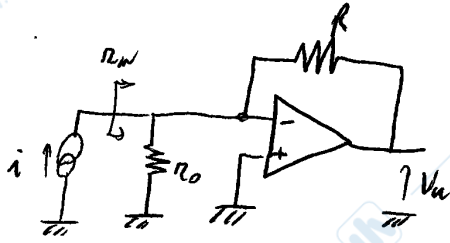


CONSIDERARE IL SEGUENTE AMPLIFICATORE A TRASIMPEDENZA



$$R = 10 \text{ k}\Omega$$

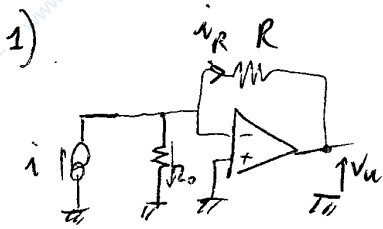
$$r_o = 1 \text{ k}\Omega$$

$$A_o = 80 \text{ dB}$$

CALCOLARE:

- 1) IL GUADAGNO IDEALE DEL CIRCUITO
- 2) IL GUADAGNO DI ANELLO IN CONTINUA
- 3) IL GUADAGNO REALE DEL CIRCUITO
- 4) LA RESISTENZA DI INGRESSO r_{in} NEL CASO DI OP. AMP. IDEALE ($A_o \rightarrow \infty$) E REALE

SOLUZIONE



PER LA RETROAZIONE $V^+ = 0 \rightarrow$

$$V^- = V^+ = 0$$

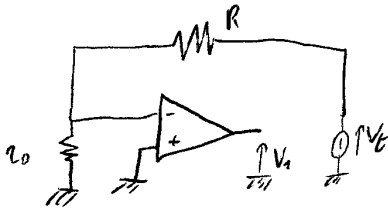
SE $V^- = 0 \Rightarrow i_{r_0} = 0$

$$i_R = i - i_{r_0} = i$$

$$V_u = V^- - i_R R = -R i$$

$$G_{ID} = \frac{V_u}{i} = -R = -10k\Omega$$

2) APRO L'ANELLO:



$$V_1 = -V_t \cdot \frac{R_0}{R + r_0} A_0$$

$$G_{Loop} = \frac{V_1}{V_t} = -A_0 \frac{r_0}{R + r_0}$$

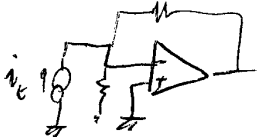
$$G_{Loop} = -10^4 \cdot \frac{10^3 \Omega}{10 \cdot 10^3 \Omega + 10^3 \Omega} = -909$$

$$3) G_{GRALE} = G_{ID} \frac{-G_{Loop}}{1 - G_{Loop}} = -10k\Omega \frac{909}{1 + 909} = -9989\Omega$$

4) NEL CASO DI OPAMP IDEALE, LA RETROAZIONE FORZA $V^+ = V^-$, SE INIETTIAMO UNA CORRENTE DI TEST i_t NELL'INLAESSO,

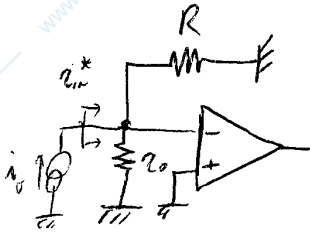
LA TENSIONE DELL'INLAESSO STESSO NON CAMBIA E RIMANE:

$$V^- = V^+ = 0$$



PERCIO': $r_{IN} = \frac{V_{IN}}{i_t} \approx \frac{V^-}{i_t} = 0$

NEL CASO REALE, CALCOLO LA RESISTENZA DI INGRESSO AD ANELLO APERTO:



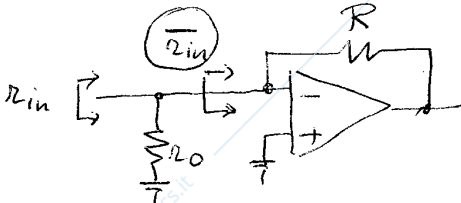
$$r_{in}^* = \frac{i_t (r_o \parallel R)}{i_t} = r_o \parallel R = \frac{1\text{ k}\Omega \cdot 10\text{ k}\Omega}{1\text{ k}\Omega + 10\text{ k}\Omega} = 0,909\text{ k}\Omega$$

IL GENERATORE DI CORRENTE DI TEST i_t NON ALTERA IL CIRCUITO E NON ALTERA IL LOOP, PERCIÒ NON È NECESSARIO RICALCOLARLO.

