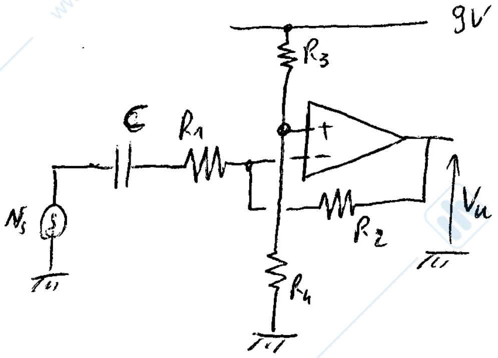
3/12/01

PROGETTARE IL SEGUENTE AMPLIFICATORE:



$R_1 = 10k\Omega$

$R_3 = 10k\Omega$

SEGNALE DI INGRESSO $f > 20Hz$ $(-3dB)$

$A_0 = 10^4$

$GBWP = 1MHz$

$I_{BIAS} = 100nA$

$CMRR = 40dB$

1) DIMENSIONARE R_4 IN MODO DA GARANTIRE LA MASSIMA DINAMICA DI USCITA

2) DIMENSIONARE LA CAPACITÀ C AFFINCHÉ CONSENTA LA CORRETTA AMPLIFICAZIONE DEI SEGNALI FINO A 20Hz (CON UN ERRORE DI GUADAGNO DI $-3dB$) E LA RESISTENZA R_2 PER AVERE $G_{ID} = 50$ SUL SEGNALE

3) CALCOLARE LA BANDA DELL'AMPLIFICATORE

4) CALCOLARE IL CONTRIBUTO SULLA TENSIONE DI USCITA DOVUTO ALLE CORRENTI DI BIAS ED INDICARE COME ANNULLARE TALE CONTRIBUTO

5) CALCOLARE L'EFFETTO DEL CMRR

6) SUPPONENDO CHE L'ALIMENTAZIONE SIA SOGGETTA A UN SEGNALE DI RIPPLE DI $\Delta V_R = 10mV \cdot \sin(2\pi \cdot 50Hz \cdot t)$, CALCOLARE IL DISTURBO SULL'USCITA E INDICARE UNA POSSIBILE SOLUZIONE PER RIDURRE IL DISTURBO IN USCITA $< 1mV$

SOLUZIONE:

1) Per garantire la massima dinamica di uscita, il valore di polarizzazione di V_u deve essere:

$$V_u = \frac{V_{cc}}{2} = 4,5V$$

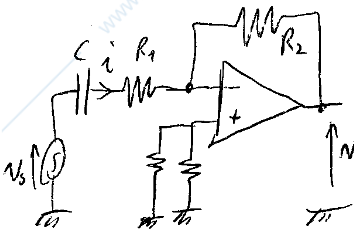
Essendo C un circuito aperto in continua, $i_{R_1} = 0 \Rightarrow V^- = V_u$

per la retroazione, $V^+ = V^- \Rightarrow V^+ = V_u$

ma $V^+ = \frac{V_{cc} R_4}{R_3 + R_4} \Rightarrow R_4 = V_u \frac{R_3}{V_{cc} - V_u} = 10k\Omega$

2) Sul segnale, il guadagno ideale vale:

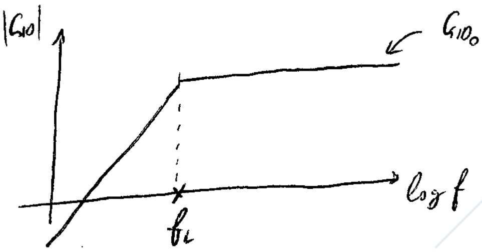
per la retroazione, $V^+ = V^- = 0$



$$i = \frac{v_s}{R_1 + \frac{1}{sC}}$$

$$v_u = -R_2 i = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{sC}} v_s$$

$$G_{I0} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{sCR_1}{1 + sCR_1}$$



$G_{I0_0} = -\frac{R_2}{R_1}$

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$

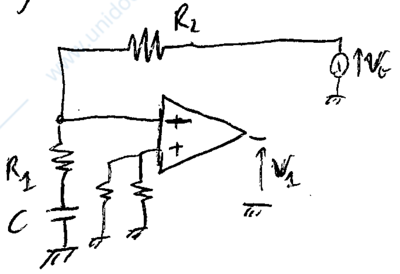
Per amplificare correttamente ~~i~~ segnali di frequenza fino a 20Hz con un errore max di -3dB è necessario imporre:

$$f_L \leq 20Hz \Rightarrow C \geq \frac{1}{2\pi\, 20Hz\, R_1} = 0,8\mu F$$

Il guadagno ~~sul segnale~~ ad alta frequenza è invece:

$$G_{I0_0} = -\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_2 = |G_{I0_0}| \cdot R_1 = 50 \cdot 10k\Omega = 500k\Omega$$

