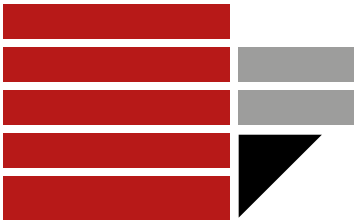
Università della Calabria

Dipartimento di Ingegneria Informatica, Modellistica, Elettronicae Sistemistica



Corso di

Progettazione di Sistemi Analogici

Laboratorio: Amplificatore Operazionale

Raffaele Petrolo MAT. 252120

A.A. 2023/2024

Introduzione

L'obiettivo di questo laboratorio è la progettazione di un amplificatore operazione a due stadi:

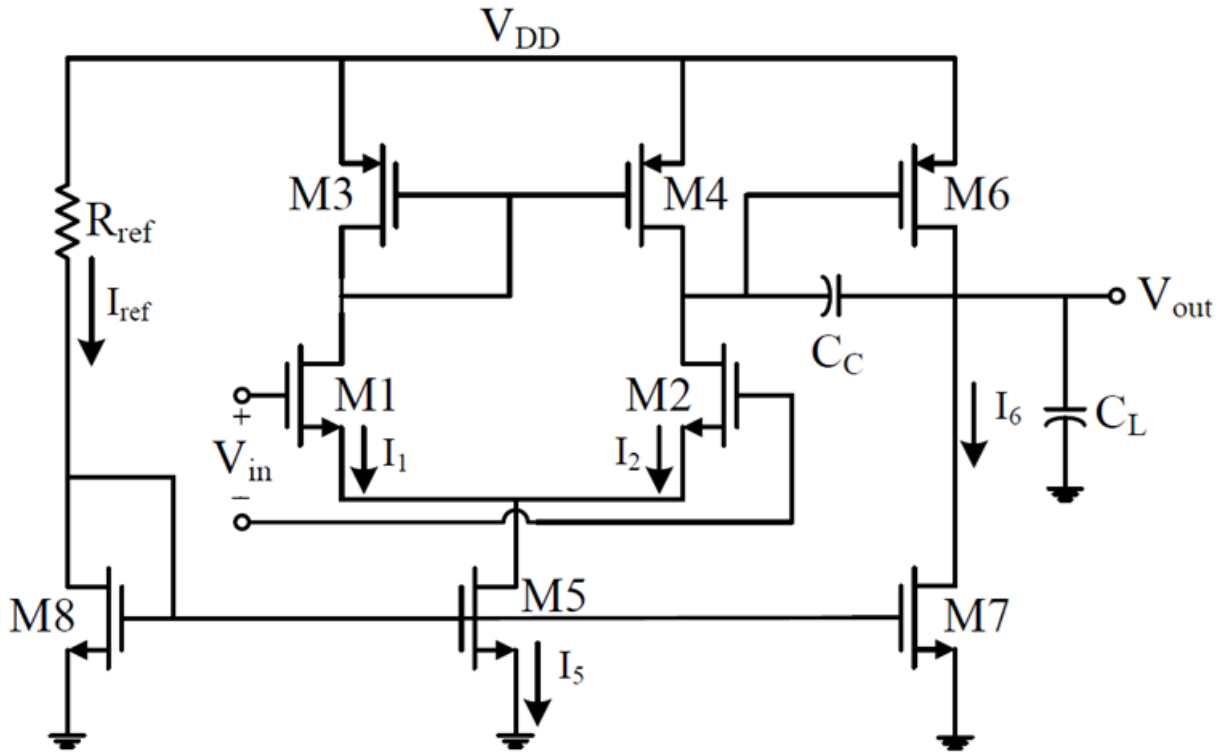


Fig. 1: Schema di un OP-AMP a stadio doppio

Terminata la fase di progettazione dovranno poi essere condotte le analisi di parametri DC, AC e comportamento in frequenza.