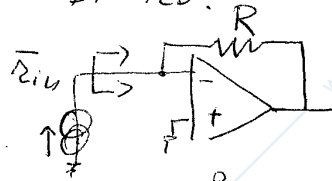
$$r_{in} = r_{in}^* \frac{1}{1 - \text{Loop}} = 0,909\text{ k}\Omega \frac{1}{1 + 0,909} = 1\ \Omega$$

LA RETROAZIONE TRENDE A RIDURRE LA RESISTENZA DI INGRESSO, INFATTI $r_{in} = 0$ SE $A_o \rightarrow \infty$

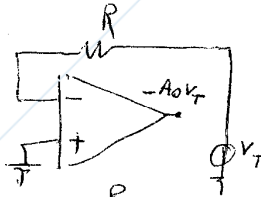
IN ALTRO MODO:



PER SEMPLIFICARE I CONTI, CALCOLO LA RESISTENZA \bar{r}_{in} CHE SI VEDE A VALLE DI r_o :

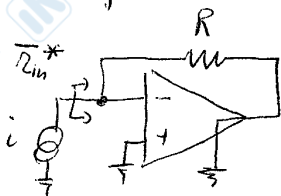


DEVO RICALCOLARE IL GUAD. DI ANELLO:



$$\rightarrow \bar{G}_{loop} = -A_o$$

E LA RESIST. DI INGRESSO AD ANELLO APERTO



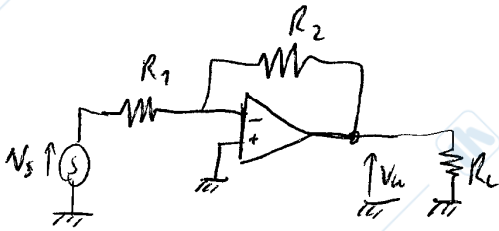
$$\rightarrow \bar{r}_{in}^* = R$$

$$\Rightarrow \bar{r}_{in} = \frac{R}{1 + A_o}$$

$$\Rightarrow r_{in} = r_o \parallel \bar{r}_{in} = r_o \parallel \frac{\bar{r}_{in}^*}{1 + A_o} = r_o \parallel \frac{R}{1 + A_o} = \frac{r_o R}{r_o(1 + A_o) + R} = \left(\frac{r_o R}{r_o + R} \right) \frac{1}{1 + A_o \frac{r_o}{r_o + R}}$$

$\uparrow \bar{r}_{in}^*$
 $\uparrow \bar{G}_{loop}$

CONSIDERARE L'AMPLIFICATORE:



$$A_0 = 10^5$$

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

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

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

$$I_{\text{BIAS}} = -20 \text{ nA}$$

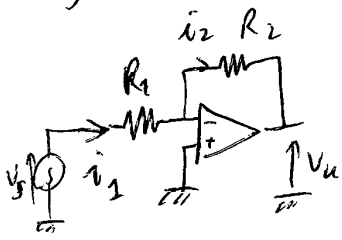
$$|V_{\text{OSF}}| = 5 \text{ mV}$$

CALCOLARE:

- 1) IL GUADAGNO IDEALE
- 2) IL GUADAGNO D'ANELLO IN CONTINUA E IL GUADAGNO REALE
- 3) IL CONTRIBUTO DELLA CORRENTE DI BIAS SULLA TENSIONE DI USCITA, SUGGERIRE UN METODO PER ANNULLARE TALE CONTRIBUTO.
- 4) IL CONTRIBUTO DELLA TENSIONE DI OFFSET SULLA TENSIONE DI USCITA

SOLUZIONE

1) PER LA RETROAZIONE $V^+ = V^- = 0$



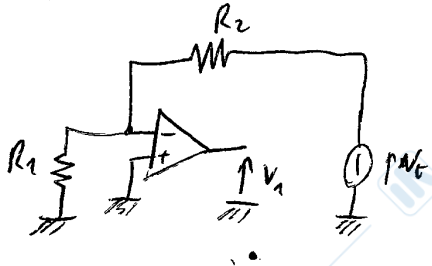
$i_1 = \frac{v_s}{R_1}$ ma, essendo $I^- = 0$

$i_2 = i_1 = \frac{v_s}{R_1}$

$v_u = -R_2 i_2 = -\frac{R_2}{R_1} v_s$

$G_{ID} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{1\text{M}\Omega}{10\text{k}\Omega} = -\frac{10^6\Omega}{10^4\Omega} = -100$