4) CALCOLO DI G_{LOOP}:

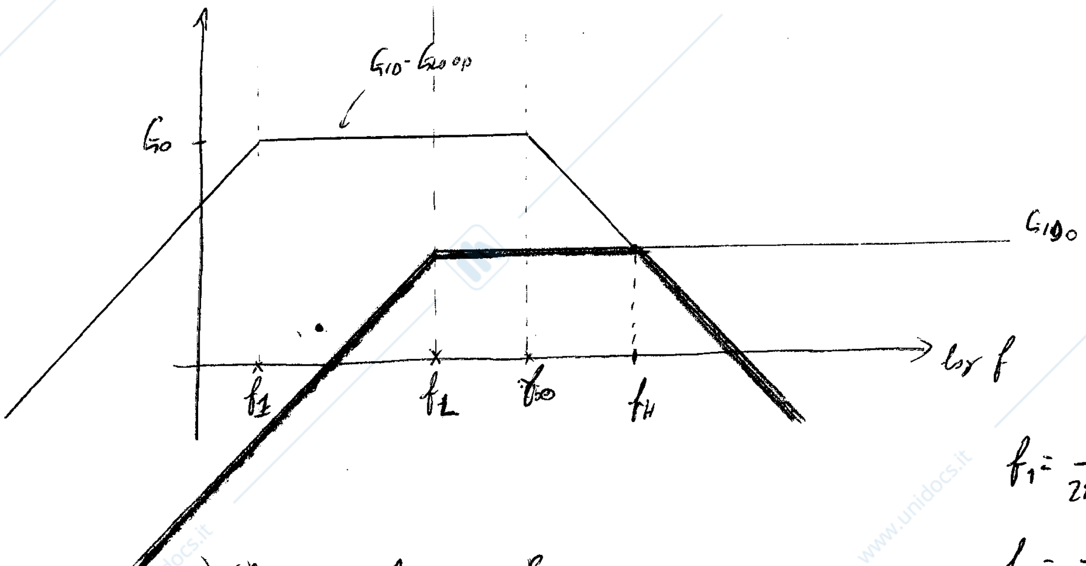


$$V_1 = \underbrace{-A_0 \frac{1}{1+s\tau_0}}_{OPAMP} \cdot \frac{R_1 + \frac{1}{sC}}{R_2 + R_1 + \frac{1}{sC}} v_t$$

$$G_{LOOP} = -A_0 \frac{1}{1+s\tau_0} \cdot \frac{1+sR_1C}{1+s(R_1+R_2)C}$$

$$\tau_0 = \frac{A_0}{2\pi\ GBWP} = \frac{10^4}{2\pi \cdot 10^6 Hz} = 1{,}59\ ms$$

$$G_{ID} \cdot G_{LOOP} = + \frac{R_2}{R_1} \frac{sCR_1}{\cancel{1+sCR_1}} \frac{\cancel{1+sCR_1}}{1+sC(R_1+R_2)} \frac{A_0}{1+s\tau_0} = \frac{R_2}{R_1} \frac{sCR_1}{1+sC(R_1+R_2)} \frac{A_0}{1+s\tau_0}$$



$$f_1 = \frac{1}{2\pi C(R_1+R_2)} = 0{,}39 Hz$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \tau_0} = 100\ Hz$$

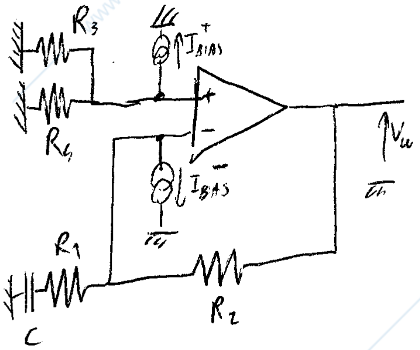
$$f_L = 20 Hz = \frac{1}{2\pi C_1 R_1}$$

$$G_0 \simeq \frac{R_2}{R_1} \frac{\cancel{s}\cancel{C}R_1}{\cancel{s}\cancel{C}(R_1+R_2)} \frac{A_0}{1} = \frac{R_2}{R_1+R_2} A_0 = 9804$$

$$f_H = f_0 \cdot \frac{G_0}{G_{ID_0}} = 100 Hz \cdot \frac{9804}{50} = 19{,}6\ kHz$$

BANDA DELL'AMP.: 20 Hz ÷ 19,6 kHz

4) CORRENTI DI BIAS:



in continua C è un circuito aperto, perciò $i_{R_1} = 0$

$$V_u\Big|_{BIAS} = I_{BIAS}^+ \left(-R_3 // R_4\right) + I_{BIAS}^- R_2$$

$$V_u\Big|_{BIAS} = I_{BIAS} \left(R_2 - \left(R_3 // R_4\right)\right)$$

$$V_u\Big|_{BIAS} = 100nA \cdot \left(500k\Omega - \frac{10k\Omega \cdot 10k\Omega}{10k\Omega + 10k\Omega}\right) \simeq 50mV$$

