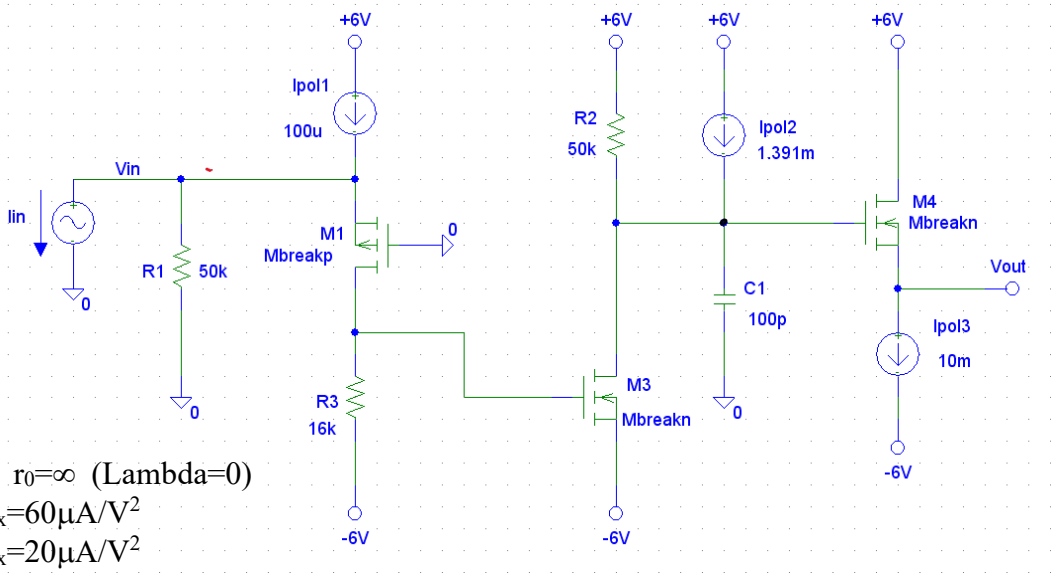


I segnali di retroazione in un amplificatore retroazionato

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.



$|V_T|=0.8V$ ,  $r_0=\infty$  ( $\text{Lambda}=0$ )  
 $k_n=1/2\mu C_{ox}=60\mu A/V^2$   
 $k_p=1/2\mu C_{ox}=20\mu A/V^2$

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:

$V_{in}=$	$V_{GSM3}=$	$V_{GSM4}=$
$I_{R1}=$	$I_{M3}=$	$g_{m4}=$
$I_{M1}=$	$g_{m3}=$	$1/g_{m4}=$
$g_{m1}=$	$(1/g_{m1}=)$	$V_{out}\cong$

**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:

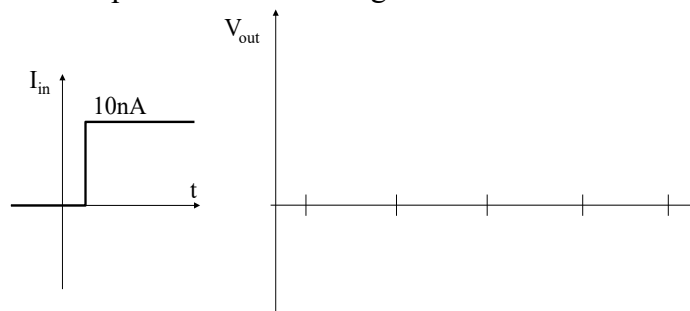
Frequenza del polo :

$\tau =$

$\tau =$

$f_p =$

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 transistor 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 :  $V_{TO}$ = tensione di soglia,  $K_P=\mu C_{ox}$ ,  $LAMBDA$ = 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.

$T(0) =$

Costante di tempo=

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

Corrente in  $R_1$  :

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:  $I_{off} = 0$ ,  $I_{ampl} = 500n$ ,  $Freq = 100$ ,  $Phase = 0$ .

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):

.....