2) APERTO L'ANELLO:

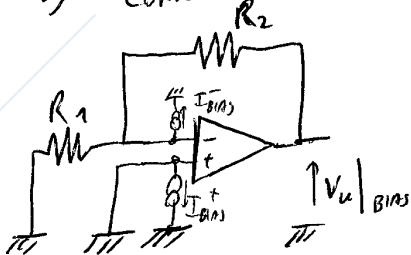


$v_2 = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} A_0 v_e$

$G_{Loop} = -A_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -10^5 \frac{10\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega + 1\text{M}\Omega} = -990$

$G_{REALE} = G_{ID} \frac{-G_{Loop}}{1 - G_{Loop}} = -100 \frac{990}{1 + 990} = -99,9$

3) CORRENTI DI BIAS:

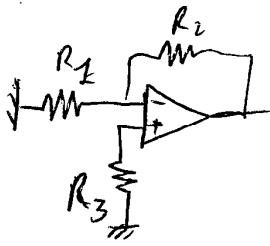


SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI

$V_u|_{BIAS} = I_{BIAS}^+ \cdot 0 + (-R_2) I_{BIAS}^- = -R_2 I_{BIAS}^-$

$V_u|_{BIAS} = -1\text{M}\Omega (-20\text{nA}) = -10^6\Omega \cdot (-20 \cdot 10^{-9}\text{A}) = 20\text{mV}$

PER ANNULLARE TALE CONTRIBUTO È SUFFICIENTE INSERIRE UNA RESISTENZA R_3 TRA L'INGRESSO N.I. (+) DELL'OPAMP E MASSA:



IN QUESTO CASO, LA TENSIONE DI USCITA DOVUTA A I_{BIAS} È:

$$V_u|_{I_{BIAS}} = I_{BIAS}^+ \cdot R_3 \frac{R_1 + R_2}{R_1} + I_{BIAS}^- \cdot R_2 =$$

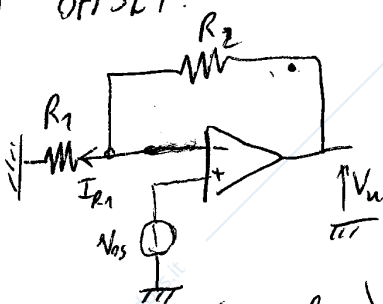
$$= \left(\frac{R_3}{R_1} (R_1 + R_2) - R_2 \right) I_{BIAS}$$

PONENDO A ZERO TALE TENSIONE:

$$\left(\frac{R_3}{R_1} (R_1 + R_2) - R_2 \right) I_{BIAS} = 0 \Rightarrow \frac{R_3}{R_1} (R_1 + R_2) = R_2 \Rightarrow R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

SE $R_3 = R_1 // R_2 = 9901 \Omega$, ALLORA $V_u|_{I_{BIAS}} = 0$

4) OFFSET:

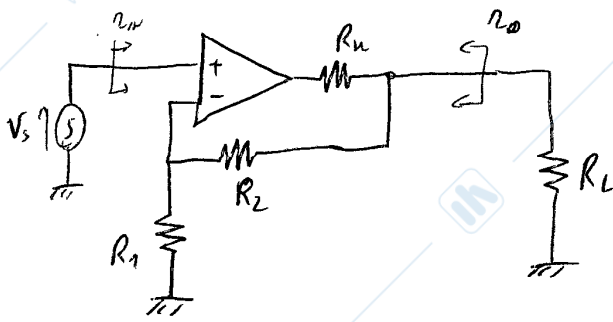


$$V^+ = V^- \Rightarrow I_{R1} = \frac{V_{os}}{R_1}$$

$$I_{R2} = I_{R1} = \frac{V_{os}}{R_1} \quad V_u = I_{R1} (R_1 + R_2) = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_{os}$$

$$V_u|_{os} = \pm \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) |V_{os}| = \pm \left(1 + \frac{1M\Omega}{10k\Omega} \right) 5mV = \pm 0,505V$$