Questo amplificatore presenta:

- **Rete di alimentazione**, tramite un current mirror costituito dagli NMOS M8, M5, M7.
- **Primo stadio differenziale**, costituito dagli NMOS M1 e M2 con carico attivo tramite i PMOS M3 e M4. Fornisce alta impedenza d'ingresso e uscita differenziale.
- **Secondo stadio,** costituito dal PMOS M6 in configurazione common source. Amplifica ulteriormente l'uscita dello stadio precedente.

Questa configurazione offre vari vantaggi rispetto agli amplificatori singolo stadio, fra cui guadagno maggiore, banda più ampia e output swing d'uscita maggiore.

I due stadi sono accoppiati capacitivamente con una tecnica detta compensazione di Miller, la quale aumenta la stabilità del sistema e migliora il margine di fase compensando i poli interni al sistema.

Progettazione

Come primo passo viene disegnato lo schema del circuito sul software Cadence Virtuoso:

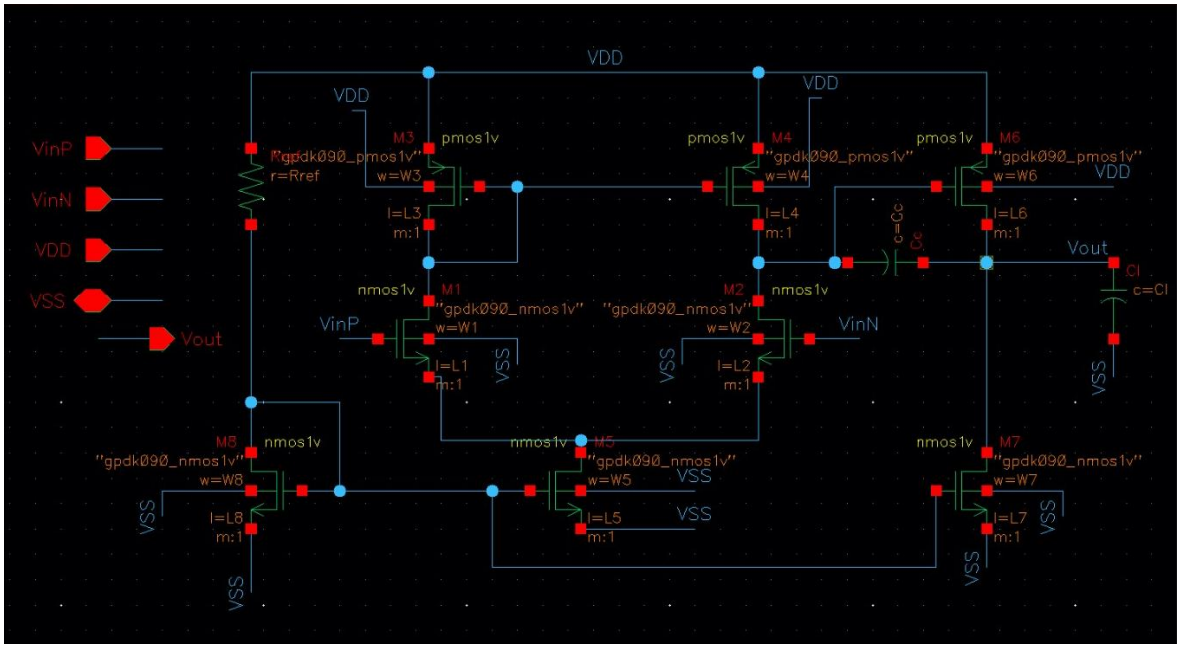


Fig. 2: Schema OP-AMP su Virtuoso

Successivamente si definisce il testbench del circuito, contenente gli stimoli con il quale verrà testato.

Dimensionamento

Il funzionamento e le caratteristiche elettriche del sistema dipendono dalla dimensione fisica dei transistor.

