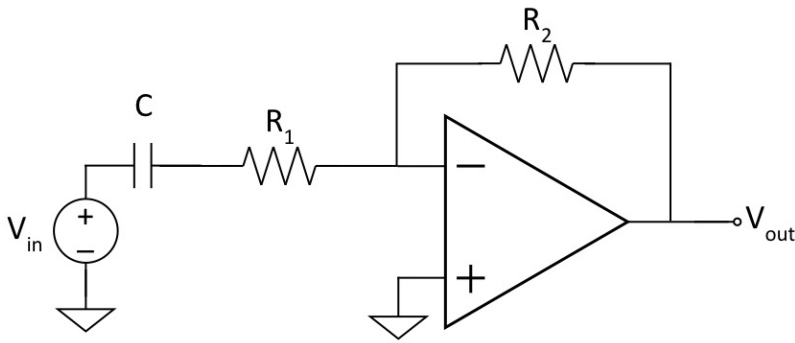


17/11/2020

- 1) Determinare l'espressione del guadagno ideale $G_{ID} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ e tracciarne i diagrammi di Bode quotati di modulo e fase.
- 2) Determinare l'espressione del guadagno d'anello G_{LOOP} e tracciare il diagramma di Bode quotato del modulo.
- 3) Valutare la stabilità del circuito.
- 4) Tracciare il grafico approssimato del guadagno reale $G_{REALE} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$

**DATI:**

$$R_1 = 1k\Omega$$

$$R_2 = 10k\Omega$$

$$C = 10nF$$

Opamp a singolo polo:

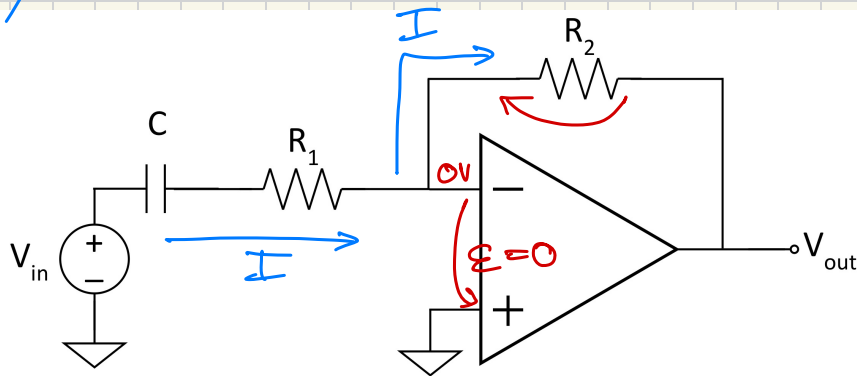
$$A_0 = 10^4$$

$$f_0 = 100Hz$$

$$GBWP = 1MHz$$

UN VALORE È RIDONDANTE: ESSENDO A SINGOLO POLO POSSO RIGUARLO

1) È RETROAZIONATO NEGATIVAMENTE



POSSO SCRIVERE I:

$$I = \frac{V_{in}}{\frac{1}{sC} + R_1}$$

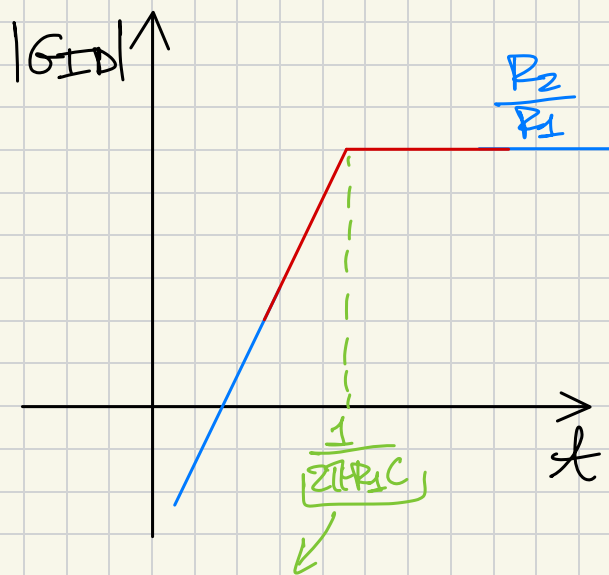
CHÉ AL SOLITO VA IN R_2 È NON NELL'OPAMP

$$\Rightarrow V_{olt} = 0V - IR_2 = - \frac{V_{in} \cdot R_2}{\frac{1}{sC} + R_1}$$

RIPORTIAMOLA IN FORMA CANONICA MOLTIPLICANDO PER sC SOPRA E SOTTO

$$\Rightarrow V_{olt} = -V_{in} \frac{sC R_2}{1 + sC R_1} \quad \text{CHÉ CI PIACE DI PIÙ E LA POSSIAMO}$$

TRACCIARE NEL DIAGRAMMA DI BODE:



PULSAZIONE: FREQUENZA:

$$\frac{1}{1+s\tau} \rightarrow \frac{1}{2\pi f\tau}$$

TRACCIAMOLA PIÙ INTUITIVAMENTE:
 HO UNO ZERO NELL'ORIGINE, QUINDI
 NELL'ORIGINE VARrà 0
 A FREQUENZA INFINITA, HO:

$$\frac{s\tau R_2}{1+s\tau R_1} \quad \text{CON } s \rightarrow +\infty \Rightarrow \sim \frac{\cancel{s}R_2}{\cancel{s}R_1} = \frac{R_2}{R_1}$$

$+ \infty \Rightarrow \gg 1$

HO UNO ZERO CHE MI FARÀ CRESCERE
 DI PENDENZA (+20dB), UNO ZERO CHE
 A UN CERTO PUNTO MI FARÀ FARE -20dB
 E ANDARE A REGIME A $\frac{R_2}{R_1}$

