

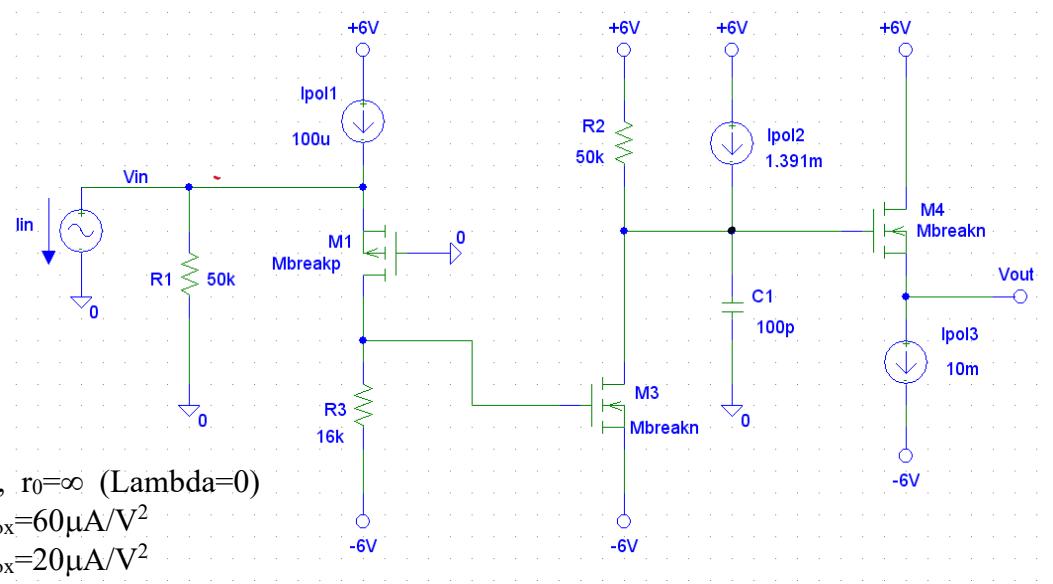
Elettronica Analogica - Prof. Marco Sampietro
Anno accademico 2025/2026

I segnali di retroazione in un amplificatore retroazionato

Parte 1: Analisi dello stadio di andata

Calcolo teorico:

1- POLARIZZAZIONE. Studiare la polarizzazione del seguente circuito, *calcolando* le tensioni a tutti i nodi e le correnti in tutti i rami. Verificare che la tensione dell'uscita sia circa 0V.



Dimensioni dei MOS: $W_1/L_1=5\mu/0.5\mu$, $W_3/L_3=100\mu/0.5\mu$, $W_4/L_4=500\mu/0.5\mu$.

Calcolo della polarizzazione:

$$V_{in} =$$

$$V_{GSM3} =$$

$$V_{GSM4} =$$

$$I_{R1} =$$

$$I_{M3} =$$

$$g_{m4} =$$

$$I_{M1} =$$

$$g_{m3} =$$

$$1/g_{m4} =$$

$$g_{m1} =$$

$$(1/g_{m1} =)$$

$$V_{out} \approx$$

2- PICCOLO SEGNALE. Valutare il trasferimento tra la corrente di segnale in ingresso e la tensione in uscita. Valutare inoltre la costante di tempo del polo dominante.

Espressione della transimpedenza:

Valore numerico a bassa frequenza

$$T(s) =$$

$$T(0) = \left. \frac{V_{out}(s)}{I_{in}(s)} \right|_{s=0} =$$

Costante di tempo del polo :

espressione simbolica:

Valore numerico:

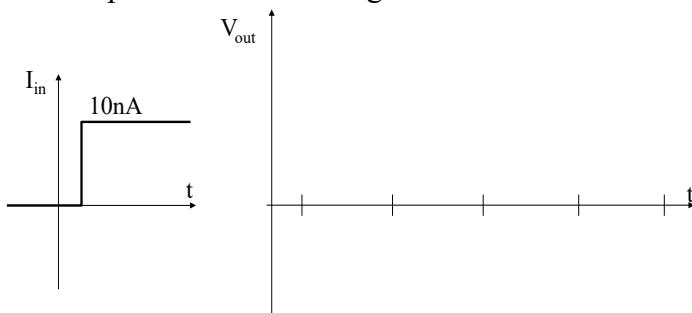
Frequenza del polo :

$$\tau =$$

$$\tau =$$

$$f_p =$$

Disegnare la risposta nel tempo dell'uscita ad un gradino di corrente di 10nA.



