 \left(\frac{7}{3} \right) - 2 \left(\frac{12}{3} \right) = 7 - 8 = -1\text{V}$$

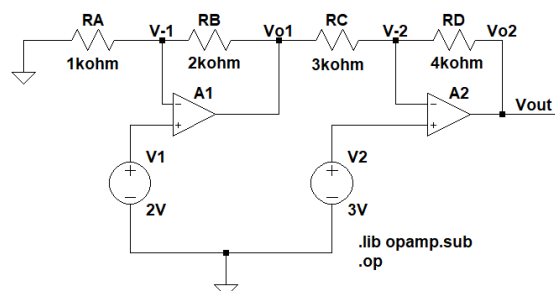
$$V_{-1}=V_1= 2\text{V}; I_A = -2\text{V}/1\text{kohm} = -2\text{mA} = I_B; V_{01} = V_1(1+R_B/R_A) = 3V_1 = 6\text{V}$$

$$V_{-2}=V_2= 3\text{V}; I_C = (V_{01}-V_2)/R_C = (6 - 3)/3\text{kohm}= 1 \text{ mA}$$

$I_{out}(A1)$ eroga una corrente uscente pari alla somma di I_B e I_C , cioè 3mA. $I_D = I_C = 1\text{mA}$

$I_{out}(A2)$ assorbe una corrente entrante pari a 1 mA

2.4.1 Simulazione SPICE



Circuito utilizzato per la simulazione SPICE con i dati della domanda 2.4

Il listato SPICE corrispondente è il seguente:

```
*domanda 2_4
RA V-1 0 1kohm
RB Vo1 V-1 2kohm
RC V-2 Vo1 3kohm
RD Vout V-2 4kohm
XA1 V-1 N001 Vo1 opamp Aol=1000MEG GBW=10000Meg
XA2 V-2 N002 Vout opamp Aol=1000MEG GBW=10000Meg
V1 N001 0 2V
V2 N002 0 3V
.lib opamp.sub
.op
.backanno
.end
```

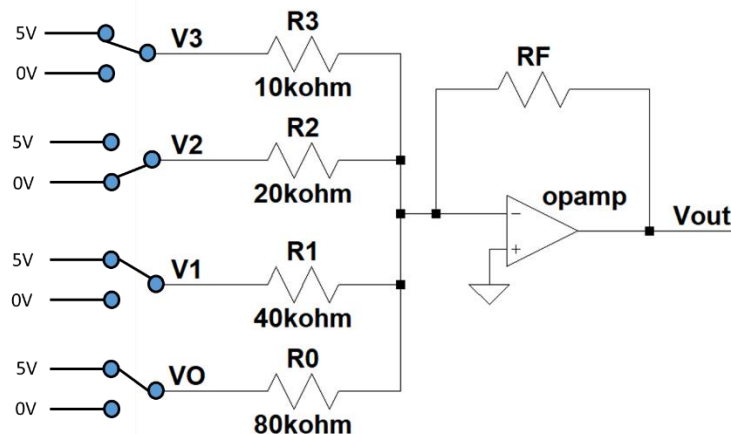
La simulazione conferma i risultati ottenuti analiticamente:

```
--- Operating Point ---

V(v-1):          2          voltage
V(vo1):          6          voltage
V(v-2):          3          voltage
V(vout):         -1          voltage
V(n001):         2          voltage
V(n002):         3          voltage
I(Rd):          -0.001      device_current
I(Rc):          -0.001      device_current
I(Rb):           0.002      device_current
I(Ra):           0.002      device_current
I(V2):           0          device_current
I(V1):           0          device_current
Ix(a1:3):       -0.00300006 subckt_current
Ix(a2:3):        0.00100017 subckt_current
```

2.5 Trovare la condizione corrispondente ad $A_{cm} = 0$
si veda la soluzione della domanda 2.1

Esercizio 3 Convertitore digitale/analogico



La figura mostra un circuito per un convertitore digitale/analogico (DAC). Il circuito di ingresso è composto da 4 interruttori comandati da una parola binaria a 4 bit $[a_3 a_2 a_1 a_0]$ dove $a_3 a_2 a_1$ e a_0 assumono il valore 0 (= ingresso collegato a 0 V) oppure 1 (= ingresso collegato a 5V). a_3 è il bit più significativo.

L'uscita è rappresentata da una tensione analogica V_{out} proporzionale al valore dell'ingresso digitale; l'effetto di ogni ingresso sull'uscita è determinato dal valore della resistenza in serie all'ingresso stesso.