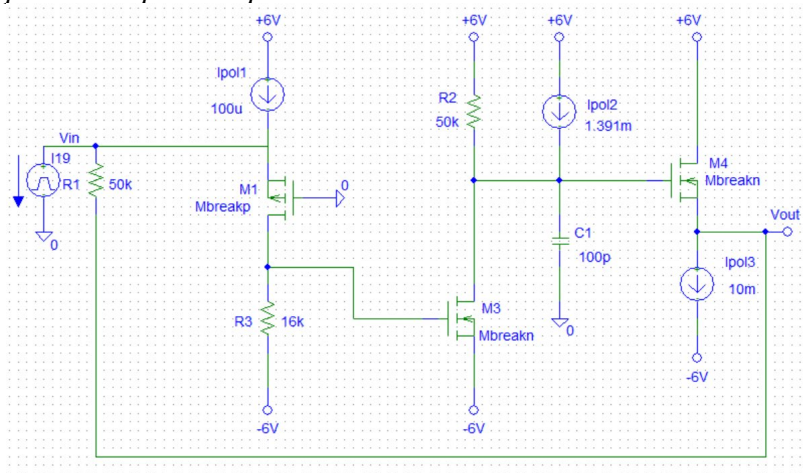
Riflettere sui risultati ottenuti, confrontandoli con le previsioni teoriche fatte prima per individuare il transistor maggiormente responsabile della distorsione totale.

.....

## 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)

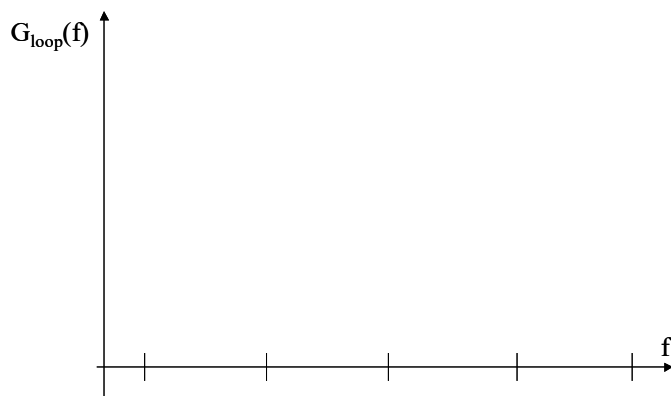
$$T_{id} = \frac{v_{out}}{i_{in}} =$$

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

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

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

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

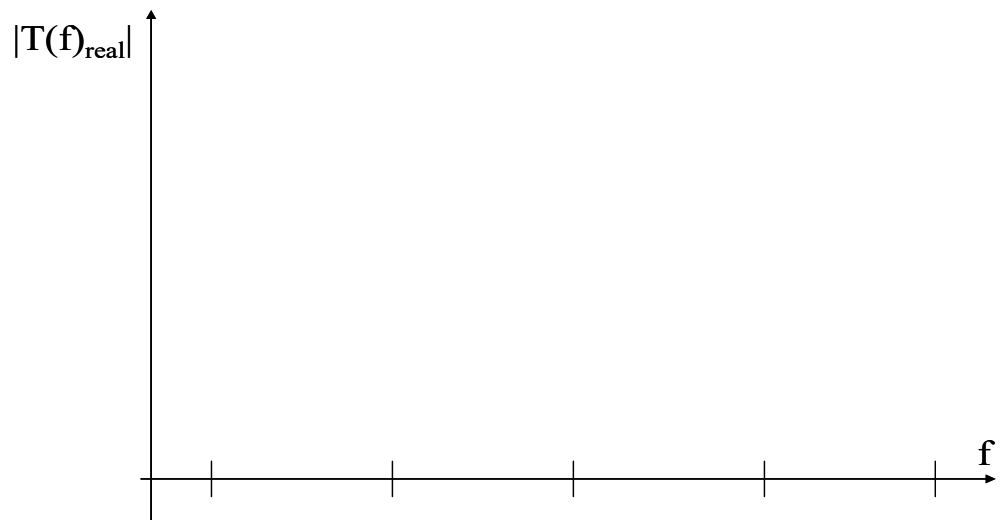


Stimare il valore della frequenza (e della corrispondente  $\tau$ ) in cui  $G_{loop}(f)$  taglia l'asse a 0dB.