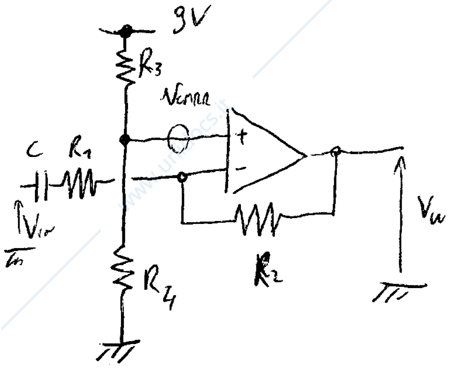
Per annullare l'effetto delle correnti di BIAS è sufficiente porre

$$R_2 = R_3 // R_4 \qquad \text{essendo } R_3 = R_4 \Rightarrow \quad R_2 = \frac{R_3}{2} \Rightarrow R_3 = 2R_2$$

quindi con:

$$R_3 = R_4 = 1M\Omega$$

5) Il CMRR è modellizzabile come un generatore di tensione posto in serie a uno dei due ingressi dell'OPAMP:



per la retroazione $V^+ = V^-$

$$V_{CMRR} \simeq \frac{V^+ + V^-}{2 \cdot CMRR} = \frac{V^+}{CMRR} \underset{R_3 = R_4}{=} \frac{V_{cc}}{2\,CMRR} = \frac{9V}{2 \cdot 100} = 45mV$$

costante. Il CMRR genera solo un OFFSET dell'uscita.

$$V_u = \left(V_{cc} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \pm V_{CMRR}\right) \cdot 1 = \frac{9V}{2} \pm 45mV = 4{,}5V \pm 45mV$$

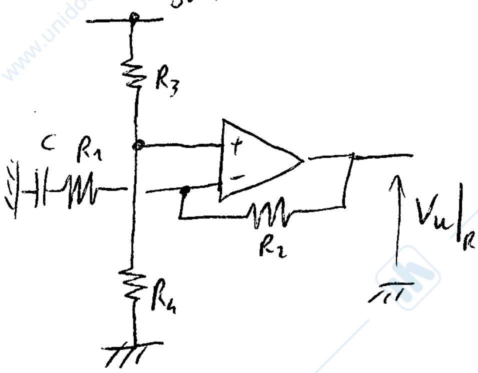
il segno non è definito

Perciò il contributo della tensione di uscita dovuto al CMRR è:

$$V_u\Big|_{CMRR} = \pm 45mV$$

6)

$$9V + \overbrace{10mV \cdot \sin(2\pi \cdot 50Hz \cdot t)}^{v_R}$$



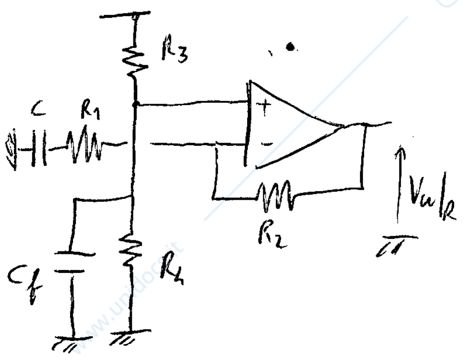
APPROX: SUPPONGO CHE C SIA UN CORTO CIRCUITO ALLA FREQUENZA DEL DISTURBO (50 Hz)
COME CALCOLATO AL PUNTO 3 PER f>20Hz SIAMO A CENTRO BANDA (C in corto)

$$V_u\big|_R = v_R \cdot \frac{R_4}{R_3+R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$V_u\big|_R = \underset{\substack{\uparrow \\ R_3=R_4}}{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 + \frac{500k\Omega}{10k\Omega}\right) v_R$$

$$V_u\big|_R = 0{,}255 \sin(2\pi\, 50Hz \cdot t)$$

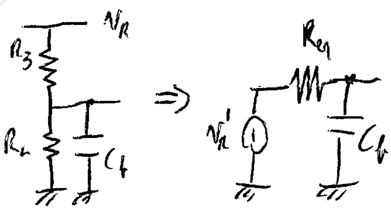
Per ridurre il disturbo in uscita è sufficiente collegare una capacità di filtro C_f in parallelo a R_4:



