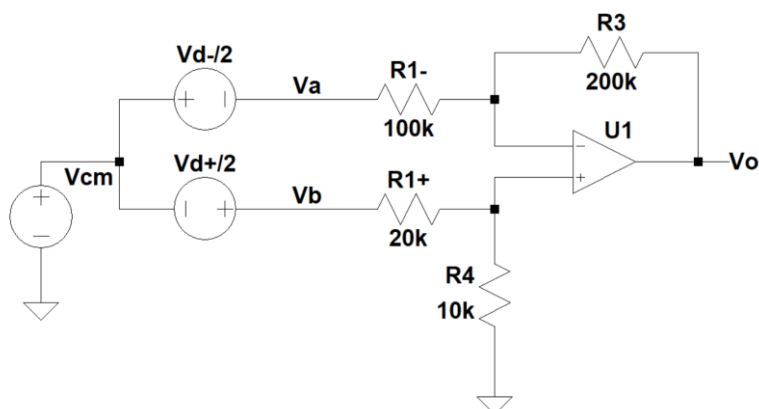


come a sinistra o come a destra? c'è differenza ? (sì, vedi alla fine)

Esercizio 5/5



5. Dato il circuito in figura, nel quale U1 è un amplificatore operazionale ideale, e il valore delle resistenze è espresso in k Ω ,

5.1 Calcolare il guadagno differenziale $A_d = V_o/V_d$, con $V_{cm} = 0$ V.

5.2 Calcolare il guadagno di modo comune $A_{cm} = V_o/V_{cm}$, con $V_d = 0$ V.

5.3 Calcolare il CMRR in dB

5.4 Modificare il valore di R_{1+} e R_4 in modo da ottenere $A_{cm} = 0$, $CMRR = \infty$

5.5 Calcolare, dopo la modifica al punto 5.4, la resistenza differenziale di ingresso.

Soluzione .

Quando agli ingressi sono applicate le tensioni $-V_d/2=V_a$ e $+V_d/2=V_b$, con $V_{cm}=0$, il principio di sovrapposizione degli effetti fornisce

$$V_o = -\frac{V_d}{2} \left(-\frac{R_3}{R_{1-}} \right) + \frac{V_d}{2} \left(\frac{R_4}{R_{1+} + R_4} \right) \left(1 + \frac{R_3}{R_{1-}} \right) = \frac{V_d}{2} \left(\left(\frac{200}{100} \right) + \left(\frac{10}{20 + 10} \right) \left(1 + \frac{200}{100} \right) \right)$$

$$= \frac{V_d}{2} \left(2 + \left(\frac{1}{3} \right) (1 + 2) \right) = V_d \frac{3}{2}$$

quindi $A_d = 3/2$; $20 \log(3/2) = 3.52$ dB (5.1)

Listato SPICE

```

R1- N001 Va 100k
R1+ N003 Vb 20k
R3 Vo N001 200k
R4 0 N003 10k
XU1 N001 N003 Vo opamp Aol=1000000MEG GBW=10Meg
Vd+/2 Vb N002 10m
Vd-/2 N002 Va 10m
Vcm N002 0 0
.lib opamp.sub
.op
.backanno
.end

```

Simulazione SPICE (per $V_d/2 = 10 \text{ mV}$, $V_d = 20 \text{ mV}$, $V_{cm} = 0 \text{ V}$)

--- Operating Point ---

```

V(n001):      0.00333333      voltage
V(va):        -0.01          voltage
V(n003):      0.00333333      voltage
V(vb):        0.01          voltage
V(vo):        0.0300002      voltage
V(n002):      0              voltage
I(R4):        -3.33333e-007    device_current
I(R3):        1.33334e-007     device_current
I(R1+):       -3.33333e-007    device_current
I(R1-):       1.33333e-007     device_current
I(Vcm):       -2e-007         device_current
I(Vd-/2):     -1.33333e-007    device_current
I(Vd+/2):     -3.33333e-007    device_current
Ix(u1:3):     -9.75077e-008    subckt_current