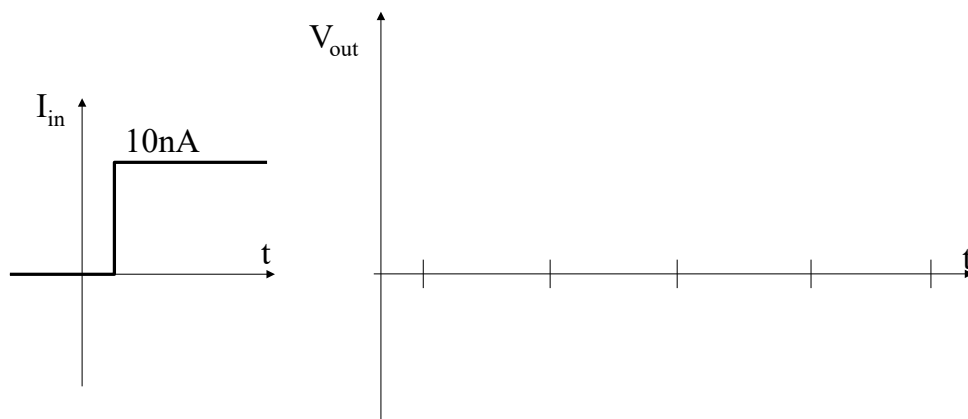
Calcolare il valore della **Transimpedenza reale** a bassa frequenza e, sulla base del grafico di  $G_{loop}(s)$ , tracciarne il grafico in funzione della frequenza.

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

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  $\tau$  appena trovata e quella del circuito NON retroazionato ?.

### ***Simulazione Spice (analisi in transitorio):***

Introdurre le modifiche per rendere il circuito retroazionato.

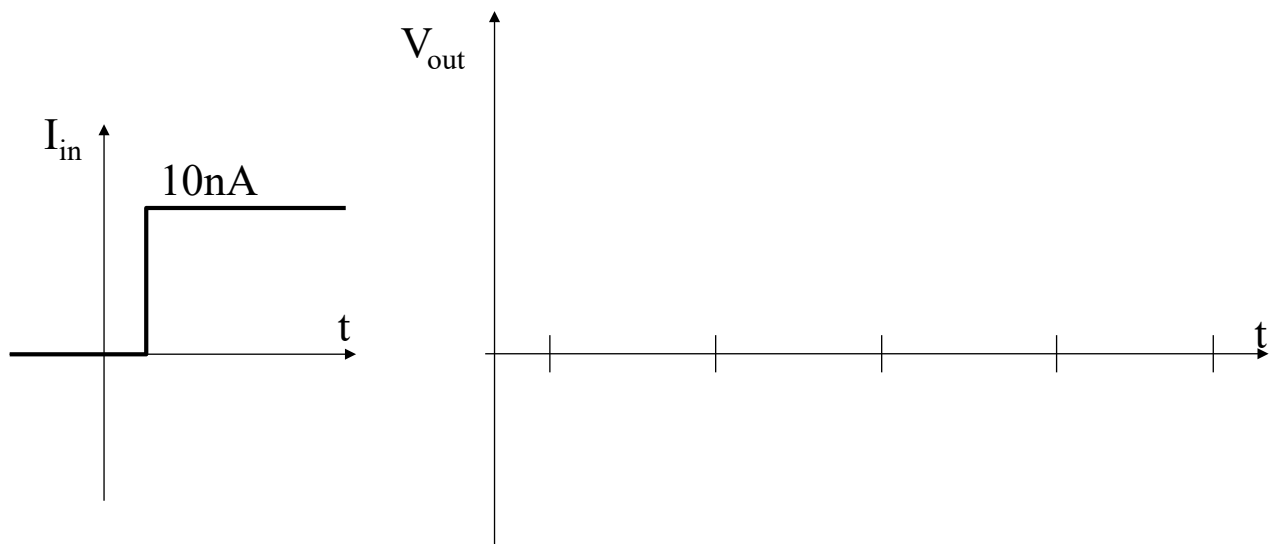
Verificare che la polarizzazione sia a posto.