L'ampiezza del disturbo in uscita, supponendo C in corto circuito, diventa:

$$V_u\big|_R = v_R \frac{R_4}{R_3+R_4} \cdot \frac{\frac{1}{sC}}{R_3//R_4 + \frac{1}{sC}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$\Downarrow$



$$v_R' = v_R \frac{R_4}{R_3+R_4}$$

$$R_{eq} = R_3//R_4$$

se $1 \ll |sC(R_3//R_4)|$

$$V_u\big|_R = v_R \frac{R_4}{R_3+R_4} \frac{1}{1+sC(R_3//R_4)} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \Longrightarrow \left|V_u\big|_R\right| = v_R \frac{R_4}{R_3+R_4} \frac{1}{2\pi f (R_3//R_4) C}$$

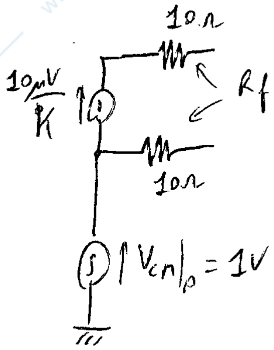
Per avere $\left| V_u|_R \right| < 1\,mV$

$$C > V_R \frac{\cancel{R_4}}{\cancel{R_3+R_4}} \frac{\cancel{R_3+R_4}}{2\pi f R_3 \cancel{R_4} \cdot 1\,mV} = \frac{V_R}{2\pi f R_3 \cdot 1\,mV} = \frac{10\,mV}{2\pi \cdot 50\,Hz \cdot 1\,M\Omega \cdot 1\,mV}$$

$$C > 31{,}8\,nF$$

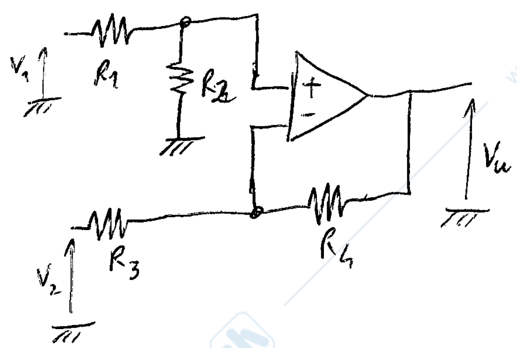
Verifica approx: $$2\pi f C \frac{R_3 R_4}{R_3+R_4} = 2\pi \cdot 50\,Hz \cdot 31{,}8\,nF \frac{1\,M\Omega \cdot 1\,M\Omega}{1\,M\Omega + 1\,M\Omega} \simeq 4{,}995 \gg 1$$

SI VUOLE MISURARE UNA TEMPERATURA UTILIZZANDO UNA TERMOCOPPIA:



SOGGETTA A UN SEGNALE DI DISTURBO DI MODO COMUNE DI 1V DI PICCO.

UTILIZZANDO UN AMPLIFICATORE SOTTRATTORE:



$R_1 = R_3 = 10k\Omega$

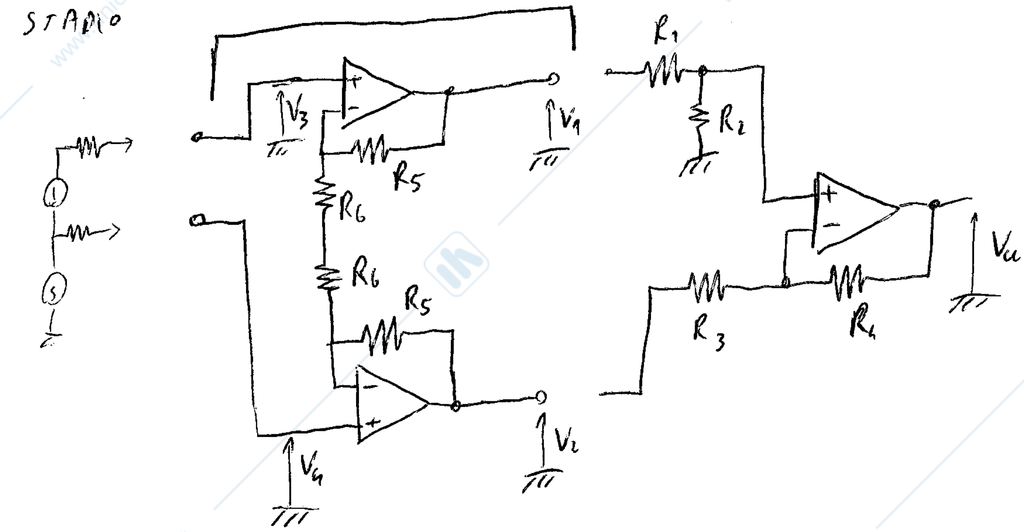
1) CALCOLARE LE RESISTENZE R_2 E R_4 PER AVERE UN GUADAGNO DIFFERENZIALE $A_d = 100$ E UN GUADAGNO DI MODO COMUNE NULLO

2) TRASCURANDO LE R_f, CALCOLARE LA SENSIBILITÀ DI QUESTO TERMOMETRO

3) SUPPONENDO DI UTILIZZARE RESISTENZE CON TOLLERANZA 1%, CALCOLARE IL CONTRIBUTO MASSIMO DI DISTURBO IN USCITA DOVUTO AL MODO COMUNE

4) CALCOLARE IL DISTURBO IN USCITA GENERATO DALLA PRESENZA DELLE RESISTENZE R_f, E DALLA PRESENZA DEL MODO COMUNE.