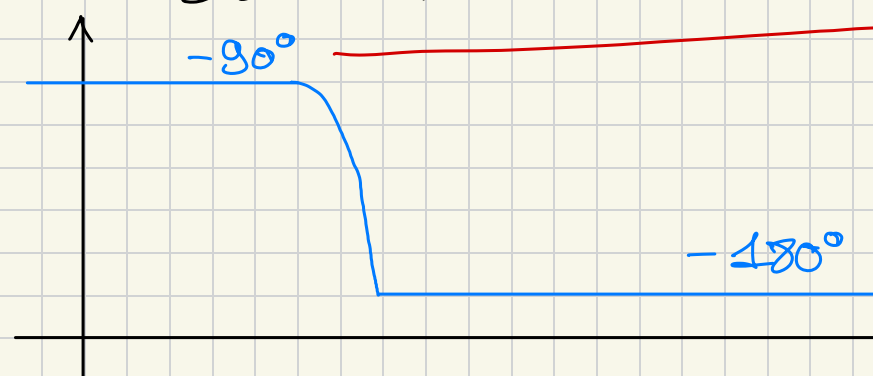
LO VOGLIAMO VERIFICARE ANCHE SUL CIRCUITO INTUITIVAMENTE:
 GUARDIAMO:

A FREQ. NULLA, IL CONDENSATORE È UN APERTO E ALLORA
 V_{IN} NON È PIÙ CONNESSA A V_{OUT} $\Rightarrow G = 0$ PERCHÉ NON
 CIRCOLA CORRENTE IN R_1 ED R_2

A FREQ. INFINITA, IL CONDENSATORE È UN CORTO E MI
 RITROVO CON LA CLASSICA CONFIGURAZIONE INVERTENTE
 NOTO POI CHE IL FATTO CHE C'ISIA IL CONDENSATORE
 SICURAMENTE INTRODUCE UN POLO (UNO ZERO NON È
 DETTO, MA QUI SÌ)

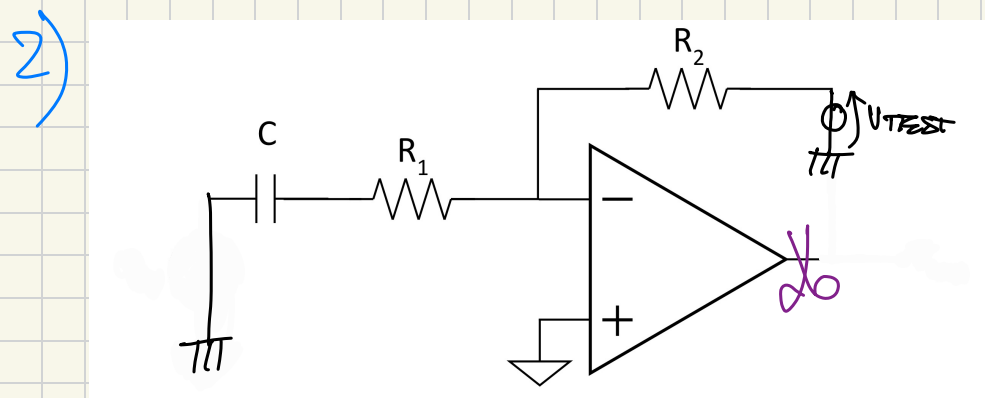
PER IL DIAGRAMMA DELLA FASE, SAPPIAMO:

- OGNI POLO CI DA -90°
- OGNI ZERO CI DA $+90^\circ$



PERCHÉ?

ZERO NELL'ORIGINE, CHE MI
 DA $+90^\circ$, MA ATTENZIONE,
 LA CONF. È INVERTENTE,
 QUINDI È NEGATIVA
 (PARTO DA UNO SFASAMENTO
 DI $-180^\circ + 90^\circ$)



VEDO UN PARTITORE:

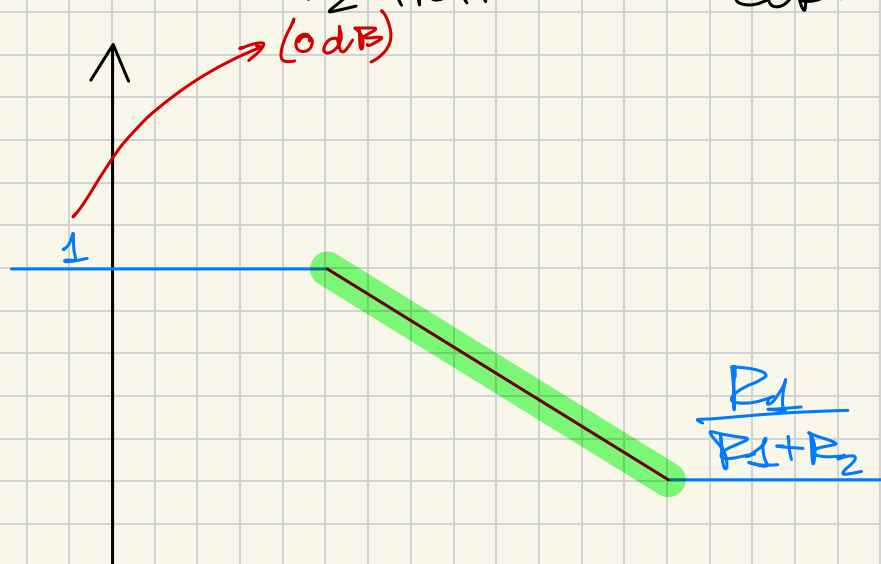
$$G_{loop} = \frac{-A(s) \frac{1}{sC} + R_1}{\frac{1}{sC} + R_1 + R_1} \cdot \frac{sC}{sC} = -A(s) \frac{1 + sCR_1}{1 + sC(R_1 + R_2)} =$$

LO PERDU ESPLICITAMENTE

$$= -\frac{A_0}{1 + s\tau_0} \frac{1 + sCR_1}{1 + sC(R_1 + R_2)}$$

NOTIAMO DUNQUE CHE È PIÙ FACILE RAGIONARE SU G_{loop} SENZA $A(s)$ AGGIUNGENDO LA POI ALLA FUNTE COME FACCIAMO?