```

Quando agli ingressi è applicata la tensione comune V_{cm} e $V_d = 0$, il principio di sovrapposizione degli effetti fornisce

$$\begin{aligned}
 V_o &= V_{cm} \left(-\frac{R_3}{R_{1-}} \right) + V_{cm} \left(\frac{R_4}{R_{1+} + R_4} \right) \left(1 + \frac{R_3}{R_{1-}} \right) = V_{cm} \left(\left(-\frac{200}{100} \right) + \left(\frac{10}{20 + 10} \right) \left(1 + \frac{200}{100} \right) \right) \\
 &= V_{cm} \left(-2 + \left(\frac{1}{3} \right) (1 + 2) \right) = -V_{cm}
 \end{aligned}$$

quindi $A_{cm} = -1$; $20 \log(-1) = 0 \text{ dB}$ (5.2) ; $CMRR = 3.52 - 0 = 3.52 \text{ dB}$ (5.3)

CMRR= 3.52 dB	$A_d=3/2$	$A_{CM} = -1$
---------------	-----------	---------------

Simulazione SPICE (per $V_{cm} = 20 \text{ V}$, $V_d = 0 \text{ V}$)

--- Operating Point ---

```

V(n001):      6.66667        voltage
V(va):        20             voltage
V(n003):      6.66667        voltage
V(vb):        20             voltage
V(vo):        -20            voltage
V(n002):      20             voltage
I(R4):        -0.000666667    device_current

```

```

I(R3):          -0.000133333   device_current
I(R1+):         -0.000666667   device_current
I(R1-):         -0.000133333   device_current
I(Vcm):         -0.0008        device_current
I(Vd-/2):       0.000133333    device_current
I(Vd+/2):       -0.000666667   device_current
Ix(u1:3):       1.3365e-006    subckt_current
    
```

Perchè l'amplificatore sia bilanciato ($A_{cm} = 0$, V_o unicamente dipendente da $v_d = v_b - v_a$) deve essere:

$$\left(\frac{R_3}{R_{1-}}\right) = \left(\frac{R_4}{R_{1+} + R_4}\right) \left(1 + \frac{R_3}{R_{1-}}\right)$$

ovvero

$$\left(\frac{R_3}{R_{1-}}\right) \left(1 + \frac{R_{1+}}{R_4}\right) = \left(1 + \frac{R_3}{R_{1-}}\right)$$

$$\left(\frac{R_3}{R_{1-}} + \frac{R_{1+}}{R_4} \frac{R_3}{R_{1-}}\right) = \left(1 + \frac{R_3}{R_{1-}}\right)$$

$$\left(1 + \frac{R_{1+}}{R_4}\right) \frac{R_3}{R_{1-}} = \left(1 + \frac{R_3}{R_{1-}}\right)$$

$$\left(1 + \frac{R_{1+}}{R_4} - 1\right) \frac{R_3}{R_{1-}} = 1$$

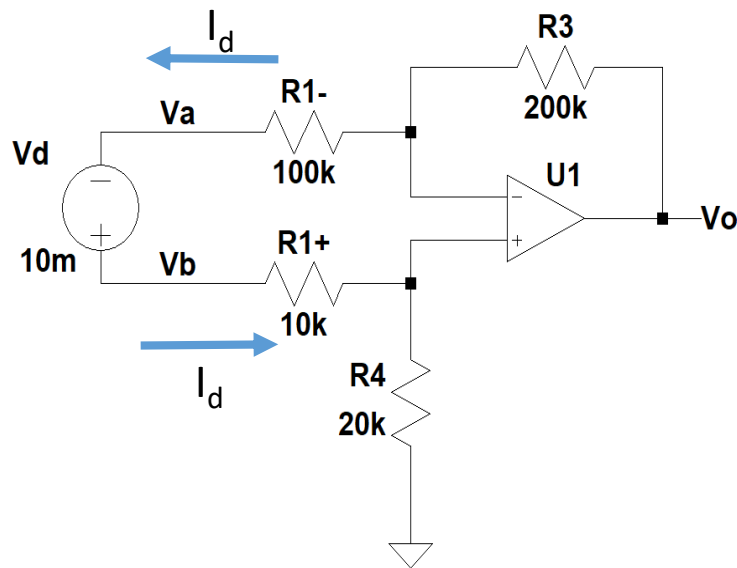
$$\frac{R_{1+}}{R_4} \frac{R_3}{R_{1-}} = 1$$