DATO L'AMPLIFICATORE

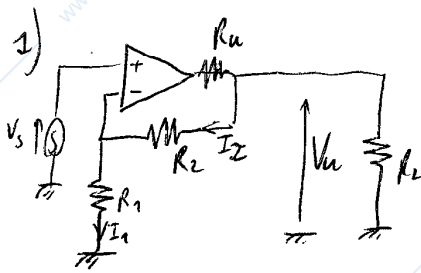


$$\begin{aligned}
 R_1 &= 1 \text{ k}\Omega \\
 R_2 &= 47 \text{ k}\Omega \\
 R_u &= 100 \Omega \\
 R_L &= 1 \text{ k}\Omega \\
 A &= 10^4 \\
 \text{CMRR} &= 30 \text{ dB} \\
 r_{io} &= 100 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

CALCOLARE:

- 1) GUADAGNO IDEALE E GUADAGNO REALE
- 2) CALCOLARE L'EFFETTO DEL CMRR
- 3) CALCOLARE IL VALORE DELLA RESISTENZA DI INGRESSO (r_{in}) E DI USCITA (r_o) DELL'AMPLIFICATORE

SOLUZIONE



PER LA RETROAZIONE, $V^+ = V^- = V_s$

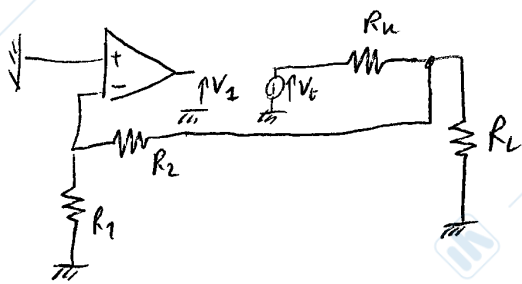
$$I_1 = \frac{V_s}{R_1}$$

$$I_1 = I_2 \Rightarrow I_2 = \frac{V_s}{R_2}$$

$$V_u = (R_1 + R_2) I_1 = (R_1 + R_2) \frac{V_s}{R_1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_s$$

$$G_{ID} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{47 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 48$$

CALCOLO DEL G_{LOOP} :



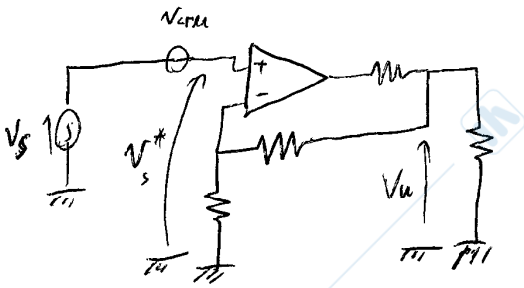
$$V_1 = -A_o \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_{eq}}{R_{eq} + R_u} V_t$$

$$R_{eq} = (R_1 + R_2) \parallel R_L = 379,6 \Omega$$

$$G_{LOOP} = \frac{V_1}{V_t} = -A_o \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_{eq}}{R_{eq} + R_u} = -10^4 \cdot 0,02083 \cdot 0,9074 = -189$$

$$G_{REALF} = G_{ID} \frac{-G_{LOOP}}{1 - G_{LOOP}} = 48 \cdot \frac{189}{1 + 189} = 47,7$$

2) IL CMRR È MODELLIZZABILE CON UN GENERATORE EQUIVALENTE PILOTATO IN TENSIONE POSTO IN SERIE AD UNO DEGLI INGRESSI DELL'OPAMP:



$$V_{CMR} = \pm \frac{V_{CM}}{CMRR}$$

$$V_{CM} = \frac{V^+ + V^-}{2}$$

PER LA RETROAZIONE (SUPP. $A_0 \rightarrow \infty$) $V^+ = V^- \Rightarrow V_{CM} \approx V_s$

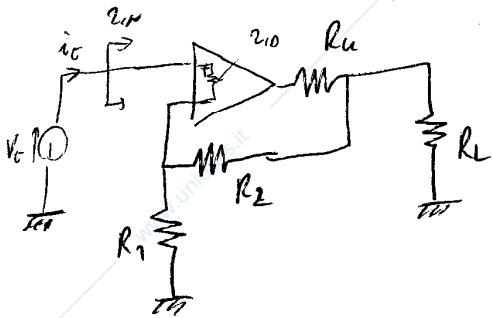
$$V_s^* = V_s \pm \frac{V_s}{CMRR} = \left(1 \pm \frac{1}{CMRR}\right) V_s$$