VEDIAMO A BASSA FREQUENZA: IL COND. È UN APERTO
 \Rightarrow IN R_1 ED R_2 NON CIRCOLA CORRENTE $\Rightarrow A V^-$ HO V_{TEST}



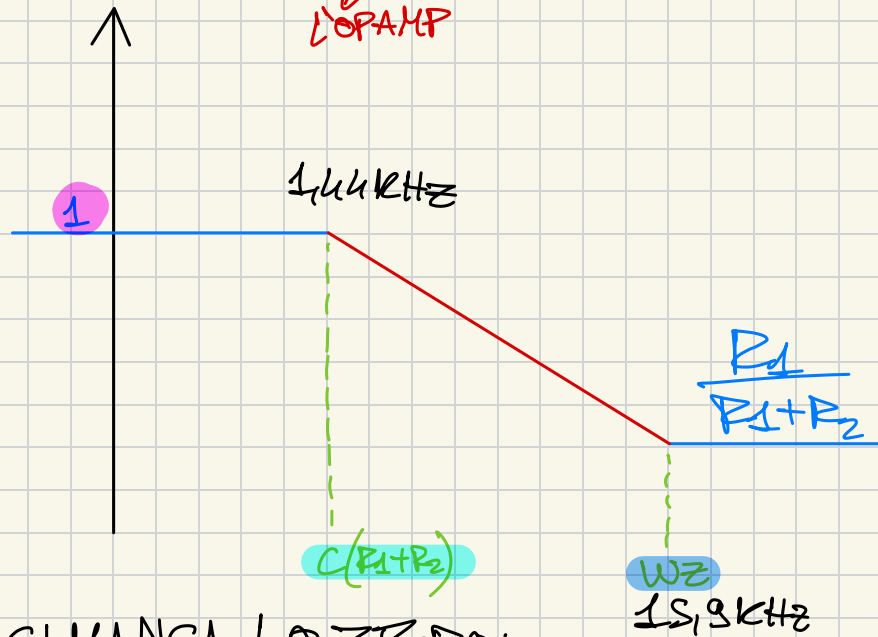
ALL' INFINITO, IL COND. È UN CORTO E HO UN SEMPLICE PARTITORE $\left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$

MA SE COME DICEVAMO TRASCURIAMO L'OPAMP, IL SOLO CONDENSATORE C DA SICURAMENTE UN POLO (τ)

MAGARI UNO ZERO), MA QUINDI L'UNICO MODO IN CUI LE
CONGIUNGO È

CON IL LOOP POSSO ANCHE CALCOLARE IL POLO DEL
CONDENSATORE: È LA τ DI CARICA!

VEDO $C \cdot (R_1 + \text{OPAMP} \parallel R_2) = C \cdot (R_1 + R_2) \rightarrow$ QUESTO È IL POLO



CI MANCA LO ZERO:

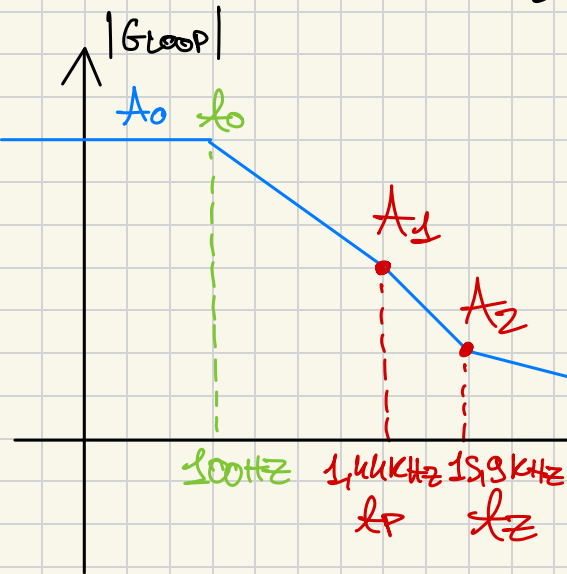
$$1 - \frac{1}{C(R_1 + R_2)} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \omega_z$$

HO SFRUTTATO IL FATTO CHE IL PRODOTTO GUADAGNO - BANDA
È COSTANTE! (PER -20dB DI PENDENZA, VEDI TEORIA)

$$\Rightarrow \omega_z = \frac{1}{C \cdot R_1}$$

CI TORNA VERIFICANDO L'ESPRESSIONE!

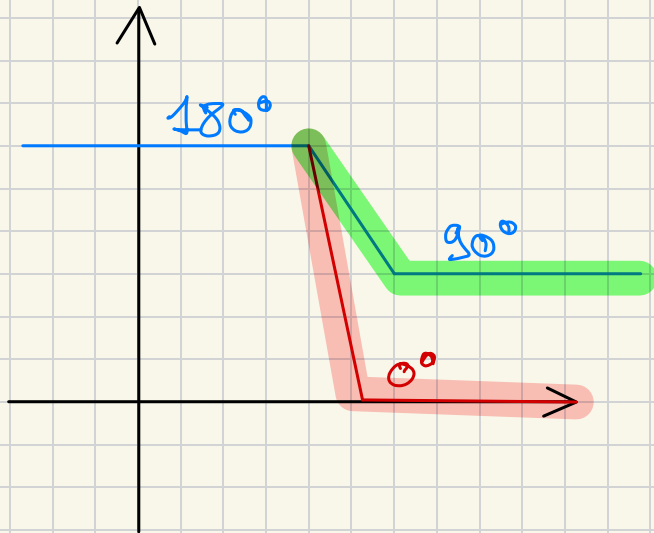
DISEGNIAMO IL GLOOP MATEMATICAMENTE: (PRIMA TRASCRIVIAMOLA)



COMENTARIELLA: IL POLO DELL'OPAMP VIENE SEMPRE A FREQUENZA MOLTO BASSA (PRIMA DI QUALUNQUE ALTRO) \rightarrow (NON SEMPRE)!