quindi:

$$\frac{R_{1+}}{R_4} = \frac{R_{1-}}{R_3}$$

La scelta più semplice diventa $R_4 = R_3$ e $R_{1+} = R_{1-} = R_1$ (5.4). La resistenza differenziale vista da un generatore collegato tra i due ingressi V_a e V_b è data dalla somma delle resistenze R_{1+} e R_{1-} (5.5): infatti, con riferimento alla figura

.lib opamp.sub .op



$$V_- - V_a = I_d R_{1-}; \quad V_a = V_- - I_d R_{1-}$$

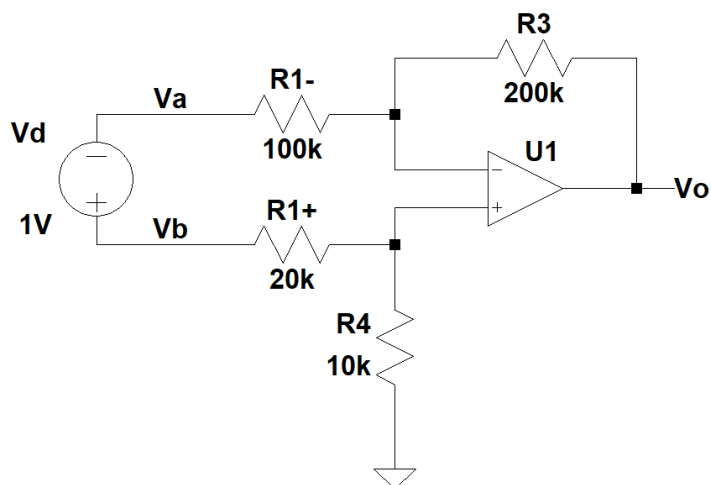
$$V_b - V_+ = I_d R_{1+}; \quad V_b = V_+ + I_d R_{1+}$$

quindi $V_d = V_b - V_a = V_+ + I_d R_{1+} - V_- + I_d R_{1-} = I_d (R_{1+} + R_{1-})$ perchè per il principio di massa virtuale $V_+ = V_-$.

Si noti che se si applica un generatore differenziale come mostrato in figura, il segnale differenziale è dato da $V_d = V_b - V_a$, ma il segnale di modo comune NON E' NULLO.

NOTA BENE : con riferimento all'esercizio 5 riportato precedentemente, è opportuno notare che connettere il generatore tra i due ingressi NON equivale ad applicare un segnale differenziale puro, come invece avviene se si usano i due generatori di tensione uguale e opposta:

.lib opamp.sub .op

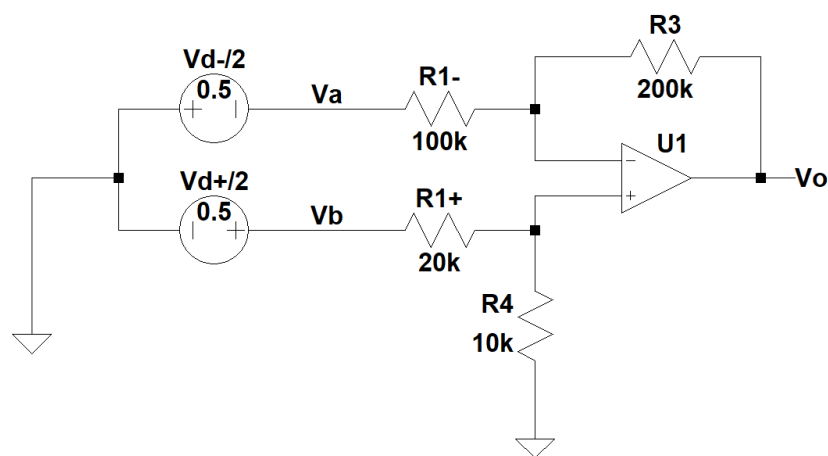


--- Operating Point ---

```

V(n001):      0.0833333      voltage
V(va):        -0.75         voltage
V(n002):      0.0833333      voltage
V(vb):        0.25          voltage
V(vo):        1.75002        voltage
I(R4):        -8.33333e-006  device_current
I(R3):        8.33341e-006   device_current
I(R1+):       -8.33333e-006  device_current
I(R1-):       8.33333e-006   device_current
I(Vd):        -8.33333e-006  device_current
Ix(u1:3):     -1.5115e-006   subckt_current
    
```