Essi sono stati dimensionati tramite apposito script in MATLAB per soddisfare le seguenti specifiche:

Parameter	Description	Desired value
V_{DD}	Supply voltage	1 V
P	Power consumption	$\leq 100\,\mu W$
A_V	Gain	$\geq$30 dB
GBW	Gain bandwidth	≥ 5 MHz
SR	Slew rate	$\geq 10\,V/\mu s$
PM	Phase margin	$\geq 60°$
C_L	Load capacitance	4 pF
C_C	Compensation capacitance	Depends on the target PM

$V_{DD} = 1.0\,V$
$V_{SS} = 0\,V$
$V_{min} = 0.4\,V$
$V_{max} = 0.7\,V$
$e_{ox} = 3.9 \cdot e_o$

$t_{ox,n} = 2.33 \times 10^{-9}\,m$
$t_{ox,p} = 2.48 \times 10^{-9}\,m$
$\mu_n = 182.3 \times 10^{-4}\,m^2/Vs$
$\mu_p = 98.86 \times 10^{-4}\,m^2/Vs$
$V_{Tn} = 0.245\,V$
$|\,V_{Tp}\,| = 0.255\,V$

Fig. 3: Specifiche di progetto e parametri noti

La tecnologia utilizzata è una tecnologia a $L_{min} = 90\,nm$.

Tra le specifiche di progetto è inoltre necessario utilizzare $L \geq 2L_{min}$ e approssimare all'unità qualora i rapporti dimensionali ne fossero inferiori.

È stato scelto di utilizzare $L = 200\,nm$ per ottenere un margine leggermente più ampio ed è stato necessario incrementare la tensione minima del circuito a $V_{min} = 0.5\,V$ per un corretto funzionamento

Vengono riportati i risultati del dimensionamento:

	Rapporto	*W [nm]*
M1	1.285	257
M2	1.285	257
M3	1	200
M4	1	200
M5	7.09	1418
M6	15.885	3177
M7	56.33	11266
M8	7.09	1418

Rref	74.9 kΩ

Analisi

Il sistema così dimensionato è stato allora sollecitato per estrapolare i parametri DC e AC

Analisi DC

Si vuole verificare che tutti i transistor lavorino in zona di saturazione e che sia verificata l'uguaglianza fra le correnti dei transistor della coppia differenziale $I_{M1} = I_{M2} = I_{M3} = I_{M4}$. Si riportano i risultati:

Point	Test	Output	Nominal	Spec	Weight	Pass/Fail
Parameters: VinN_DC=400m						
1	Batman3:opamp_tb:1	M1	2			
1	Batman3:opamp_tb:1	M2	2			
1	Batman3:opamp_tb:1	M3	2			
1	Batman3:opamp_tb:1	M4	2			
1	Batman3:opamp_tb:1	M5	1			
1	Batman3:opamp_tb:1	M6	2			
1	Batman3:opamp_tb:1	M7	2			
1	Batman3:opamp_tb:1	M8	2			
1	Batman3:opamp_tb:1	Iref	9.279u			
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M5/D				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/net16				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VinN				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VinP				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/Vout				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VDD				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VSS				
1	Batman3:opamp_tb:1	I1	3.119u			
1	Batman3:opamp_tb:1	I2	3.119u			
1	Batman3:opamp_tb:1	I3	3.119u			
1	Batman3:opamp_tb:1	I4	3.119u			
1	Batman3:opamp_tb:1	I5	6.238u			
1	Batman3:opamp_tb:1	I6	58.07u			
1	Batman3:opamp_tb:1	I7	58.07u			
1	Batman3:opamp_tb:1	I8	9.279u			
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/Rref/PLUS				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M1/D				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M2/D				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M3/D				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M4/D				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M6/D				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M7/D				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M8/D				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M3/S				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M4/S				
1	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M6/S				