"NON È BELLO" ATTRAVERSARE LO 0 CON -40dB , PERCHÉ VOUL DIRE CHE HO AVUTO DUE POLI E A VO' MARGINE DI FASE O POTENZIALMENTE (45° ...) MENTRE CON -20dB , DOVREBBE ESSERE $>45^\circ$ "CI PIACE" $>60^\circ$

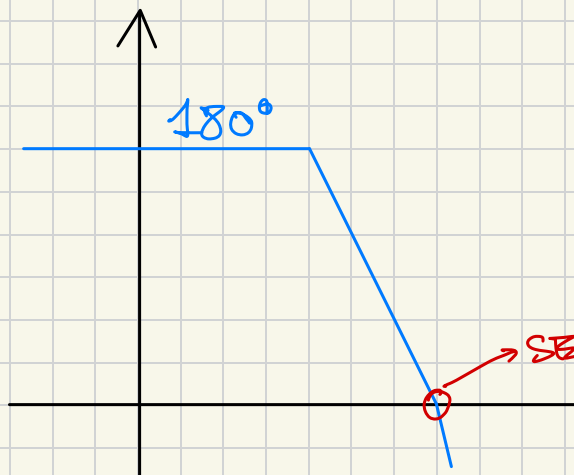
CALCOLO DEL MARGINE DI FASE:



CI PIACE

NON CI PIACE

VIA DI MEZZO:



SECONDO POLO ESATTAMENTE SU ATTRAVERSAMENTO

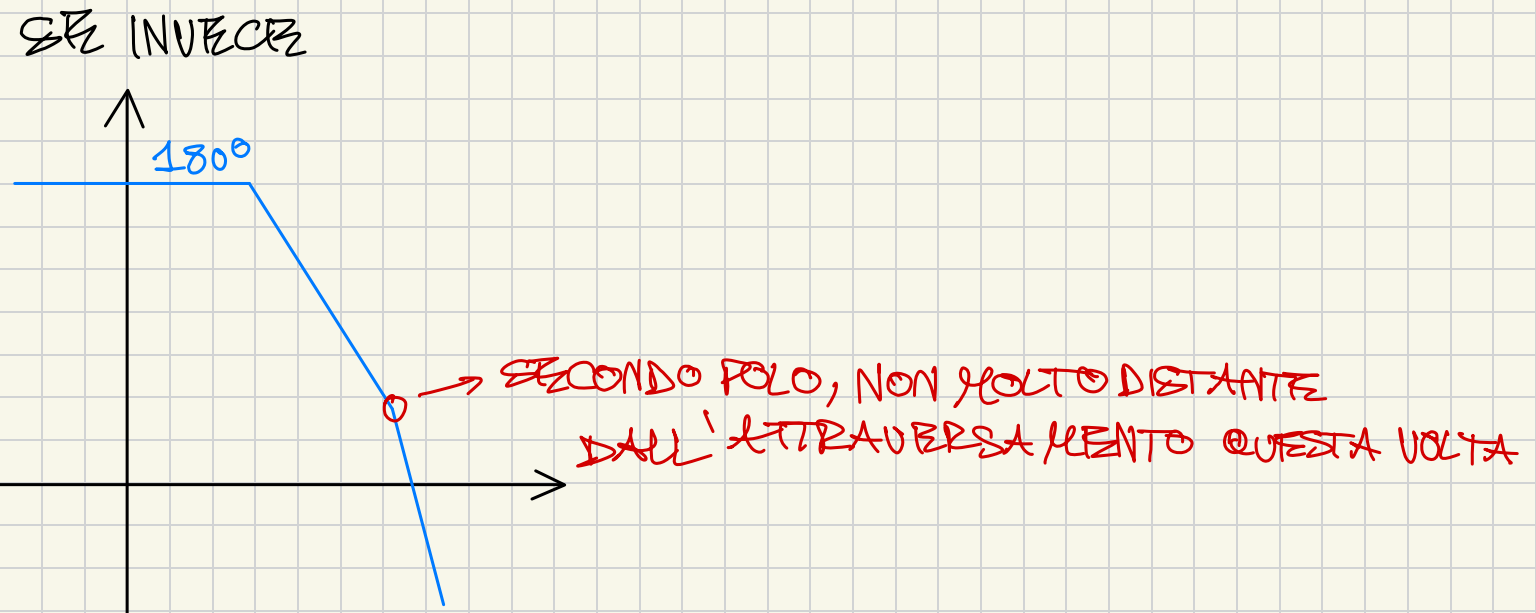
IL MARGINE DI FASE È $180^\circ - 90^\circ - \arctan\left(\frac{\text{POS. ATTRAVERSA M.}}{\text{POS. POLO}}\right)$

