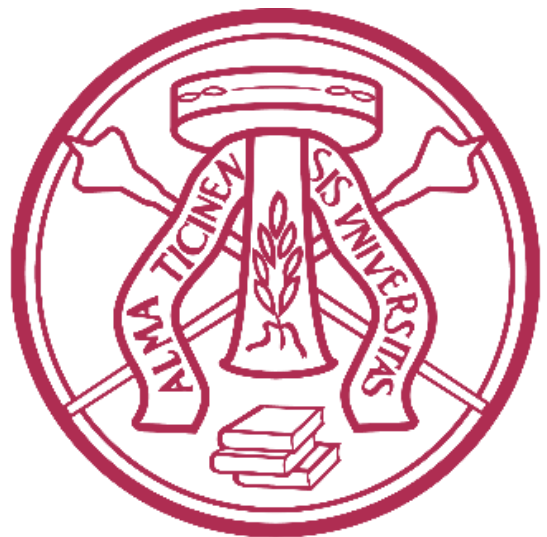




UNIVERSITÀ
DI PAVIA

Corso di Elettronica II – Modulo B

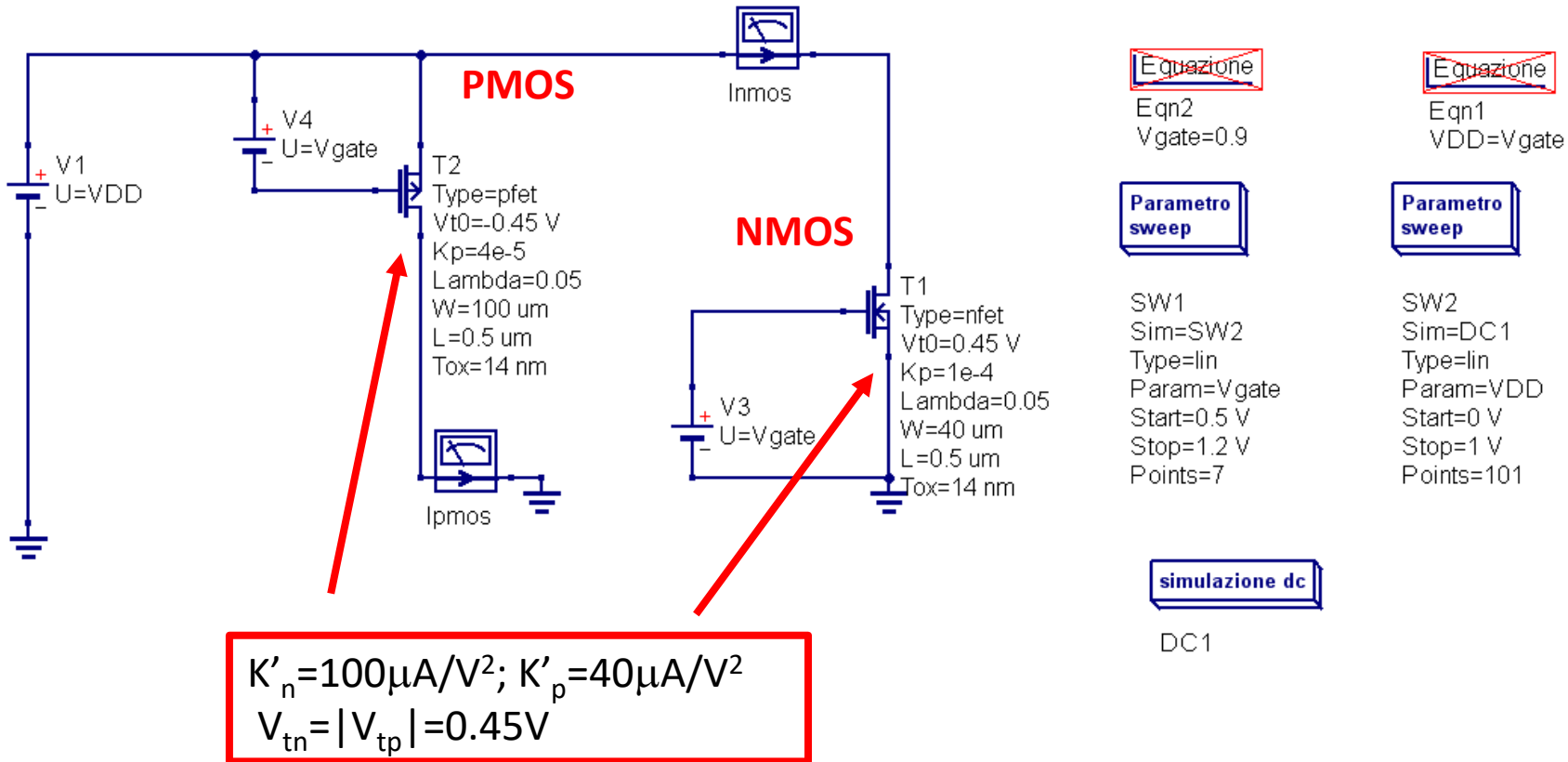
*Attività di Laboratorio:
Amplificatori Operazionali
CMOS*