Fig. 4: Vin @ 400 mV

Point	Test	Output	Nominal	Spec	Weight	Pass/Fail
Parameters: VinN_DC=500m						
2	Batman3:opamp_tb:1	M1	2			
2	Batman3:opamp_tb:1	M2	2			
2	Batman3:opamp_tb:1	M3	2			
2	Batman3:opamp_tb:1	M4	2			
2	Batman3:opamp_tb:1	M5	2			
2	Batman3:opamp_tb:1	M6	2			
2	Batman3:opamp_tb:1	M7	2			
2	Batman3:opamp_tb:1	M8	2			
2	Batman3:opamp_tb:1	Iref	9.279u			
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M5/D				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/net16				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VinN				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VinP				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/Vout				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VDD				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VSS				
2	Batman3:opamp_tb:1	I1	3.809u			
2	Batman3:opamp_tb:1	I2	3.81u			
2	Batman3:opamp_tb:1	I3	3.809u			
2	Batman3:opamp_tb:1	I4	3.809u			
2	Batman3:opamp_tb:1	I5	7.619u			
2	Batman3:opamp_tb:1	I6	66.99u			
2	Batman3:opamp_tb:1	I7	66.99u			
2	Batman3:opamp_tb:1	I8	9.279u			
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/Rref/PLUS				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M1/D				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M2/D				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M3/D				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M4/D				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M6/D				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M7/D				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M8/D				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M3/S				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M4/S				
2	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M6/S				

Fig. 5: Vin @ 500 mV

Point	Test	Output	Nominal	Spec	Weight	Pass/Fail
Parameters: VinN_DC=600m						
3	Batman3:opamp_tb:1	M1	2			
3	Batman3:opamp_tb:1	M2	2			
3	Batman3:opamp_tb:1	M3	2			
3	Batman3:opamp_tb:1	M4	2			
3	Batman3:opamp_tb:1	M5	2			
3	Batman3:opamp_tb:1	M6	2			
3	Batman3:opamp_tb:1	M7	2			
3	Batman3:opamp_tb:1	M8	2			
3	Batman3:opamp_tb:1	Iref	9.279u			
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M5/D				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/net16				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VinN				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VinP				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/Vout				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VDD				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VSS				
3	Batman3:opamp_tb:1	I1	4.209u			
3	Batman3:opamp_tb:1	I2	4.209u			
3	Batman3:opamp_tb:1	I3	4.209u			
3	Batman3:opamp_tb:1	I4	4.209u			
3	Batman3:opamp_tb:1	I5	8.418u			
3	Batman3:opamp_tb:1	I6	71.93u			
3	Batman3:opamp_tb:1	I7	71.93u			
3	Batman3:opamp_tb:1	I8	9.279u			
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/Rref/PLUS				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M1/D				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M2/D				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M3/D				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M4/D				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M6/D				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M7/D				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M8/D				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M3/S				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M4/S				
3	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M6/S				

Fig. 6: Vin @ 600 mV

Parameters: VinN_DC=700m						
4	Batman3:opamp_tb:1	M1	2			
4	Batman3:opamp_tb:1	M2	2			
4	Batman3:opamp_tb:1	M3	2			
4	Batman3:opamp_tb:1	M4	2			
4	Batman3:opamp_tb:1	M5	2			
4	Batman3:opamp_tb:1	M6	2			
4	Batman3:opamp_tb:1	M7	2			
4	Batman3:opamp_tb:1	M8	2			
4	Batman3:opamp_tb:1	Iref	9.279u			
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M5/D				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/net16				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VinN				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VinP				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/Vout				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VDD				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/VSS				
4	Batman3:opamp_tb:1	I1	4.592u			
4	Batman3:opamp_tb:1	I2	4.592u			
4	Batman3:opamp_tb:1	I3	4.592u			
4	Batman3:opamp_tb:1	I4	4.592u			
4	Batman3:opamp_tb:1	I5	9.184u			
4	Batman3:opamp_tb:1	I6	76.58u			
4	Batman3:opamp_tb:1	I7	76.58u			
4	Batman3:opamp_tb:1	I8	9.279u			
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/Rref/PLUS				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M1/D				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M2/D				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M3/D				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M4/D				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M6/D				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M7/D				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M8/D				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M3/S				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M4/S				
4	Batman3:opamp_tb:1	/I0/M6/S				

Fig. 7: Vin @ 700 mV

Raggiunta la soglia dei 500 mV tutti i transistor lavorano correttamente in saturazione ed è verificata l'uguaglianza delle correnti.

È stata inoltre indagata la soglia per la quale M5 inizia a lavorare in saturazione, la quale risulta essere pari a 425.8 mV.