Calcolare come si ripartisce (in %) la corrente I_{in} tra quella che scorre in $R1$ e quella in $M1$

Corrente in $R1$:

Corrente in $M1$:

3- DISTORSIONE DEL CIRCUITO

Quale dei 3 transistori pensi che introduca più distorsione ? Perché ?

Se il segnale di ingresso fosse una sinusoide di corrente ampia **500nA**, quale distorsione stimeresti all'uscita del circuito ?

2- PICCOLO SEGNALE (Simulazione con SPICE)

1- POLARIZZAZIONE.

Per inserire il modello del transistore bisogna selezionarlo con il mouse e dal menu *Edit* scegliere *Model* e, successivamente, *Edit Instance Model (Text)*. Aggiornare quindi la finestra che definisce il modello sia del nMOSFET che del pMOSFET : VTO= tensione di soglia, KP= μC_{ox} , LAMBDA= inverso della tensione di Early.

Confrontare la simulazione ottenuta con i valori calcolati prima.

2- GUADAGNO e PARTIZIONE DI CORRENTE ALL'INGRESSO (su piccolo segnale).

Applicare all'ingresso I_{in} uno scalino di corrente di ampiezza **10nA**. Si utilizzi il componente **IPULSE** per generare lo scalino, usando i seguenti parametri: **I1=0, I2=10nA** (ampiezza dello scalino), **TD=10μs** (Time Delay – ritardo nell'applicazione dello scalino rispetto all'inizio della simulazione), **TR=1ns** (Time Rise – tempo di transizione da basso ad alto), **TF=1ns** (Time Fall – tempo di transizione da alto a basso), **PW=1s** (Pulse Width – larghezza temporale del gradino), **PER=10s** (PERiodicity – periodo di ripetizione dell'impulso).

Si esegua un'analisi di tipo "transient" (si imposti il parametro "step ceiling" a 10ns).

Nota: valore positivo di I_{in} significa un impulso di corrente *entrante* nel generatore di corrente.

$$T(0) = \text{Costante di tempo} =$$

Quanta della corrente di segnale d'ingresso I_{in} circola in R_1 e quanta in $M1$?

Corrente in R1 : *Corrente in M1 :*

Confrontare i risultati con le previsioni percentuali teoriche trovate nelle pagine iniziali.

3- DISTORSIONE DEL CIRCUITO

Applicare al circuito un segnale sinusoidale ampio **500nA** con il fine di analizzare la sua distorsione.

Per applicare il segnale si sostituisca il generatore IPULSE di prima con il generatore **ISIN** con i seguenti parametri: $Ioff = 0$, $Iampl = 500n$, $Freq = 100$, $Phase = 0$.

Si imposti inoltre il parametro “step ceiling” (*Analysis -> Setup... -> Transient*) a 1us allo scopo di ridurre il tempo richiesto dalla simulazione ed il parametro “final time” a 20ms.

Per valutare numericamente l’entità della distorsione abilitare la funzione *Fourier Analysis* nel finestra di setup della simulazione *Transient*, scegliendo ad esempio 10 armoniche ed indicando le variabili (anche più di una contemporaneamente, separate tra loro da “,” virgola e spazio) in “Output vars”. Rilanciare la simulazione, e trovate le armoniche in *Analysis -> Examine Output*).

Total Harmonic Distortion della tensione ai capi di R3
(equivalente alla distorsione della corrente di drain di M1):
.....

Total Harmonic Distortion della tensione ai capi di R2
(equivalente alla distorsione di M1 ed M3):
.....