3.1 Dimostrare che V_{out} è dato da $V_{out} = -\frac{R_F}{16} [2^0 a_0 + 2^1 a_1 + 2^2 a_2 + 2^3 a_3]$ dove R_F è in kohm.

3.2 Si determini il valore di R_F tale che V_{out} vari tra 0 e -12 V.

3.1 Il circuito rappresenta un sommatore invertente; per ogni ingresso il guadagno è dato da $-R_F/R_{in}$. Inoltre, applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, si nota che gli ingressi collegati a massa sono ininfluenti, dato che, per il principio di massa virtuale $V_+ = V_- = 0V$; di conseguenza, se l'ingresso è connesso a massa nella resistenza corrispondente non passa corrente. La tensione di uscita, data dalla sovrapposizione degli effetti, è quindi

$$V_{out} = -5V(a_0 R_F/R_0 + a_1 R_F/R_1 + a_2 R_F/R_2 + a_3 R_F/R_3) = -5(a_0 R_F/80 + a_1 R_F/40 + a_2 R_F/20 + a_3 R_F/10) =$$

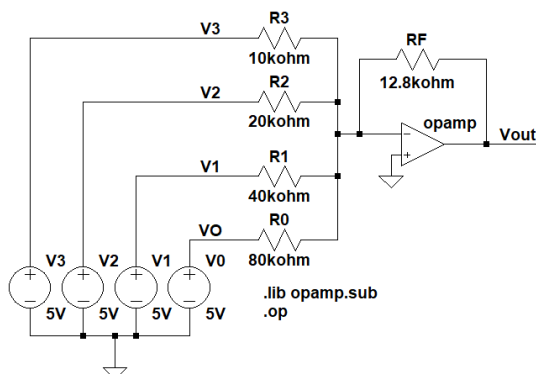
$$-(a_0 R_F/16 + a_1 R_F/8 + a_2 R_F/4 + a_3 R_F/2) = -(R_F/16)(a_0 2^0 + a_1 2^1 + a_2 2^2 + a_3 2^3)$$

$$\text{quindi } V_{out} = -(R_F/16)(a_0 2^0 + a_1 2^1 + a_2 2^2 + a_3 2^3) \text{ c.v.d.}$$

3.2 Al valore digitale 1111 deve corrispondere il valore analogico più alto, ovvero -12V quindi deve essere $R_F = (16 * V_{out}) / (2^0 + 2^1 + 2^2 + 2^3) = (16 * V_{out}) / 15 \text{ k}\Omega = (16 * 12 / 15) = 12.8 \text{ k}\Omega$

3.2.1 Simulazione SPICE

Il circuito del convertitore D/A è il seguente:



sono stati omessi gli switch digitali; agli ingressi sono presenti le tensioni corrispondenti al valore digitale 1111. La simulazione mostra che con $R_F = 12.8 \text{ k}\Omega$, la tensione di uscita corrispondente a 1111 è effettivamente -12V.

--- Operating Point ---

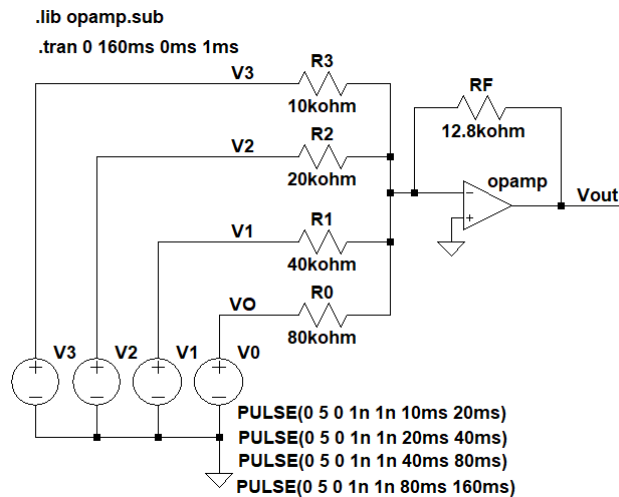
V(vout) :	-12	voltage
V(n001) :	1.20009e-011	voltage
V(v3) :	5	voltage
V(v2) :	5	voltage
V(v1) :	5	voltage
V(vo) :	5	voltage
I(R0) :	-6.25e-005	device_current
I(R1) :	-0.000125	device_current
I(R2) :	-0.00025	device_current
I(R3) :	-0.0005	device_current
I(Rf) :	-0.0009375	device_current
I(V3) :	-0.0005	device_current
I(V2) :	-0.00025	device_current
I(V1) :	-0.000125	device_current
I(V0) :	-6.25e-005	device_current
Ix(opamp:3) :	0.0009375	subckt_current