PERCHÉ PRIMO POLO MOLTO DISTANTE

UGUALI $\Rightarrow 1$

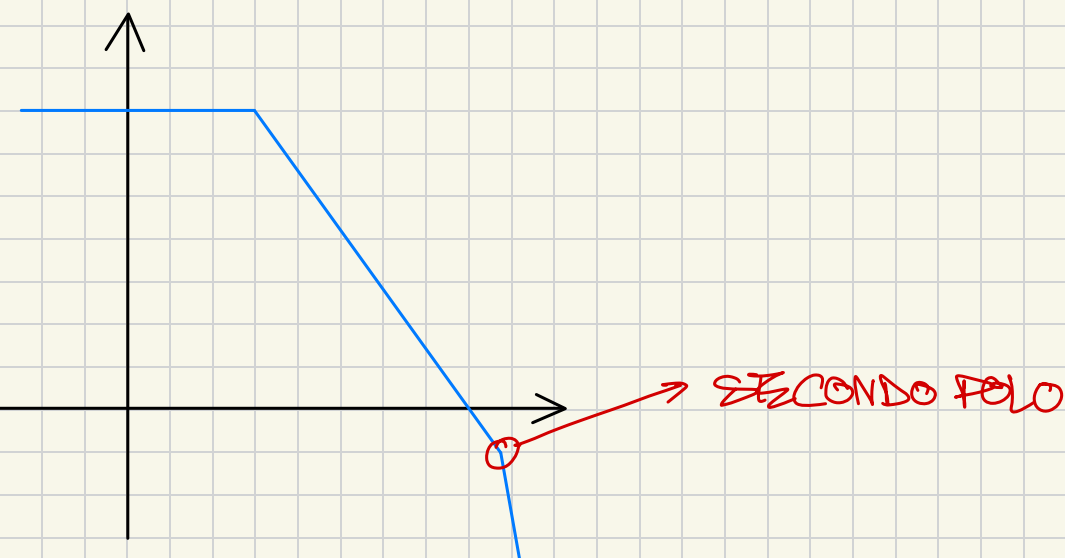
$\Rightarrow 45^\circ$

$= 45^\circ$



AUPO MARGINE DI FASE $> 45^\circ$ MA $< 90^\circ$

PERCHÉ PUR ATTRAVERSANDO CON -40 dB , VALE POCO SOLO SE MOLTO DISTANTE



PIÙ SI ALLONTANA, MENO PESA

ORA CI MANCA LA ℓ^* , TORNERÀ IMPORTANTE AL PUNTO SUCCESSIVO: "GIOCHIAMO DI GRAFICA"

POSSO SCRIVERE (PENDENZA -20):

$$A_0 \cdot \ell_0 = A_1 \cdot \ell_P \Rightarrow A_1 = 694,4$$

$\downarrow \quad \downarrow \quad \quad \downarrow$
 $10^4 \quad 100\text{Hz} \quad \quad 1,1\text{kHz}$

COME PRIMA (PENDENZA ORA -40):

$$A_1 \cdot \ell_P^2 = A_2 \cdot \ell_Z \Rightarrow A_2 = 5,69$$

$\downarrow \quad \quad \quad \downarrow$
 $1,1\text{kHz} \quad \quad \quad 200\text{Hz}$

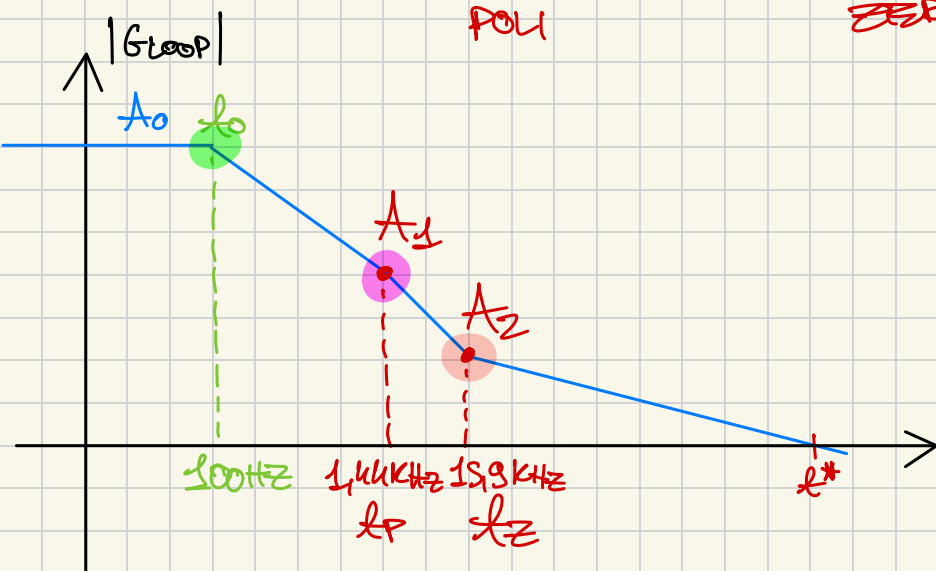
CONCLUDIAMO:

$$A_2 \cdot \ell_Z = 1 \cdot \ell^* \Rightarrow \ell^* = 30,6\text{kHz}$$

\rightarrow ASSE A 0dB

3) CALCOLO IL MARGINE DI FASE:

$$\varphi_m = 180^\circ - \underbrace{\arctan\left(\frac{\ell^*}{\ell_P}\right)}_{\text{POLI}} + \underbrace{\arctan\left(\frac{\ell^*}{\ell_Z}\right)}_{\text{ZERI}}$$



QUI, NOTIAMO CHE ESSENDO ℓ^* DISTANTE ALMENO UNA DECADE HA DATO QUASI TUTTO IL SUO CONTRIBUTO (DOPPO UNA DECADE È SATTI SAPERLO ~ 84)

ES: 100Hz RISPETTO A 30kHz È SICURAMENTE -30°

$$\Rightarrow \varphi_m = 180^\circ - 90^\circ - 90^\circ + \arctan\left(\frac{1}{\frac{f}{f_0}}\right) \rightarrow 30,6 \text{ kHz}$$

NON DUE DECADE
MA QUASI

15,3 kHz

80°

È UN PO' MENO
DI UNA DECADE
(CHE SAREBBE 9 kHz RISPETTO AI 90 kHz)