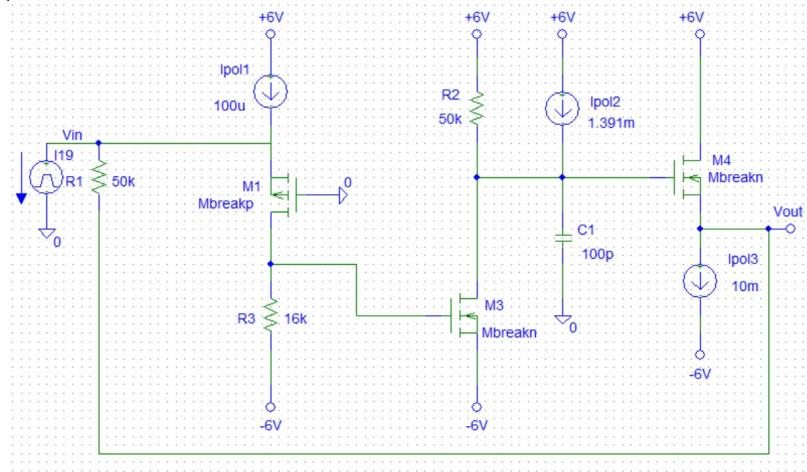
Total Harmonic Distortion al nodo di uscita:
(equivalente alla distorsione di tutti e 3 i MOSFET):
.....

Riflettere sui risultati ottenuti, confrontandoli con le previsioni teoriche fatte prima per individuare il transistore maggiormente responsabile della distorsione totale.
.....

Parte 2: Analisi del circuito retroazionato

Calcolo teorico:

Connettere ora la resistenza R_1 al nodo d'uscita V_{out} , come indicato nella figura seguente. Notare come la polarizzazione praticamente non cambi poiché i due punti erano entrambi a $0V$ e la corrente in R_1 era piccola rispetto a I_{pol3} .



Transimpedenza ideale (espressione simbolica e valore numerico)

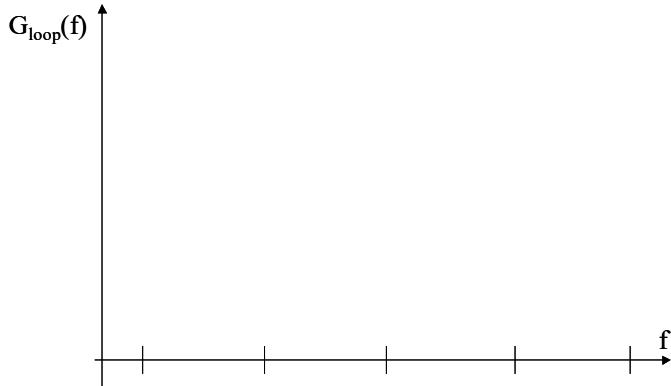
$$T_{id} = \frac{v_{out}}{i_{in}} =$$

Valore del guadagno d'anello, $G_{loop}(0)$, quando cioè la capacità C_1 non interviene:

$$G_{loop}(0) =$$

Espressione del Guadagno d'anello, $G_{loop}(s)$:

$$G_{loop}(s) =$$

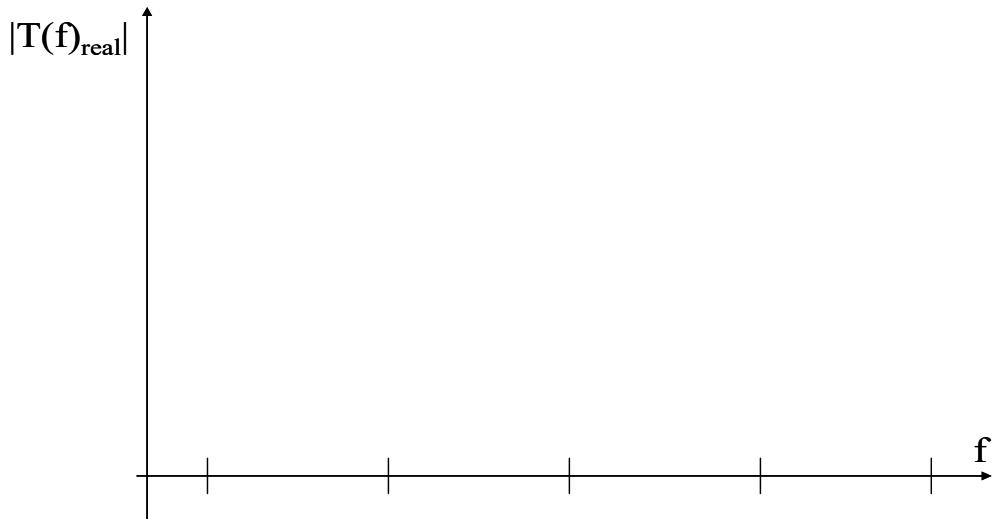


Stimare il valore della frequenza (e della corrispondente τ) in cui $G_{loop}(f)$ taglia l'asse a 0dB.