$$V_u \approx G_{10} V_s^* = G_{10} \left(1 \pm \frac{1}{CMRR}\right) V_s$$

$$G_{10}' = \frac{V_u}{V_s} = G_{10} \left(1 \pm \frac{1}{CMRR}\right)$$

$$G_{10}' = 48 \left(1 \pm \frac{1}{31,6}\right) = 48 \pm 1,52$$

3) CALCOLO DELLA RESISTENZA DI INGRESSO



LA RETROAZIONE TENDE A IMPORRE $V^+ = V^-$

PERCUI

$$v_t = \frac{V^+ - V^-}{r_{in}} \rightarrow 0$$

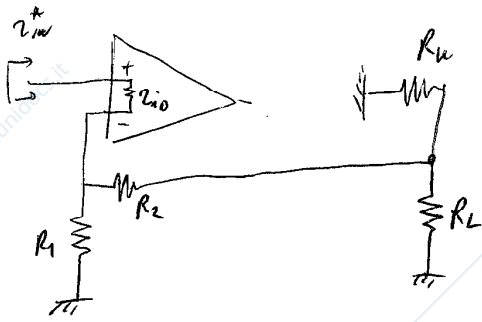
$$R_{in} = \frac{v_t}{i_t} \rightarrow \infty$$

Per tanto

$$r_{in} = \underbrace{r_{in}^*}_{\substack{\text{AL} \\ \text{APERTO}}} \cdot \left(1 - \frac{G_{loop}}{G_{in}}\right)$$

$\frac{G_{loop}}{G_{in}} = \frac{v_u}{v_t}$

r_{in}^*



$$r_{in}^* = r_{i0} + R_1 \parallel (R_2 + R_L \parallel R_u)$$

ma

$$R_2 \parallel (R_2 + R_L \parallel R_u) < R_1$$

e

$$R_1 \ll r_{i0}$$

Perciò:

$$r_{in}^* \approx r_{i0} = 100 \text{ k}\Omega$$

Nel calcolo del G_{loop} , r_{i0} è in parallelo a R_1 , essendo $r_{i0} \gg R_1$,

la presenza di r_{i0} non altera significativamente il valore del G_{loop} :

$$G_{loop} = G_{loop} = -189$$

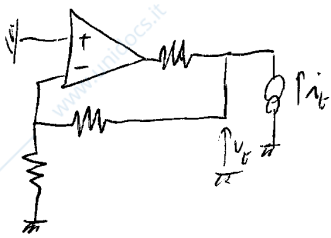
$$r_{in} = r_{in}^* (1 - G_{loop}) = 100 \text{ k}\Omega \cdot (1 + 189) \approx 18,9 \text{ M}\Omega$$

CALCOLO DELLA RESISTENZA DI USCITA:

Per il calcolo della resistenza di uscita r_o , R_L deve essere tolta. Se iniettiamo una corrente di test nel nodo di uscita, la retroazione

tende a imporre $V^+ = V^-$, ovvero tende a mantenere a 0 V_o , perciò:

$$r_o = \frac{V_t}{i_t} \rightarrow 0$$



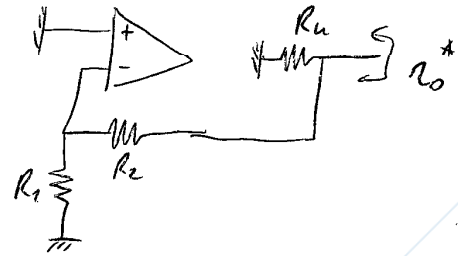
Quindi:

$$r_o = r_{o0}^* \left(\frac{1}{1 - G_{loop}} \right) \quad \text{senza } R_L$$

Il guadagno di anello diventa:

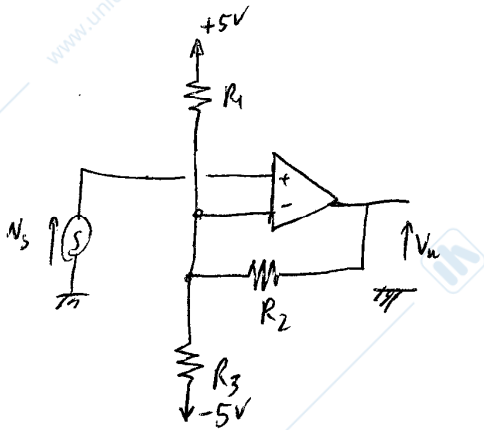
$$G_{loop} = -A_o \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_u} = -A_o \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_u} = -208$$

$$r_o^* = R_u \parallel (R_1 + R_2) \approx R_u = 100\Omega$$
$$R_u \ll (R_1 + R_2)$$