*Prof. D. Manstretta
AA 2024-25*

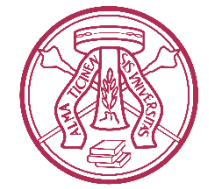
- LAB1: Progettazione assistita dal calcolatore di un amplificatore operazione CMOS a due stadi (esperienza guidata)
 - Caratteristiche tensione-corrente dei MOSFET e parametri dei modelli
 - Definizione degli obiettivi di progetto
 - Disegno del circuito e dimensionamento dei transistori
 - Simulazioni delle principali caratteristiche
- LAB2: Progettazione assistita dal calcolatore di un amplificatore operazione CMOS folded-cascode (facoltativa)
 - Definizione degli obiettivi di progetto
 - Disegno del circuito e dimensionamento dei transistori
 - Simulazione delle principali caratteristiche

- Scaricare files:
 - Progetto: DueStadi_prj
 - File Excel: Dimensionamento MOSFET-OA2st
 - Slides in pdf
- Aprire il progetto in QUCS
- Seguire la lezione e riprodurre i risultati al simulatore

Il Transistore MOS: DC

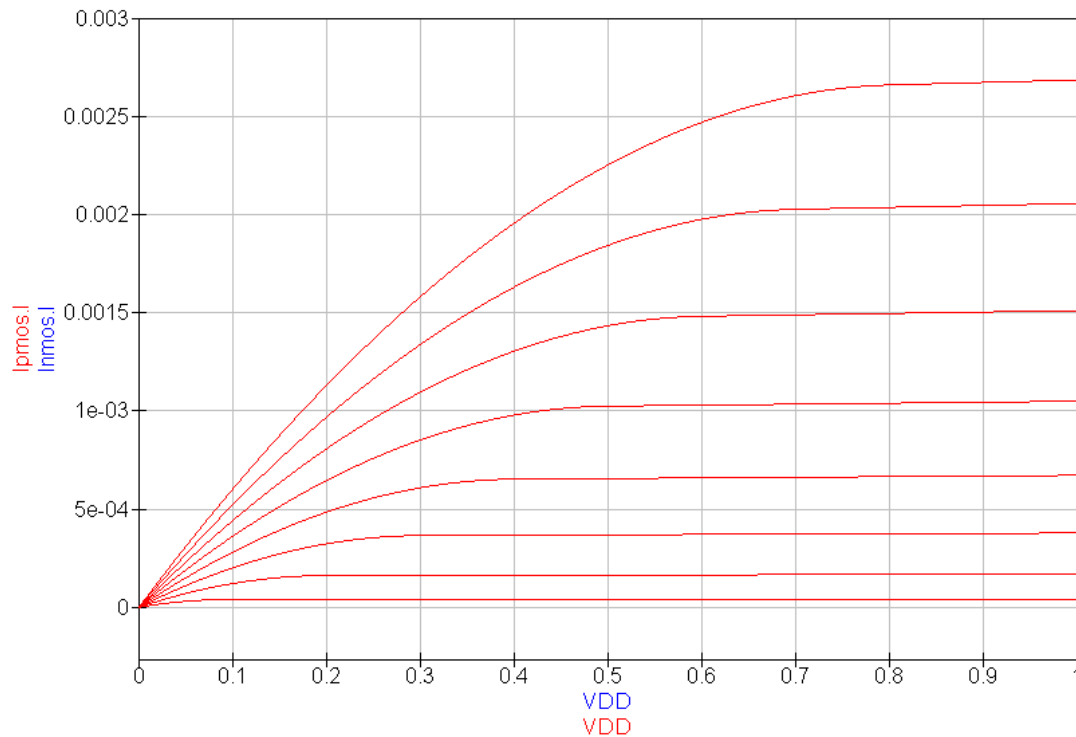


I transistori NMOS (freccia entrante) e PMOS (freccia uscente) si trovano tra i Componenti nella libreria «nonlinear components». Le sonde di corrente permettono di misurare le correnti di drain dei transistori e si trovano nella libreria «probes». La scansione di due parametri (VGS e VDS) attraverso i blocchi SW1 e SW2 consente di tracciare la caratteristica Id-Vds per diverse Vgs. Il blocco «sweep» si trova nella libreria delle simulazioni.