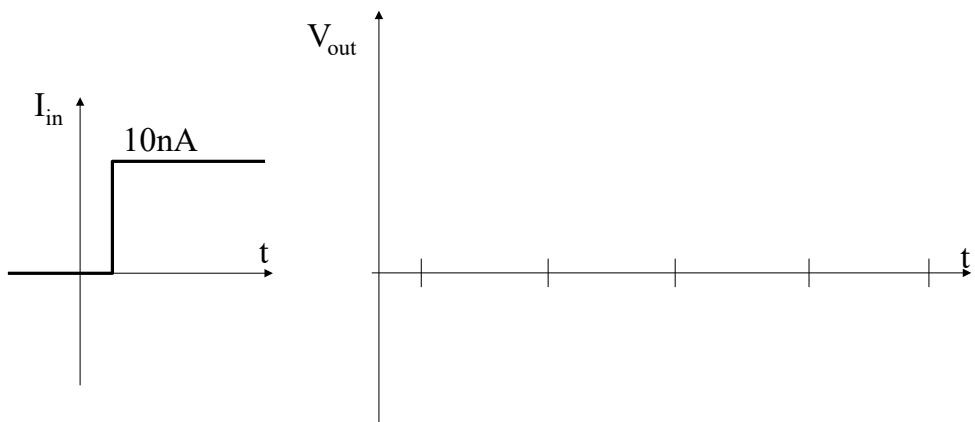
Calcolare il valore della **Transimpedenza reale** a bassa frequenza e, sulla base del grafico di $G_{loop}(s)$, tracciarne il grafico in funzione della frequenza.

$$T_{real} = \frac{v_{out}}{i_{in}} =$$

Grafico:



Sulla base di quest'ultimo grafico, prevedere l'andamento temporale della risposta del circuito ad un gradino di corrente di ingresso ampio **10nA** e quotarne la costante di tempo.



La risposta allo scalino è più o meno veloce rispetto a quando il circuito NON era retroazionato ?
Commentare.

Che rapporto c'è tra la τ appena trovata e quella del circuito NON retroazionato ?.

Simulazione Spice (analisi in transitorio):

Introdurre le modifiche per rendere il circuito retroazionato.

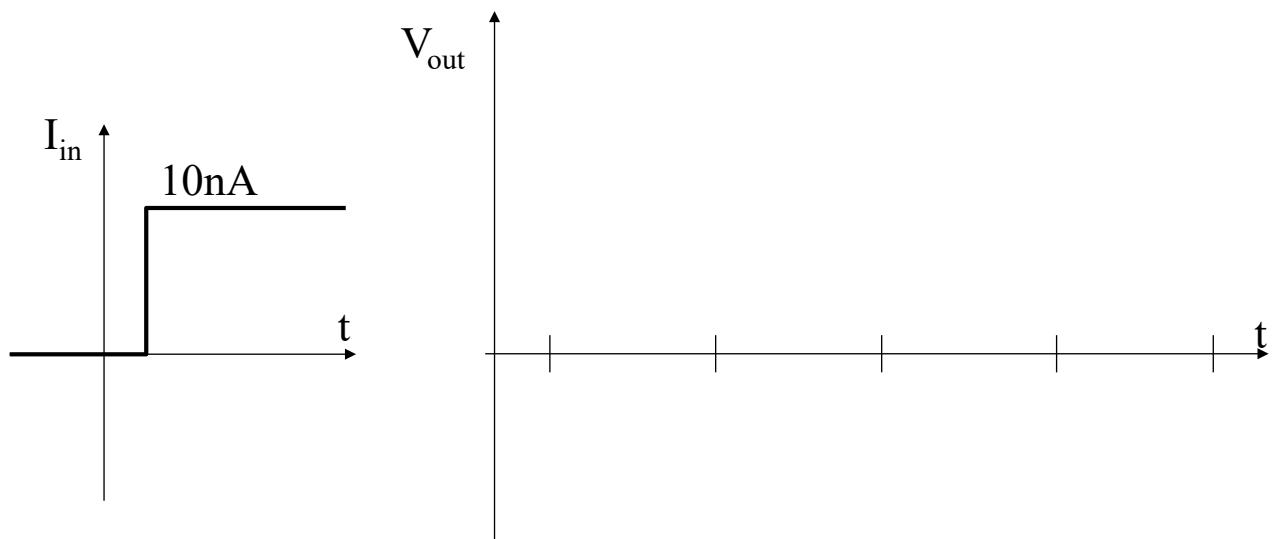
Verificare che la polarizzazione sia a posto.