Parameters: VinN_DC=425.7m						
8	Batman3:opamp_tb:1	M1	2			
8	Batman3:opamp_tb:1	M2	2			
8	Batman3:opamp_tb:1	M3	2			
8	Batman3:opamp_tb:1	M4	2			
8	Batman3:opamp_tb:1	M5	1			
8	Batman3:opamp_tb:1	M6	2			
8	Batman3:opamp_tb:1	M7	2			
8	Batman3:opamp_tb:1	M8	2			
Parameters: VinN_DC=425.8m						
9	Batman3:opamp_tb:1	M1	2			
9	Batman3:opamp_tb:1	M2	2			
9	Batman3:opamp_tb:1	M3	2			
9	Batman3:opamp_tb:1	M4	2			
9	Batman3:opamp_tb:1	M5	2			
9	Batman3:opamp_tb:1	M6	2			
9	Batman3:opamp_tb:1	M7	2			
9	Batman3:opamp_tb:1	M8	2			

Fig. 8: Soglia saturazione M5

Analisi AC

L'analisi viene effettuata in un range di frequenze fra 1 Hz e 100 MHz. La tensione di polarizzazione è stata fissata a 700 mV.

Test	Output	Nominal	Spec	Weight	Pass/Fail
Batman3:opamp_tb:1	/I0/VinN				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/VinP				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/Vout				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/VDD				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/VSS				
Batman3:opamp_tb:1	I1	4.592u			
Batman3:opamp_tb:1	I2	4.592u			
Batman3:opamp_tb:1	I3	4.592u			
Batman3:opamp_tb:1	I4	4.592u			
Batman3:opamp_tb:1	I5	9.184u			
Batman3:opamp_tb:1	I6	76.58u			
Batman3:opamp_tb:1	I7	76.58u			
Batman3:opamp_tb:1	I8	9.279u			
Batman3:opamp_tb:1	/I0/Rref/PLUS				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/M1/D				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/M2/D				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/M3/D				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/M4/D				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/M6/D				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/M7/D				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/M8/D				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/M3/S				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/M4/S				
Batman3:opamp_tb:1	/I0/M6/S				
Batman3:opamp_tb:1	gmM2	50.84u			
Batman3:opamp_tb:1	gdsM2	5.303u			
Batman3:opamp_tb:1	gdsM4	1.652u			
Batman3:opamp_tb:1	gmM6	499.6u			
Batman3:opamp_tb:1	gdsM6	26.43u			
Batman3:opamp_tb:1	gdsM7	81.95u			
Batman3:opamp_tb:1	gain1	7.31			
Batman3:opamp_tb:1	gain1dB	17.28			
Batman3:opamp_tb:1	gain2	4.61			
Batman3:opamp_tb:1	gain2dB	13.27			
Batman3:opamp_tb:1	total_gain	30.55			
Batman3:opamp_tb:1	ac_gain				
Batman3:opamp_tb:1	ac_phase				
Batman3:opamp_tb:1	power	95.04u			
Batman3:opamp_tb:1	vdd	1			
Batman3:opamp_tb:1	idc	95.04u			

Fig. 9: Parametri AC

Si può apprezzare il funzionamento dell'amplificatore dal suo comportamento in frequenza. È stata misurata la banda a -3dB ed il relativo margine di fase.