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  $1e-8$  (menù 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  $\tau$  del circuito.



$\tau =$

Confrontare il responso del simulatore con il valore di  $\tau$  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:

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

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

	<i>Circuito NON retroazionato</i> (ricopiare il risultato di Parte 1)	<i>Circuito retroazionato</i> (dalla simulazione)
--	--	--

Total Harmonic Distortion  
al nodo di uscita :

-----	-----
-------	-------

COMMENTI :

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

---

	<i>Circuito NON retroazionato</i> (ricopiare il risultato di Parte 1)	<i>Circuito retroazionato</i> (dalla simulazione)
--	--	--

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

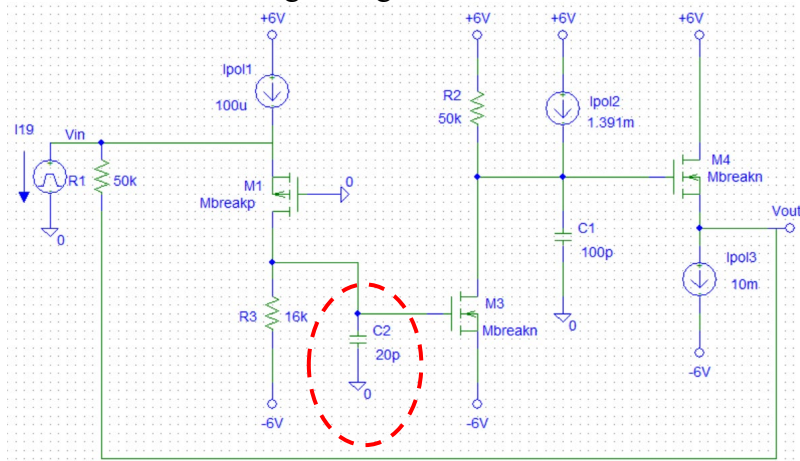
-----	-----
-------	-------

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  $G_{\text{loop}}(s)$

$f_{p1} =$

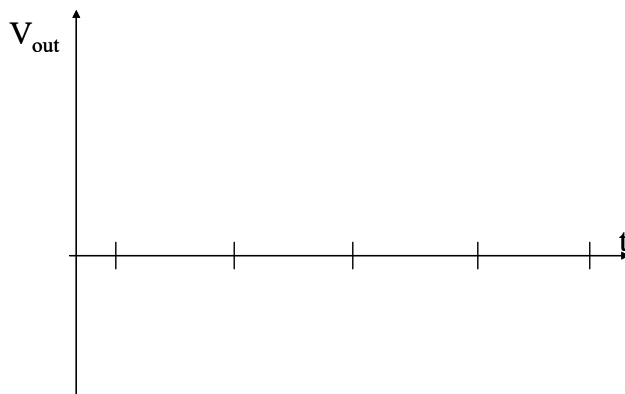
$\tau_1 =$

$f_{p2} =$

$\tau_2 =$

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  $V_{\text{out}}$ , disegnandone l'andamento nel tempo in modo accurato in un diagramma ben quotato.

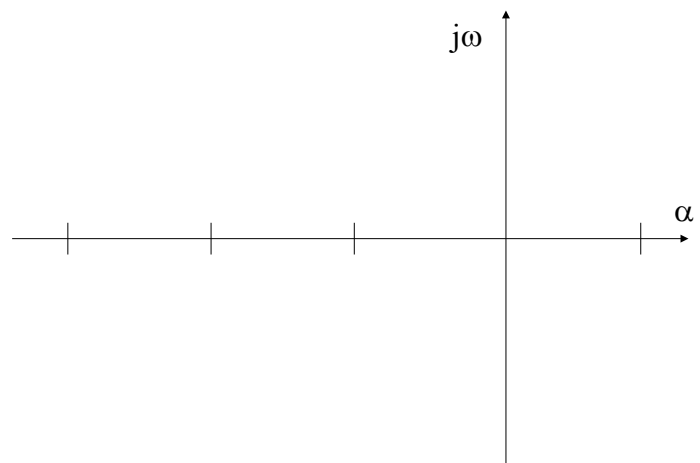


Quante oscillazioni ci sono prima di raggiungere il valore asintotico ?