.lib opamp.sub .op



--- Operating Point ---

```

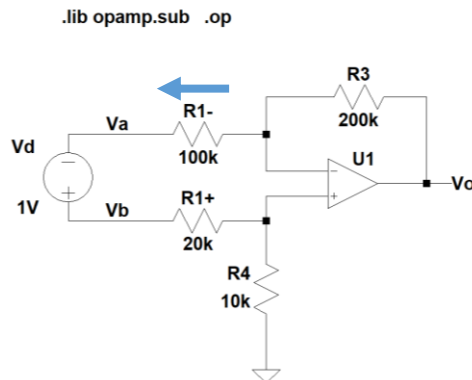
V(n001):      0.166667      voltage
V(va):        -0.5          voltage
V(n002):      0.166667      voltage
V(vb):        0.5           voltage
V(vo):        1.5           voltage
I(R4):        -1.66667e-005  device_current
I(R3):        6.66667e-006   device_current
I(R1+):       -1.66667e-005  device_current
I(R1-):       6.66667e-006   device_current
I(Vd-/2):     -6.66667e-006  device_current
I(Vd+/2):     -1.66667e-005  device_current
Ix(u1:3):     -2.23047e-005  subckt_current
    
```

In entrambi i casi $v_d = v_a - v_b = 1$ V, ma la simulazione SPICE suggerisce $v_o = 1.75$ nel caso del singolo generatore v_d collegato tra gli ingressi, e $v_o = 1.5$ V nel caso dei due generatori.

Cosa è successo ?

Il problema nasce dal fatto che solo nel secondo caso il segnale di modo comune è nullo: $V_{cm} = (V_a + V_b)/2 = (v_d/2 - v_d/2)/2 = 0$. Nel primo caso $v_a + v_b$ è diverso da zero, il che genera un segnale di modo comune v_{cm} che verrà anch'esso amplificato. Infatti $v_o = A_d v_d + A_{cm} v_{cm}$;

nell'amplificatore dell'esempio, $A_d = 1.5$ e $A_{cm} = -1$. Solo nel caso $A_{cm} = 0$ applicare la tensione differenziale in un modo o nell'altro è indifferente.
Calcoliamo v_a e v_b nel caso di generatore connesso tra gli ingressi:



La corrente indicata dalla freccia, I_d , vale $v_d/120k = 1\text{ V}/120k = 8.333\text{ }\mu\text{A}$

$$V_+ = 8.333\text{ }\mu\text{A} \cdot 10k\Omega = 83.33\text{ mV}$$

$$I_d R_{1+} = 8.333\text{ }\mu\text{A} \cdot 20k\Omega = 166.66\text{ mV}$$

$$V_a = V_- - I_d R_{1-} = 83.33\text{ mV} - 8.333\text{ }\mu\text{A} \cdot 100k\Omega = 83.33\text{ mV} - 833.3\text{ mV} = -750\text{ mV}$$

$$V_b = V_+ + 8.333\text{ }\mu\text{A} \cdot 20k\Omega = 83.33\text{ mV} + 166.66\text{ mV} = 250\text{ mV}$$

$$V_{cm} = (V_a + V_b)/2 = (-750 + 250)/2 = -500/2 = -250\text{ mV}$$

$$V_o = A_d V_d + A_{cm} V_{cm} = 1.5 \cdot 1 + (-1)(-0.25) = 1.5 + 0.25 = 1.75\text{ V}$$

Quindi la differenza è dovuta all'amplificazione di modo comune, e l'unico modo di evitare errori è quello di dividere il generatore differenziale in due tensioni uguali e opposte, in modo che la componente di modo comune sia identicamente nulla.