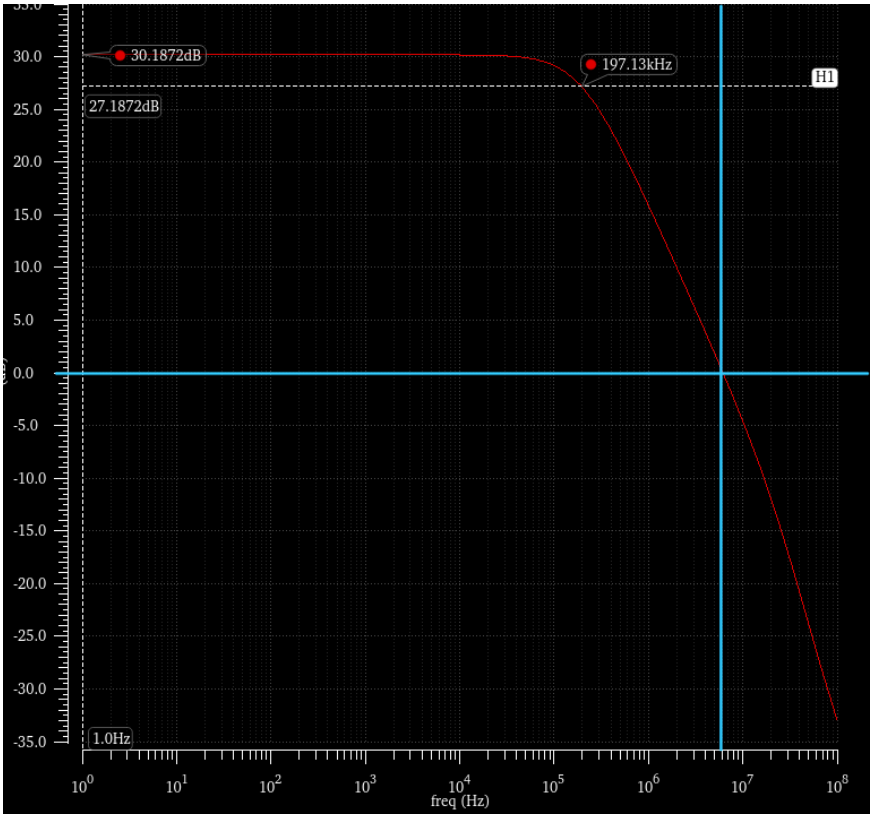


Fig. 10: Risposta in frequenza – ampiezza

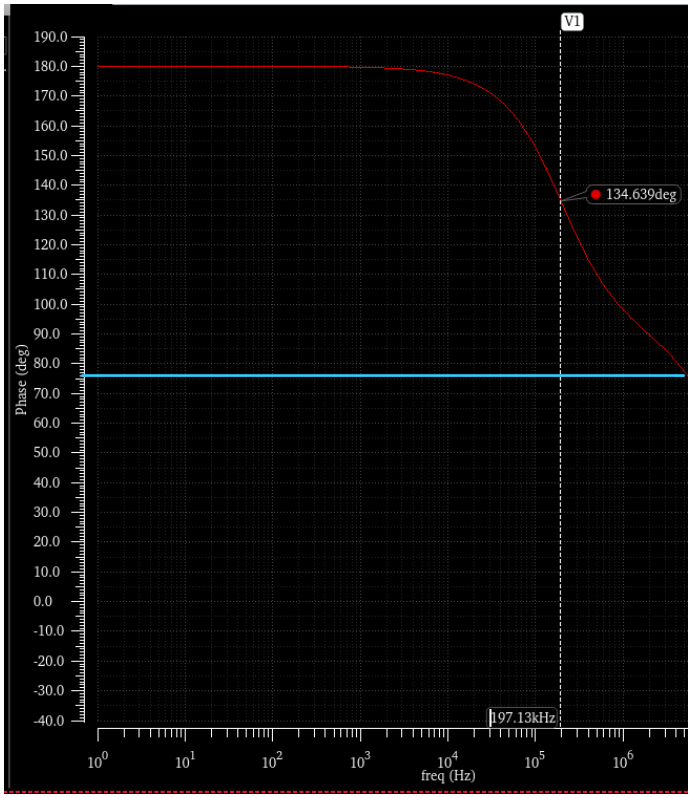


Fig. 11: Risposta in frequenza - fase

Conclusioni

Tutti i parametri di progetto sono stati soddisfatti e si riportano i valori misurati nella simulazione.

	Requirement	*Measured*	*Pass*
Power consumption	$\leq 100\ \mu W$	$95.04\ \mu W$	
Gain	$\geq 30\ dB$	$30.55\ dB$	
Gain bandwidth	$\geq 5\ MHz$	$6.64\ MHz$	
Phase margin	$\geq 60°$	$105°$	