INSERIRE PRIMA DELL'AMPLIFICATORE SOTTRATTORE IL SEGUENTE STADIO



$R_6 = 10\,k\Omega$

5) DIMENSIONARE R_5 PER OTTENERE UNA SENSIBILITÀ DELLO STRUMENTO PARI A $10\,\frac{mV}{K}$

6) CALCOLARE, IN QUESTO CASO, L'EFFETTO DEL DISTURBO DI MODO COMUNE

SOLUZIONE

1) FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DELLO STADIO:

$$V_u = \frac{R_2}{R_1+R_2}\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right)V_1 - \frac{R_4}{R_3}V_2$$

ponendo $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} = k$

$$V_u = \frac{1}{1+\frac{R_2}{R_1}}\frac{R_2}{R_1}\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right)V_1 - \frac{R_4}{R_3}V_2 = k\frac{1+k}{1+k}V_1 - kV_2 = k(V_1-V_2)$$

$\underbrace{Ad}_{\text{guadagno differenziale}} = k$ e $\underbrace{A_c}_{\text{guadagno di modo comune}} = 0$

Per avere $Ad = 100 \Rightarrow k = 100 \Rightarrow$ $R_4 = 100R_3 = 100 \cdot 10k\Omega = 1M\Omega$
$R_2 = 100R_1 = 100 \cdot 10k\Omega = 1M\Omega$

2) $V_1 - V_2 = 10\frac{\mu V}{K} \Rightarrow V_u = Ad(V_1-V_2) = Ad \cdot 10\frac{\mu V}{K} = \frac{1mV}{K}$

3) Utilizzando resistenze di precisione $\varepsilon = 1\%$, il CMRR di un amplificatore sottrattore vale:

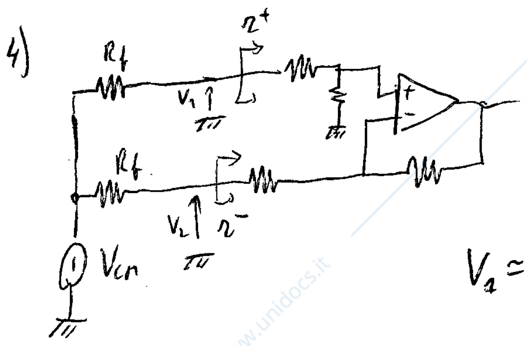
$$CMRR = \frac{Ad}{|A_c|} = \frac{k_0+1}{4\varepsilon} \simeq \frac{100+1}{4 \cdot 0{,}01} = 2525$$

$$V_u = \underbrace{Ad(V_1-V_2)}_{\text{segnale}} + \underbrace{A_c V_{cm}}_{\text{disturbo}}$$

$$|V_u|_{cm}| = |A_c||V_{cm}| = \frac{Ad}{|CMRR|}|V_{cm}| = 39{,}6\ mV$$

che equivale a $\Delta T|_{cm} \simeq \pm 40K$

4)



CALCOLO LE RESISTENZE DI INGRESSO:

$r^+ \simeq R_1 + R_2 \simeq R_2 = 1M\Omega$

$r^- \simeq R_3 = 10k\Omega$

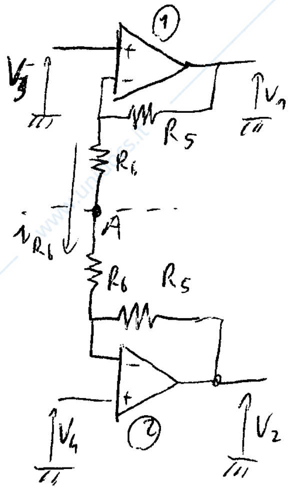
$$V_1 \simeq \frac{r^+}{r^+ + R_f}V_{cm} \simeq V_{cm}$$

$$V_2 = \frac{2^-}{2^- + R_f} V_{cm} \simeq 0{,}999\, V_{cm}$$

$$V_u\big|_{R_f} = A_d\,(V_1 - V_2) = 100 \cdot (1 - 0{,}999)\, V_{cm} = 100 \cdot 0{,}001 \cdot 1V = 100\, mV$$

equivalente a $\Delta T\big|_{R_f} = \pm\, 100 K$

5) Data la simmetria dello stadio ingresso, studio tale stadio sul segnale di modo differenziale e sul segnale di modo comune.



a) MODO DIFFERENZIALE

$$\begin{cases} V_3 - V_4 = V_d \\ \dfrac{V_3 + V_4}{2} = 0 \end{cases} \Rightarrow \quad V_3 = \frac{V_d}{2} \qquad V_4 = -\frac{V_d}{2}$$

Grazie alla retroazione, $V_1^+ = V_1^- = \frac{V_d}{2}$ e $V_2^+ = V_2^- = \frac{V_d}{2}$

le R_6 saranno percorse da una corrente i_{R_6} pari a

$$i_{R_6} = \frac{V_1^- - V_2^-}{2R_6} = \frac{V_d}{2R_6}$$

e la tensione del nodo A è pari a 0 per simmetria.