$$r_o = \frac{100\Omega}{1 + 208} = 0,478\Omega$$

SI CONSIDERI L'AMPLIFICATORE:



$$A_0 \rightarrow \infty$$

$$I_{BIAS} = -200 \mu A$$

$$|V_{OS}| = 20 mV$$

$$R_1 = 10 k\Omega$$

$$R_2 = 100 k\Omega$$

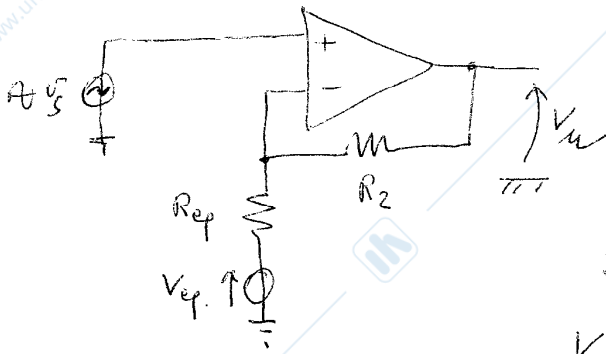
$$R_3 = 10 k\Omega$$

CALCOLARE:

- 1) LA TENSIONE IN USCITA IN FUNZIONE DELLA TENSIONE IN INGRESSO
- 2) IL CONTRIBUTO DELLA TENSIONE DI USCITA DOVUTO ALLE CORRENTI DI BIAS
- 3) IL CONTRIBUTO DELLA TENSIONE DI USCITA DOVUTO ALL'OFFSET.

SOLUZIONI

1)



Eq. THEVENIN

$$V_{eq} = \frac{+5V - (-5V)}{R_1 + R_3} R_1 - 5V = 0V$$

$$R_{eq} = R_1 \parallel R_3 = 5k\Omega$$

SOPRAPOSIZIONE DEGLI EFFETTI

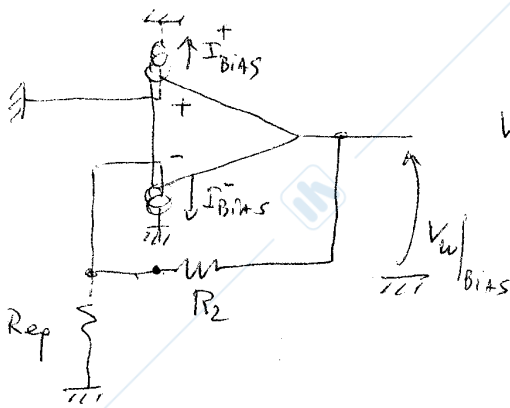
$$V_u = \underbrace{V_u|_{V_s}}_{\text{segnale}} + \underbrace{V_u|_{V_{eq}}}_{\text{polarizzazione}} \rightarrow 0V$$

$$V_u = V_s \left(1 + \frac{R_2}{R_{eq}}\right) + \left(V_{eq} \left(-\frac{R_2}{R_{eq}}\right)\right) \rightarrow 0V$$

$$V_u = V_s \times 21$$

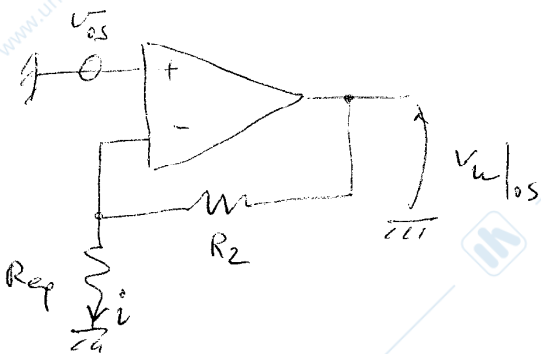
$$\frac{R_2}{R_{eq}} = \frac{100k\Omega}{5k\Omega} = 20$$

2)



$$V_u|_{BIAS} = 0 \cdot I_{BIAS}^+ + R_2 I_{BIAS}^- = R_2 I_{BIAS}^- = -20\mu V$$

3)



$$V_u|_{os} = \frac{V_{os}}{R_{eq}} (R_2 + R_{eq}) = \left(1 + \frac{R_2}{R_{eq}}\right) V_{os}$$

$$V_u|_{os} = \pm \left(1 + \frac{R_2}{R_{eq}}\right) |V_{os}| = \pm 21 \cdot 20mV = \pm 0.42V$$