Simulate ora con SPICE l'andamento della tensione di uscita V_{out} applicando all'ingresso I_{in} uno scalino di ampiezza **10nA**. Si utilizzi di nuovo il componente **IPULSE** per generare lo scalino (parametri: I1=0, I2=10nA, TD=10ns, TR=0.1ns, TF=1ns, PW=1s, PER=10s; *nota:* Si esegua un'analisi di tipo "transient" (**si imposti il parametro "step ceiling" a 0.1ns**).

Per ottenere simulazioni più accurate si consiglia di cambiare il parametro di simulazione RELTOL ponendolo uguale a 1e-8 (menuù analysis -> Setup... -> Options).

"Guadagno" in continua simulato :

Dall'andamento temporale della risposta che avrete disegnato qui sotto, ricavare il più precisamente possibile la costante di tempo τ del circuito.



$$\tau =$$

Confrontare il responso del simulatore con il valore di τ previsto nella pagina precedente. Dovreste avere ritrovato lo stesso valore. Bravi.

Parte 3: Visualizzazione dell'evoluzione della retroazione

Sempre nel caso di segnale d'ingresso a scalino, visualizzare con SPICE l'evoluzione nel tempo della corrente circolante nel transistor M1 e nella resistenza R1 così da “vedere” come evolve nel tempo il “lavoro di compensazione” della reazione. Questa pagina richiede precisione.

Disegnare, quotato in ampiezza e tempo, l'**andamento di I_{M1}** (si valuti bene l'ampiezza del fronte iniziale ed il valore asintotico a tempi lunghi):

Disegnare, quotato in ampiezza e tempo, l'**andamento di I_{R1}** (si valuti bene l'ampiezza del fronte iniziale ed il valore asintotico a tempi lunghi):

Riflettere. Appena dopo avere applicato lo scalino, quanto valgono le correnti in M1 e in R1? Confrontare tali valori con quelli ottenuti nella Parte 1. Quanto vale la loro somma ?

Riflettere. A transitorio esaurito quanto valgono le correnti in M1 e in R1? Quanto vale la loro somma ? Cosa rappresenta il segnale di corrente in M1 ? Poteva essere calcolato a priori? In base a quali considerazioni?

A conclusione, **riflettere** su quale possa essere un modo comodo per ottenere da SPICE il G_{loop} di un circuito.

Parte 4: Distorsione in un circuito retroazionato

Vogliamo confrontare la distorsione del circuito non-retroazionato (Parte 1) con quella del circuito retroazionato.

Al fine di rendere il confronto significativo, si applichi ora un **segnale all'ingresso di ampiezza** tale da ottenere un'uscita ampia quanto il caso precedente di circuito non-retroazionato:

$$I_{in}=500\text{nA}\cdot(1-G_{loop}) = \dots$$

Ricordatevi ora di ritornare al valore iniziale del parametro di simulazione RELTOL ponendolo uguale a 1e-6 (menu analysis -> Setup... -> Options) come all'inizio.

*Circuito NON retroazionato
(ricopiare il risultato di Parte 1)*

*Circuito retroazionato
(dalla simulazione)*

Total Harmonic Distortion
al nodo di uscita :

COMMENTI :

Di quanto si è ridotta la distorsione della tensione di uscita? Giustificare la risposta.