Se A è 0,
$$V_1 = V_1^- + R_5 \cdot i_{R_6} = \frac{V_d}{2} + R_5 \frac{V_d}{2R_6} = \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right)\frac{V_d}{2}$$
$$V_2 = V_2^- - R_5 \cdot i_{R_6} = -\frac{V_d}{2} - R_5 \frac{V_d}{2R_6} = \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right)\left(-\frac{V_d}{2}\right)$$

$$V_d\big|_{USCITA} = V_1 - V_2 = \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) V_d \qquad A_d = \frac{V_d|_{USCITA}}{V_d} = 1 + \frac{R_5}{R_6}$$

$$V_{cm}\big|_{USCITA} = \frac{V_1 + V_2}{2} = 0$$

b) MODO COMUNE

$V_3 = V_4 = V_c$ Per la retroazione $V_1^+ = V_1^- = V_c$, $V_2^+ = V_2^- = V_c$ $\Rightarrow$ In R_6 non scorre corrente

Perciò:
$$V_1 = V_1^- + R_5 i_{R_6} = V_1^- = V_c$$
$$V_2 = V_2^- - R_5 i_{R_6} = V_2^- = V_c$$
$$\Rightarrow \quad V_d\big|_{USCITA} = V_1 - V_2 = 0 \qquad V_{cm}\big|_{USCITA} = \frac{V_1 + V_2}{2} = V_c$$

Perciò il guadagno di modo differenziale del circuito è:

$$A_d = 1 + \frac{R_5}{R_6}$$

e il guadagno di modo comune è:

$$A_c = 1$$

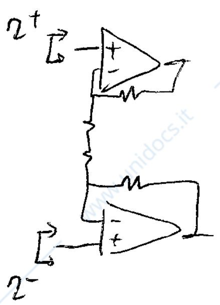
Per avere una sensibilità di $10\frac{mV}{K}$,

$$\frac{V_u}{T} = \underbrace{10\frac{\mu V}{K}}_{\text{TERMOCOPPIA}} \cdot \underbrace{A_d}_{\text{NUOVO STADIO}} \cdot A_{d_{SOTTRATTORE}} = 10\frac{mV}{K} \Rightarrow A_d = \frac{10\frac{mV}{K}}{10\frac{\mu V}{K} \cdot 100} = 10$$

$$A_d = 10 = 1 + \frac{R_5}{R_6} \Rightarrow R_5 = (10-1)R_6 = 90k\Omega$$

b) Questo nuovo stadio riduce l'effetto del disturbo di modo comune in due modi:

a) Le resistenze di ingresso r^+ e r^- risultano essere uguali, per la simmetria del circuito, e di valore molto elevato.



Il segnale è, inoltre, applicato direttamente all'ingresso dell'operazionale, che presenta una impedenza molto grande e la retroazione tende ad aumentare tale resistenza di ingresso.

Perciò la tensione di modo comune non genera nessun segnale differenziale a causa delle R_f.

$$V_u\big|_{R_f} = 0$$

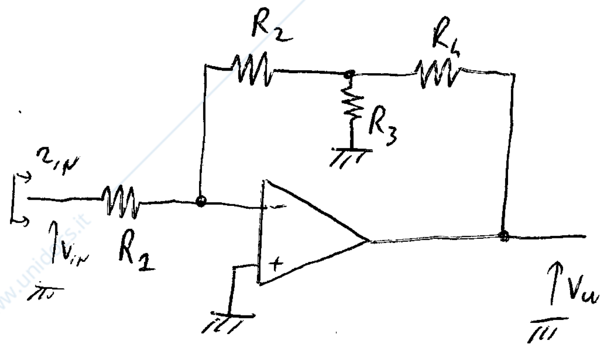
b) Lo stadio inserito amplifica il solo segnale differenziale ma non il segnale di modo comune. La tensione in uscita dovuta al segnale di modo comune vale:

$$\left|V_u\big|_{V_{CM}}\right| = |V_{CM}| \cdot \underbrace{A_c}_{\text{NUOVO STADIO}} \cdot \underbrace{A_c}_{\text{SOTTRATTORE}} = |V_{CM}| \cdot A_c \cdot \frac{A_d}{|CMRR|} =$$

$$= 1V \cdot 1 \cdot \frac{100}{2525} = 39{,}6 mV$$

Che equivalgono, ora, a $\Delta T\big|_{CM} \simeq \pm 4K$

DIMENSIONARE I VALORI DELLE RESISTENZE R_1 e R_4, NEL SEGUENTE CIRCUITO AFFINCHÉ IL GUADAGNO SIA 1000 E LA RESISTENZA DI INGRESSO SIA PARI A $r_{IN} = 100\,k\Omega$.
CALCOLARE ANCHE LA BANDA DELL'AMPLIFICATORE