Questo circuito converte un valore binario a 4 bit in una tensione compresa tra 0V (per $a_3a_2a_1a_0 = 0000$) e -12V (per $a_3a_2a_1a_0 = 1111$). L'intervallo di tensioni tra 0 e -12V è suddiviso in 2^4-1 parti, ciascuna corrispondente alla cifra binaria $a_3a_2a_1a_0$ secondo l'equazione

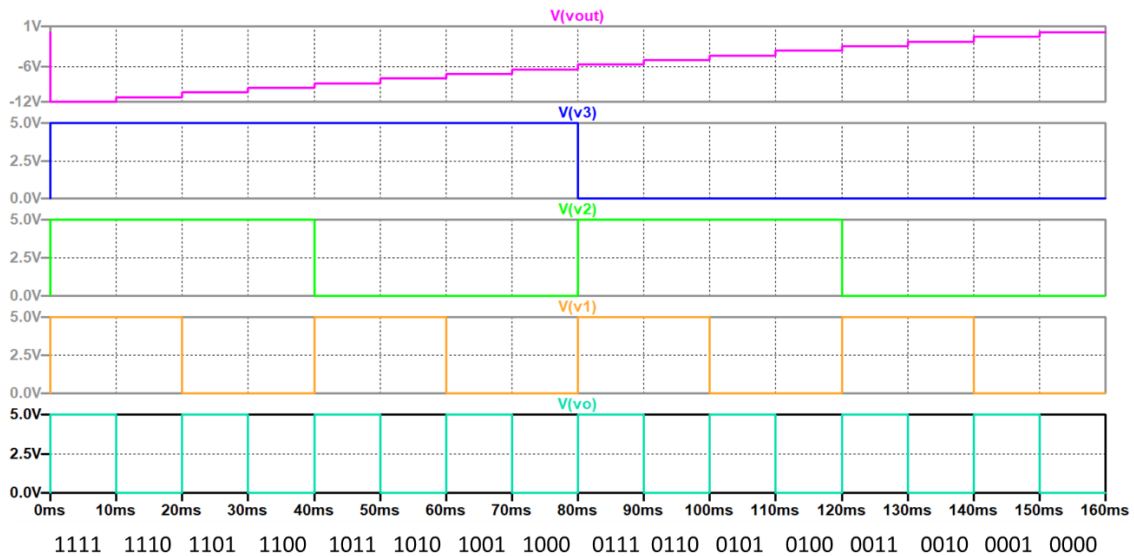
$$V_{out} = -\frac{12.8}{16} [2^0 a_0 + 2^1 a_1 + 2^2 a_2 + 2^3 a_3]$$

Di conseguenza, a titolo di esempio, la cifra binaria 0001 corrisponde a $-12.8/16 = -800\text{mV}$, mentre 0100 corrisponde a $-4 \cdot 12.8/16 = -3.2 \text{ V}$.

Per studiare il comportamento del convertitore in SPICE, si applica un segnale a onda quadra al bit meno significativo, e si dimezza la frequenza passando al bit successivo. In questo modo tutte le parole binarie da 1111 a 0000 vengono applicate in sequenza; la forma d'onda della tensione di uscita permette di verificare l'esattezza della conversione. Nel seguito viene mostrato lo schema circuitale utilizzato per la conversione, e il risultato della simulazione della tensione di uscita in funzione del valore digitale applicato all'ingresso, dove '1' corrisponde a $V_{in}=5\text{V}$, e '0' corrisponde a 0V.



Circuito utilizzato per la simulazione SPICE del convertitore digitale-analogico. Per l'amplificatore operazionale sono stati utilizzati i valori di default della libreria. Il periodo della forma d'onda rettangolare applicata agli ingressi è di 20ms per a_0 , 40ms per a_1 , 80 ms per a_2 e 160 ms per a_3 .



Forme d'onda di tensione risultanti per V_{out} (in alto) e $V_3...V_0$. Alla base della figura sono riportati i valori binari corrispondenti a ciascun semiperiodo di V_0 , la tensione a frequenza maggiore