*Circuito NON retroazionato
(ricopiare il risultato di Parte 1)*

*Circuito retroazionato
(dalla simulazione)*

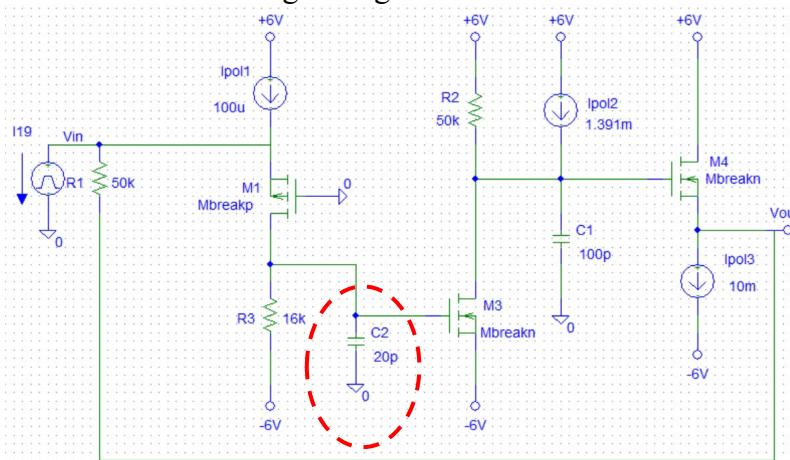
Total Harmonic Distortion
della corrente di drain in M1,
equivalente alla distorsione
della tensione ai capi di R3 :

COMMENTI :

Notare che la corrente in M1 è molto più distorta ora (caso di circuito retroazionato) rispetto a quanto calcolato prima (Parte 1) in assenza di retroazione. Perché? Cosa è successo ?

Parte 5: Analisi della stabilità

Si introduca nel circuito retroazionato una seconda capacità $C_2=20\text{pF}$ tra il gate di M3 e massa, come indicato nella figura seguente.



Valori dei poli di $G_{loop}(s)$

$$f_{p1} =$$

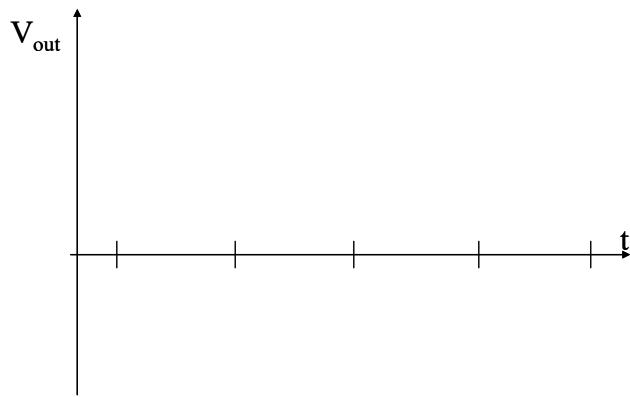
$$\tau_1 =$$

$$f_{p2} =$$

$$\tau_2 =$$

Si usi di nuovo il generatore IPULSE e si applichi uno **scalino di corrente da $1\mu\text{A}$** all'ingresso.

Si analizzi la tensione al nodo di uscita V_{out} , disegnandone l'andamento nel tempo in modo accurato in un diagramma ben quotato.

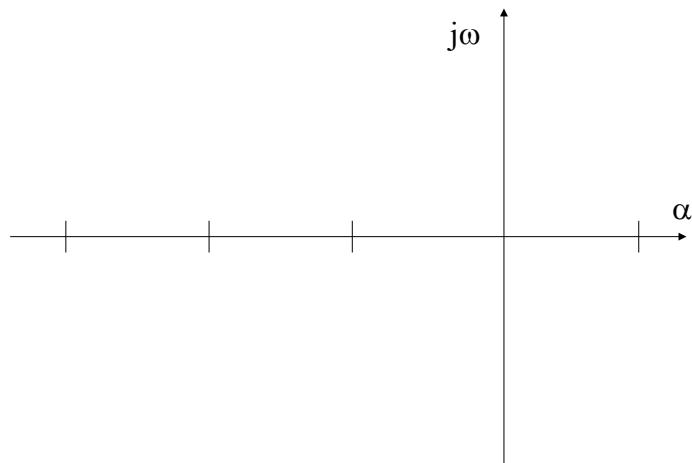


Quante oscillazioni ci sono prima di raggiungere il valore asintotico ?

Quanto è il periodo dell'oscillazione (e quindi la sua frequenza) ?

Come parte la curva all'istante di applicazione dello scalino ?