$|G| = 1000$

$r_{IN} = 100\,k\Omega$

$R_2 = 100\,k\Omega$

$R_3 = 1\,k\Omega$

$A_0 = 90\,dB$

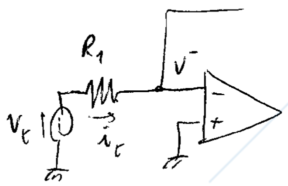
$GBWP = 3\,MHz$

R_1, R_4 ?

BANDA ?

SOLUZIONE

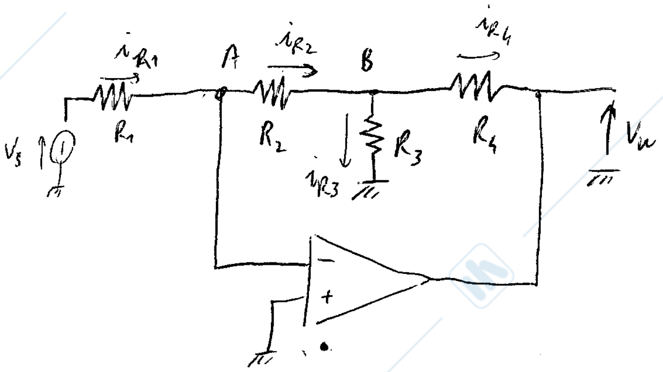
La retroazione negativa impone che $V^+=V^-$, essendo $V^+=0V$, il nodo invertente dell'operazionale sarà posto a 0V, cioè sarà a terra virtuale.
In queste condizioni, la resistenza di ingresso dell'amplificatore sarà pari a:



$$V^-=0 \Rightarrow i_t = \frac{V_t}{R_1} \Rightarrow r_{in} = \frac{V_t}{i_t} = R_1 *$$

Valendo $r_{in} = 100k\Omega \Rightarrow R_1 = 100k\Omega$

CALCOLO DEL GUADAGNO IDEALE



Per la retroazione, $V^+=V^- \Rightarrow V_A=0V$

$$i_{R_1} = \frac{V_s}{R_1}$$

La resistenza R_2 sarà interessata dalla stessa corrente di R_1 (il nodo invertente dell'opamp è ad alta impedenza), perciò:

$$i_{R_2} = i_{R_1} \Rightarrow V_B - V_A = -i_{R_2} \cdot R_2 = -\frac{R_2}{R_1} V_s \Rightarrow V_B = -\frac{R_2}{R_1} V_s$$

La corrente i_{R_4} sarà pari a: $i_{R_4} = i_{R_2} - i_{R_3} = \frac{V_s}{R_1} - \left(\frac{V_B}{R_3}\right) = \frac{V_s}{R_1} + \frac{R_2}{R_1 R_3} V_s$

$$i_{R_4} = \frac{V_s}{R_1}\left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \simeq \frac{V_s}{R_1}\frac{R_2}{R_3} \qquad \text{essendo } \frac{R_2}{R_3} = 100 >> 1$$

Quindi

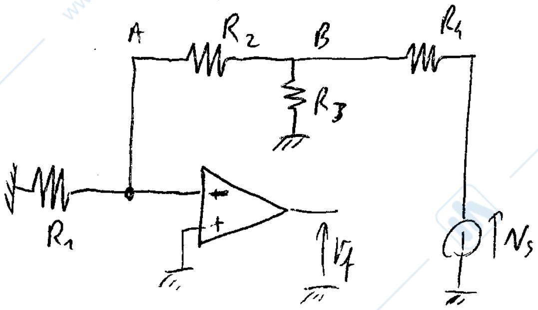
$$V_u = V_B - R_4 i_{R_4} = -\frac{R_2}{R_1} V_s - R_4 \frac{V_s}{R_1}\frac{R_2}{R_3} = -\frac{V_s}{R_1} R_2 \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$$

$$G = \frac{V_u}{V_s} = -\frac{R_2}{R_1}\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \Rightarrow R_4 \simeq R_3\left(|G|\frac{R_1}{R_2} - 1\right) = 1k\Omega\left(1000 \cdot \underset{R_1=R_2}{\underset{\Uparrow}{1}} - 1\right)$$

$$R_4 \simeq 1M\Omega$$

CALCOLO DELLA BANDA:

G_{Loop}: apro l'anello;



$$V_B = \frac{R_{eq}}{R_{eq}+R_4} V_s \simeq \frac{R_3}{R_3+R_4} V_s$$

$$R_{eq} = R_3 // (R_1+R_2) \simeq R_3$$

essendo $R_3 = 1k\Omega << R_1+R_2 = 200k\Omega$

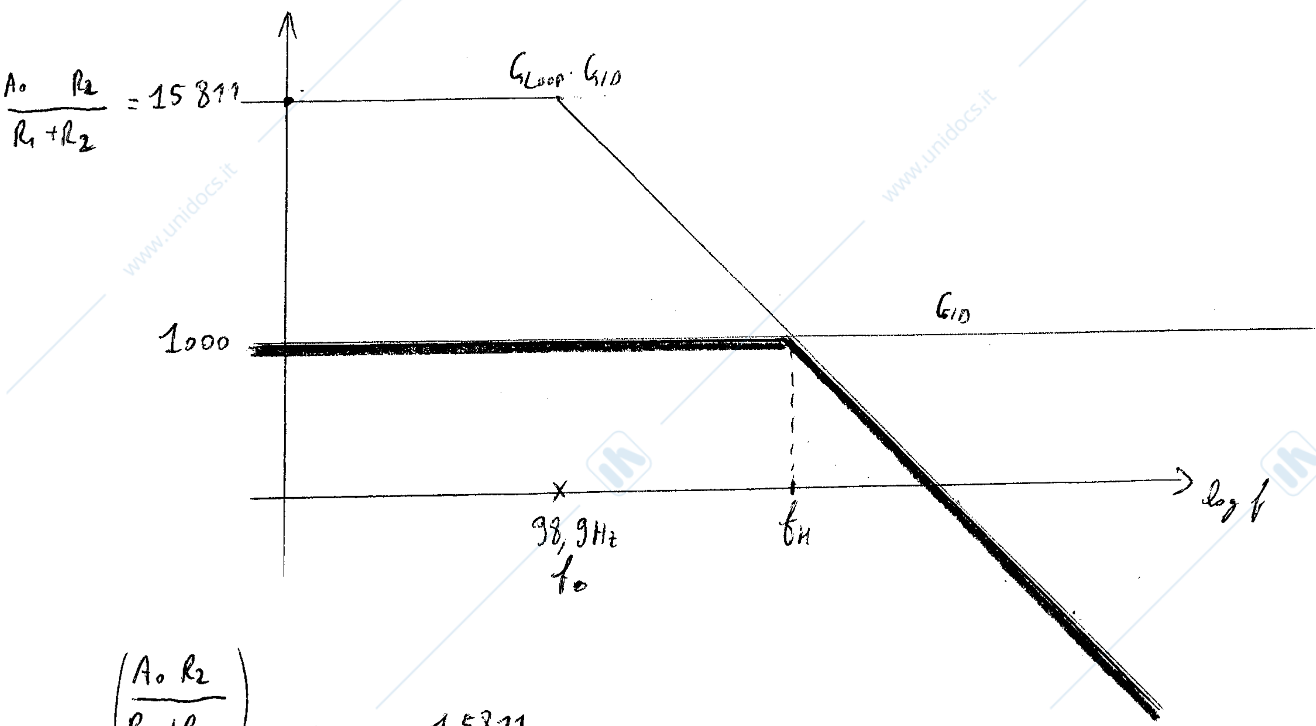
$$V_A = \frac{R_1}{R_1+R_2} V_B \simeq \frac{R_1}{R_1+R_2} \frac{R_3}{R_3+R_4} V_s$$

$$G_{Loop} = - \frac{A_0}{1+s\tau_0} \frac{R_1}{R_1+R_2} \frac{R_3}{R_3+R_4}$$

$$A_0 = 90dB = 31\,600$$

$$GBWP = \frac{A_0}{2\pi \tau_0} \Rightarrow \tau_0 = \frac{A_0}{2\pi\, GBWP} = 1,68\ ms \qquad f_0 = \frac{1}{2\pi\tau_0} = 98,9 Hz$$

$$G_{Loop} \cdot G_{ID} = - \frac{A_0}{1+s\tau_0} \frac{\cancel{R_1}}{R_1+R_2} \frac{\cancel{R_3}}{\cancel{R_3+R_4}} \left(- \frac{R_2}{\cancel{R_1}} \left(\frac{\cancel{R_3+R_4}}{\cancel{R_3}} \right) \right) = + \frac{A_0}{1+s\tau_0} \frac{R_2}{R_1+R_2}$$



$$f_H = \frac{\left(\frac{A_0 R_2}{R_1+R_2}\right)}{|G_{ID}|} \cdot f_0 = \frac{15811}{1000} \cdot 98,9 Hz = 1564 Hz$$