4)

$$G_{\text{REAL}} = \frac{G_{\text{ID}}}{1 - \frac{1}{G_{\text{LOOP}}}}$$

G_{LOOP} MOLTO GRANDE

G_{LOOP} MOLTO PICCOLO

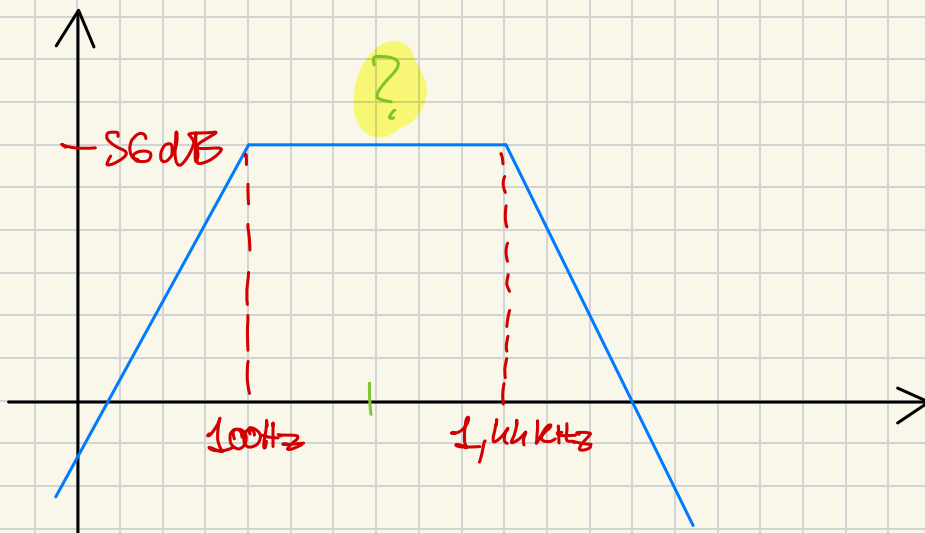
G_{OPEN} = -G_{ID} · G_{LOOP}

MI TOCCA SCRIVERE IL G_{OPEN}

$$G_{\text{OPEN}} = -G_{\text{ID}} \cdot G_{\text{LOOP}} = -\frac{sC R_2}{1+sR_1} A(s) \frac{1+sR_1}{1+sC(R_1+R_2)} =$$

$$= -\frac{A_0}{1+s\tau_0} \frac{sC R_2}{1+sC(R_1+R_2)}$$

HO UNO ZERO NELL'ORIGINE E
DUE POLI



MA COME QUOTO ?

UN POSSIBILE CONTO È POSIZIONARSI A METÀ (ES: 800 Hz) E
CALCOLARE IL NUMERO (QUI: 56 dB)

MA NON È PRATICO

"SPOSTANDOMI UN PO' DAL POLO" (CI PONIAMO A METÀ)

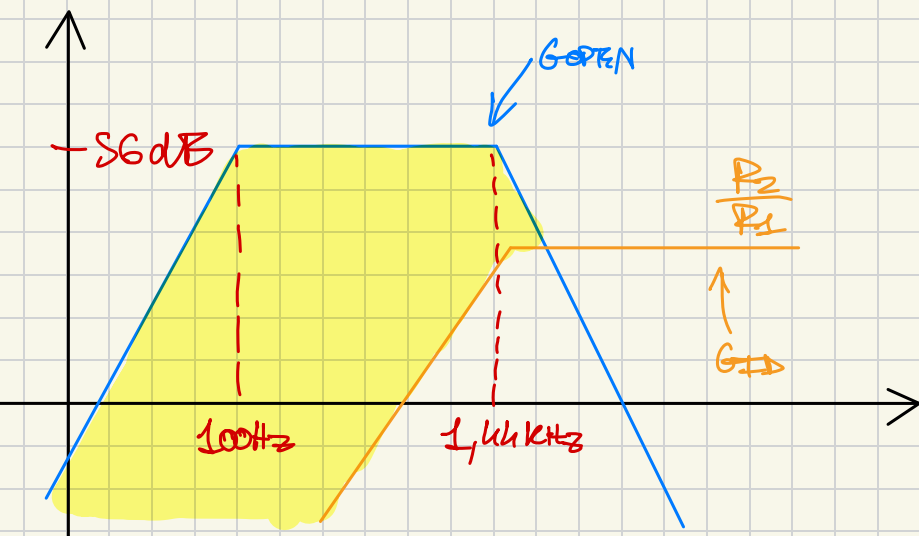
$$-\frac{A_0}{1+s\tau_0} \frac{sC R_2}{1+sC(R_1+R_2)} \rightarrow \text{TRASCURABILE (ESSENDO NOI PRIMA DEL POLO)}$$

PREVALE DOPO UN PO'

$$\approx A_0 \frac{sC R_2}{s\tau_0} = 56 \text{ dB}$$

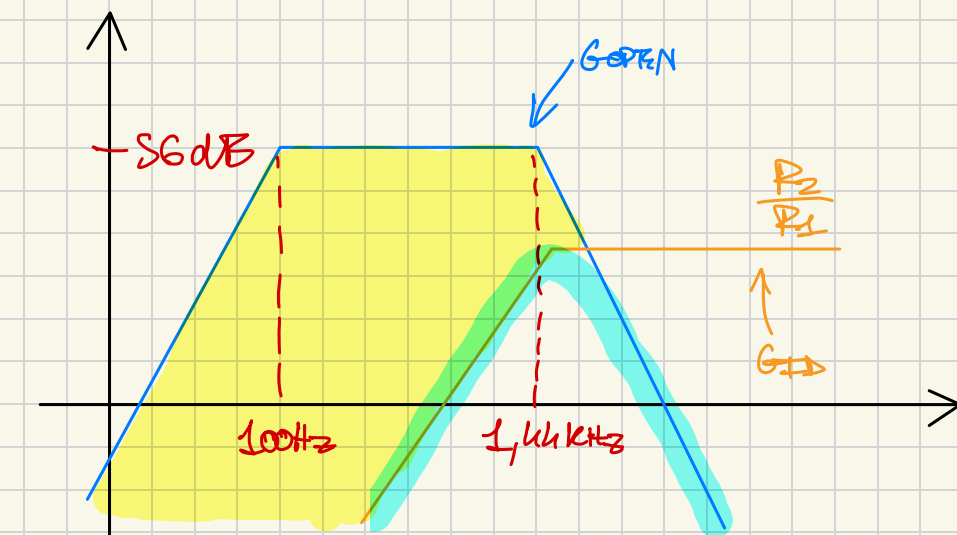
$1,44 \text{ kHz}$
 100 Hz

TRACCIO ORA ANCHE IL GID:



L'AREA È IL GLOOP (PERCHÉ LA DIFFERENZA SU UN DIA. DI BODE È UGUALE AL RAPPORTO IN LOGICA LINEARE)

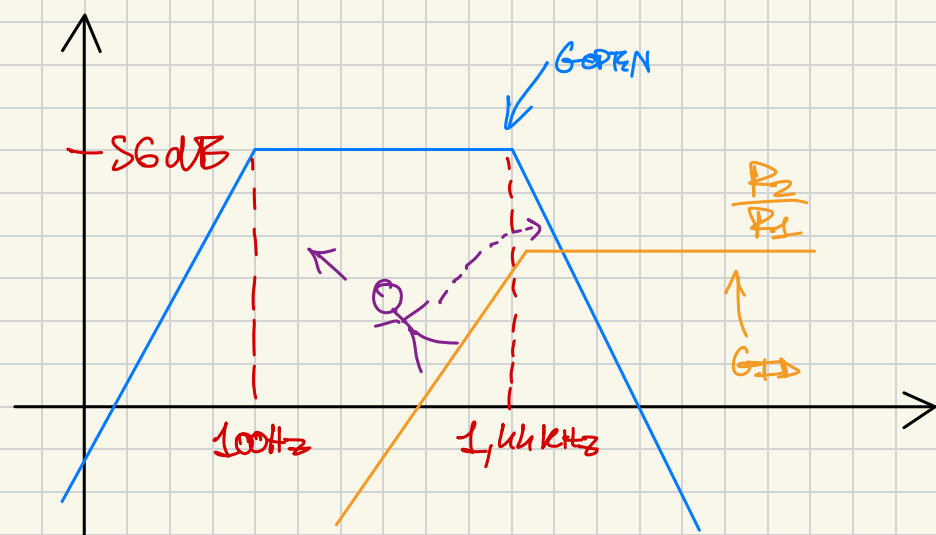
MA NOTIAMO CHE VERSO DESTRA È PICCOLO:



A SX SARÀ GID,
A DX SARÀ GOPEN

⇒ GPEAK (APPROSSIMATO)

IMMAGINO DI "CAMMINARE" SOPRA AL GID, PER NOI ORA "BASE"



NOTO G LOOP INIZIALMENTE PARALLELO, POI "SCENDE"
E POI ANCORA DI DUE VOLTE E INFINE SCENDE DI 1
⇒ OTTENGONO IL GID (LO USO COME VERIFICA)

2)

Si trascuri per i punti 1 e 2 la presenza della capacità C_2 .

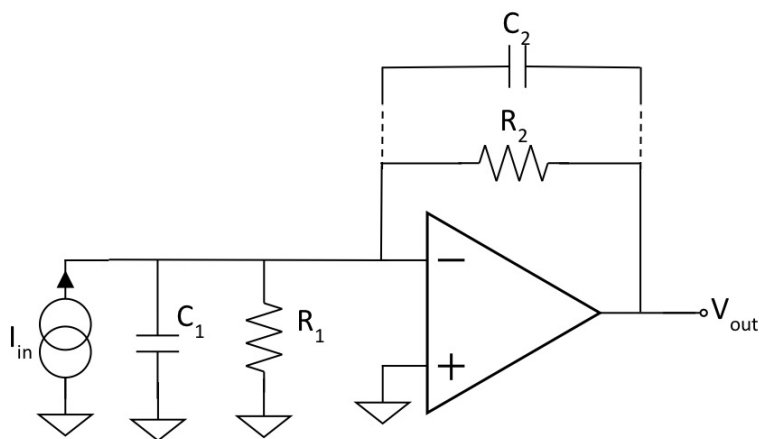
1) Determinare l'espressione del trasferimento ideale $T_{ID}(s) = \frac{V_{out}}{I_{in}}$.

2) Valutare la stabilità del circuito.

Si colleghi ora la capacità C_2 in parallelo a R_2 come mostrato in figura.

3) Dimensionare C_2 per avere un margine di fase di 90° .

4) Disegnare su un grafico quotato la tensione di uscita $V_{OUT}(t)$ in risposta ad un gradino di corrente in ingresso di ampiezza $-1mA$.



DATI:

$$R_1 = 500\Omega$$

$$R_2 = 5k\Omega$$

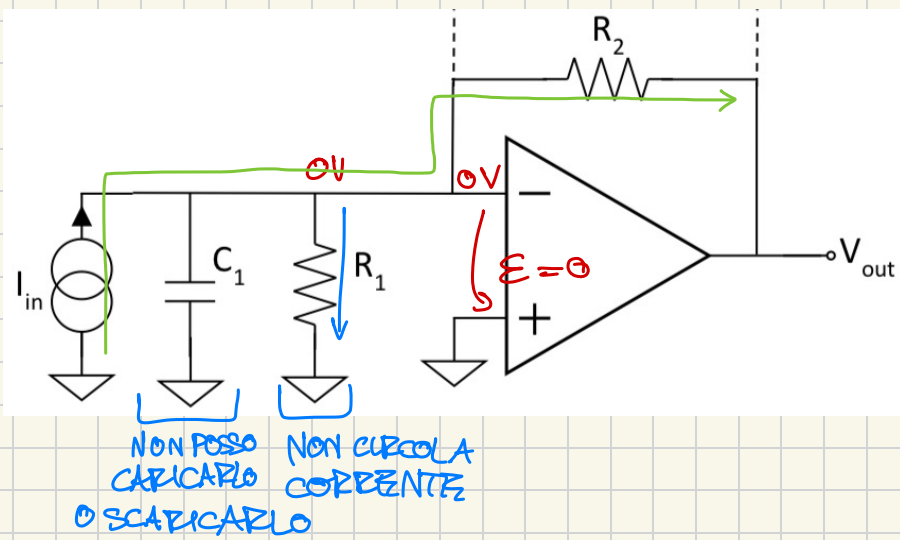
$$C_1 = 100pF$$

Amplificatore Operazionale:

$$A_0 = 10^5$$

$$GBWP = 100MHz$$

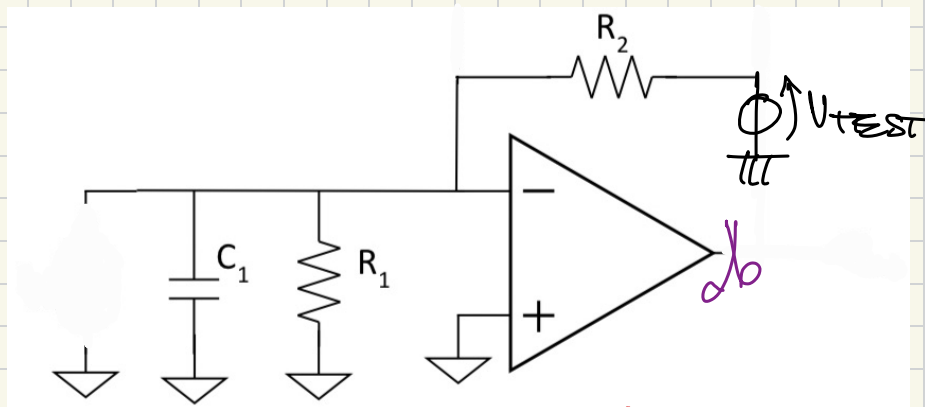
1) È RETROAZIONATO, NEGATIVAMENTE



⇒ LA CORRENTE PUÒ SEGUIRE SOLO QUEL PERCORSO

$$\Rightarrow V_{out} = 0V - R_2 \cdot I_{in} \Rightarrow \frac{V_{out}}{I_{in}} = -R_2$$

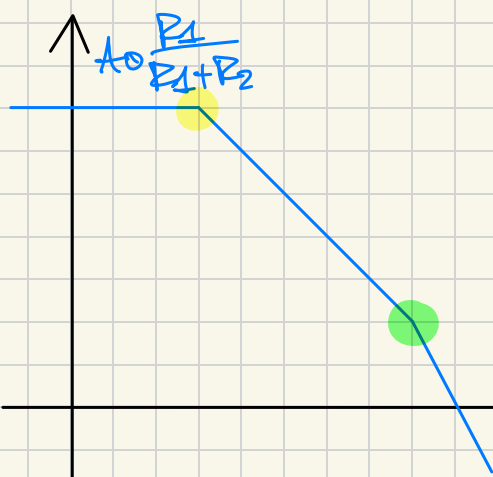
2) CI SERVE IL LOOP



$$G_{loop} = -A(s) \frac{R_1 \parallel \frac{1}{sC_1}}{R_1 \parallel \frac{1}{sC_1} + R_2} = -A(s) \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{1 + sC_1(R_1 \parallel R_2)} =$$

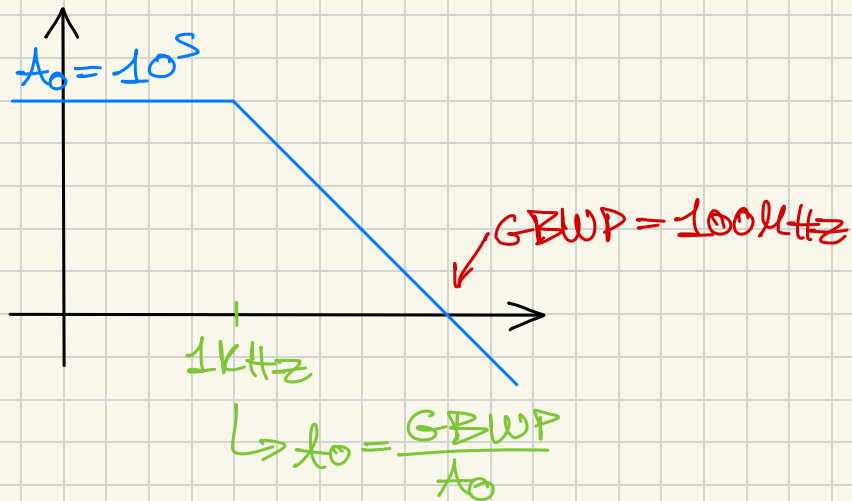
$$= -\frac{A_0}{1 + s\tau_0} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{1 + sC_1(R_1 \parallel R_2)}$$

→ PRIMO POLO DÒ PER SCOTTATO ESSERE QUELLO DELL'OPAMP



ATTENZIONE! È UN DISEGNO QUALITATIVO! NON HO ANCORA CALCOLATO FREQUENZE E RELATIVI VALORI, NON SONO ANCHE SE È SOPRA L'ASSE

CALCOLIAMO IL PRIMO:



L'ALTRO HA FREQUENZA $\frac{1}{2\pi C_1 (R_1 \parallel R_2)} = 3,5 \text{ MHz}$
 $1 \text{ k}\Omega$

MA CI MANCA ANCORA LA f^* , CHE SI CALCOLA COME PRIMA...
PER ESERCIZIO: GUADAGNO SECONDO POLO: 2,59
FREQUENZA DI TAGLIO (f^*): 5,6 MHz