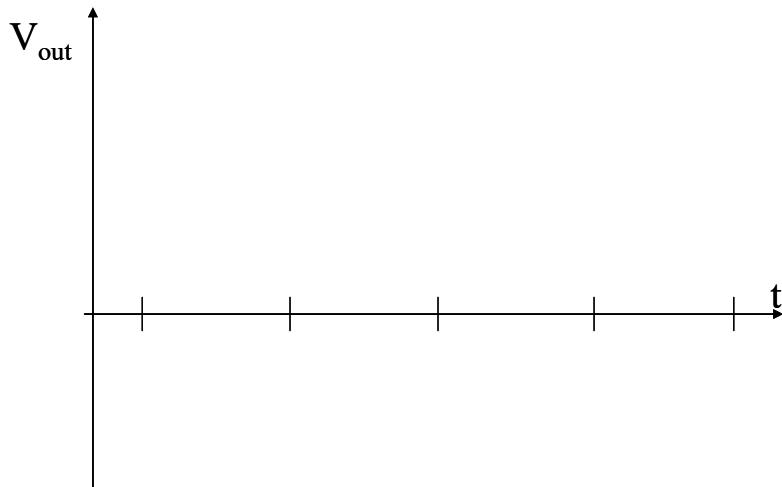
Disegnare il luogo delle radici ed interpretare i risultati ottenuti dalla simulazione.



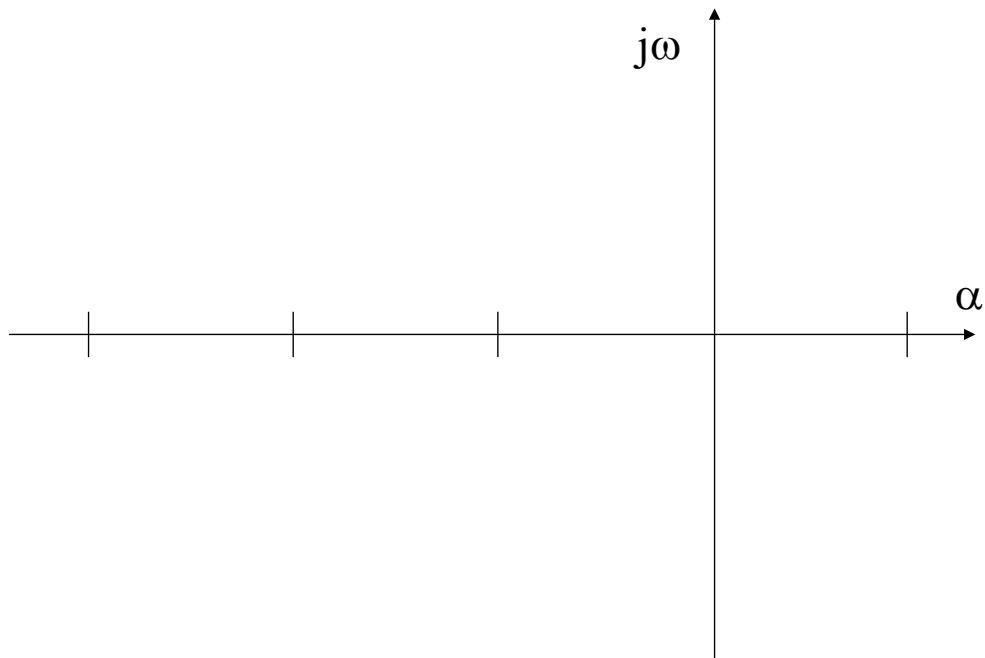
Modifichiamo ora il valore della capacità C2 in modo da rendere il suo polo uguale all'altro, cioè tale da rendere i due poli di $G_{loop}(s)$ coincidenti.

Nuovo valore di C2 che renda i due poli di $G_{loop}(s)$ reali e coincidenti. : $C_2 = \dots$

Riportare nel grafico l'andamento della tensione di uscita mostrato dal simulatore.



Convincersi del risultato indicando sul piano complesso il luogo delle radici tarato.



Scrivere i valori dei due poli del circuito :

$S_1 =$

$S_2 =$

Se avete capito bene tutto quanto fatto oggi siete proprio bravi, almeno come i migliori progettisti di elettronica in giro per il mondo!