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

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

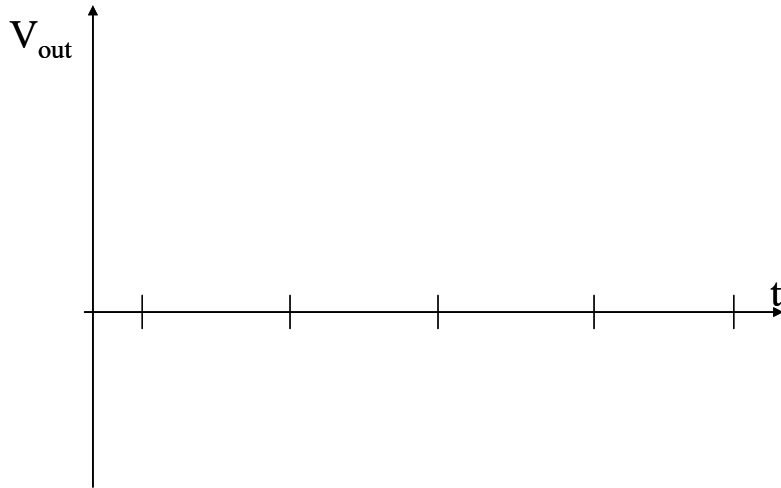
Disegnare il luogo delle radici ed interpretare i risultati ottenuti dalla simulazione.



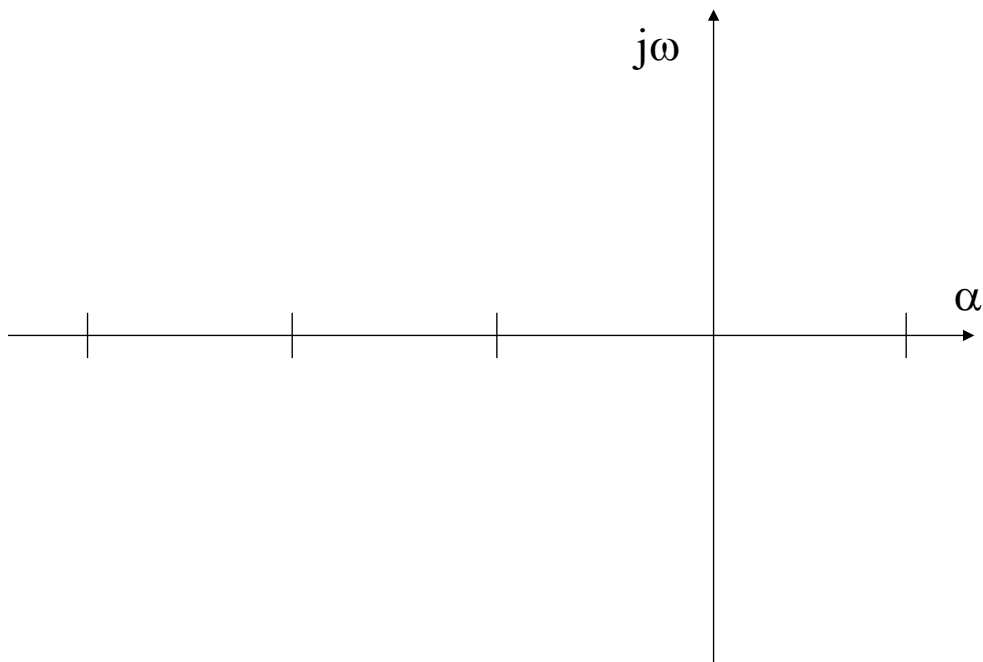
Modifichiamo ora il valore della capacità  $C_2$  in modo da rendere il suo polo uguale all'altro, cioè tale da **rendere i due poli di  $G_{loop}(s)$  coincidenti.**

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

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



Convincerli 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!