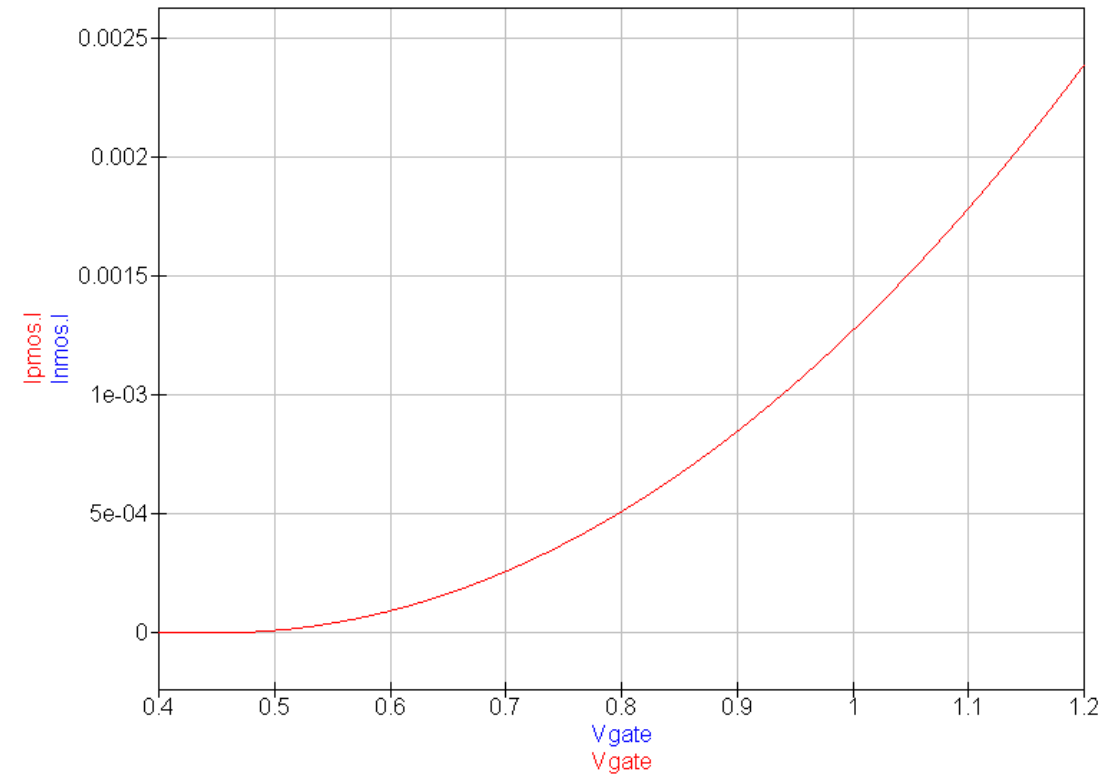


Caratteristiche Tensione-Corrente

I_d vs V_{ds} per diverse V_{gs}



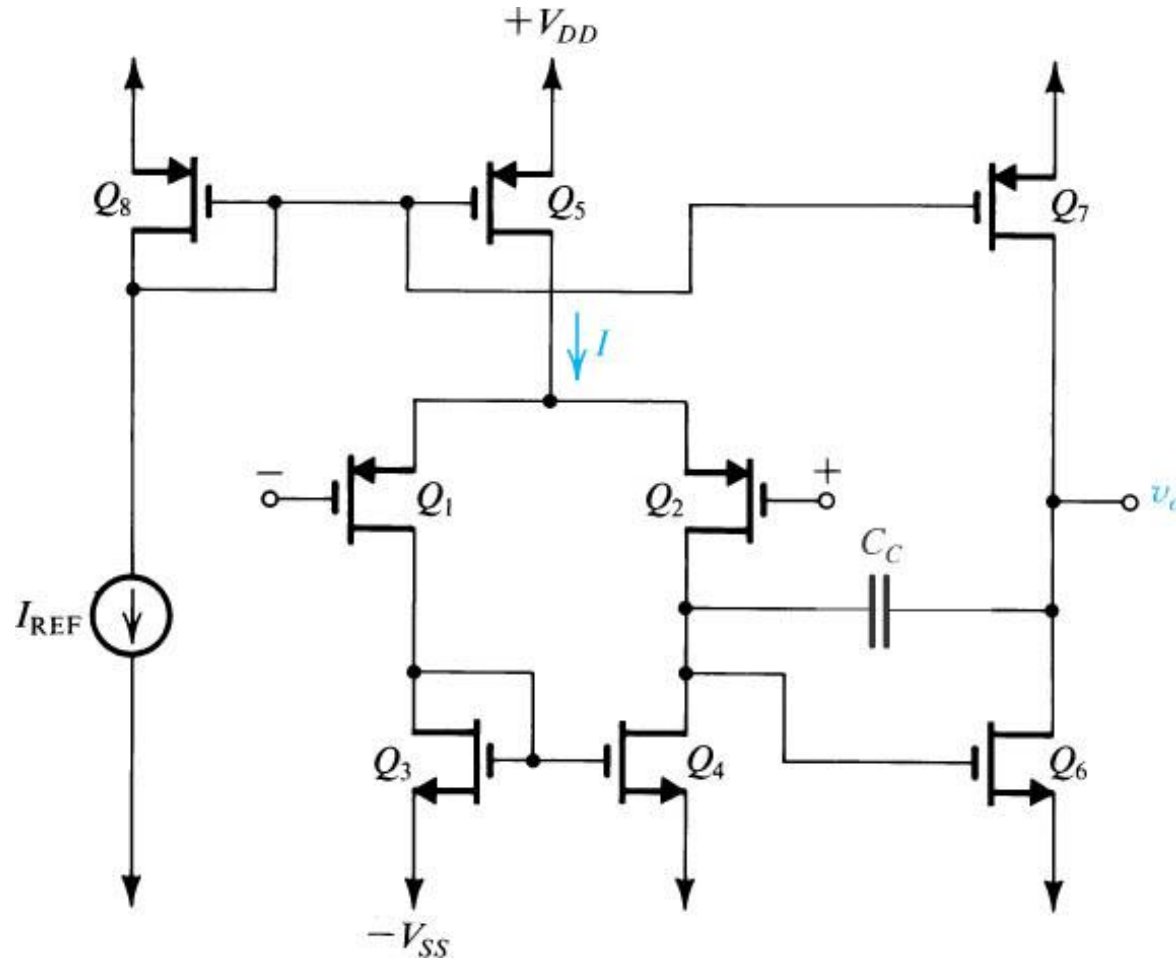
I_d vs V_{gs} per $V_{ds}=V_{ov}$



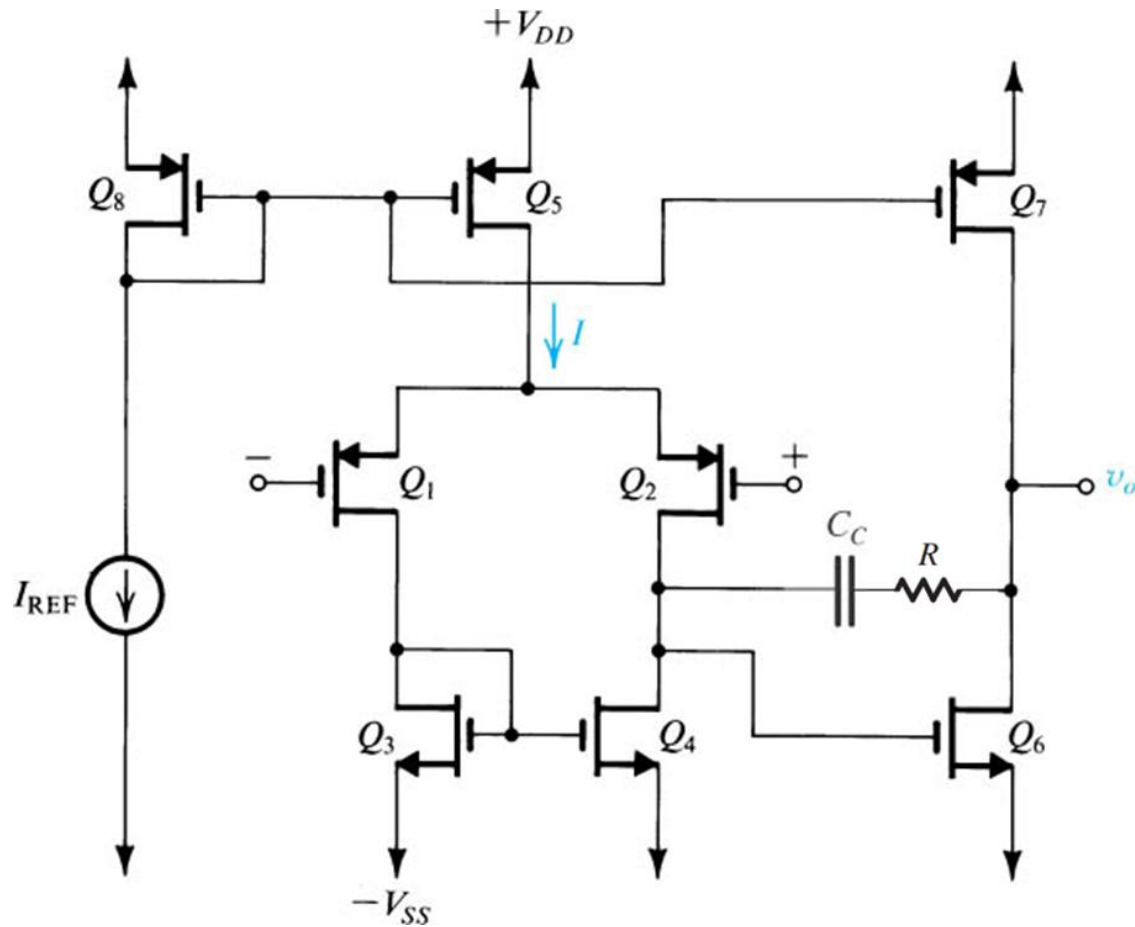
Corrente in saturazione
$$I = \frac{1}{2} k'_{n/p} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$



- Capacità di carico $C_L=2\text{pF}$
- Banda unitaria $f_t=100\text{MHz}$
- Margine di fase $>70^\circ$
- Slew Rate $>125\text{V}/\mu\text{s}$
- $V_{DD}=V_{SS}=2.5\text{V}$
- $K'_n=100\mu\text{A}/\text{V}^2$; $K'_p=40\mu\text{A}/\text{V}^2$
- $V_{tn}=|V_{tp}|=0.45\text{V}$



Equazioni di Progetto



- Capacità di carico $C_L = 2\text{pF}$

Equazioni di progetto

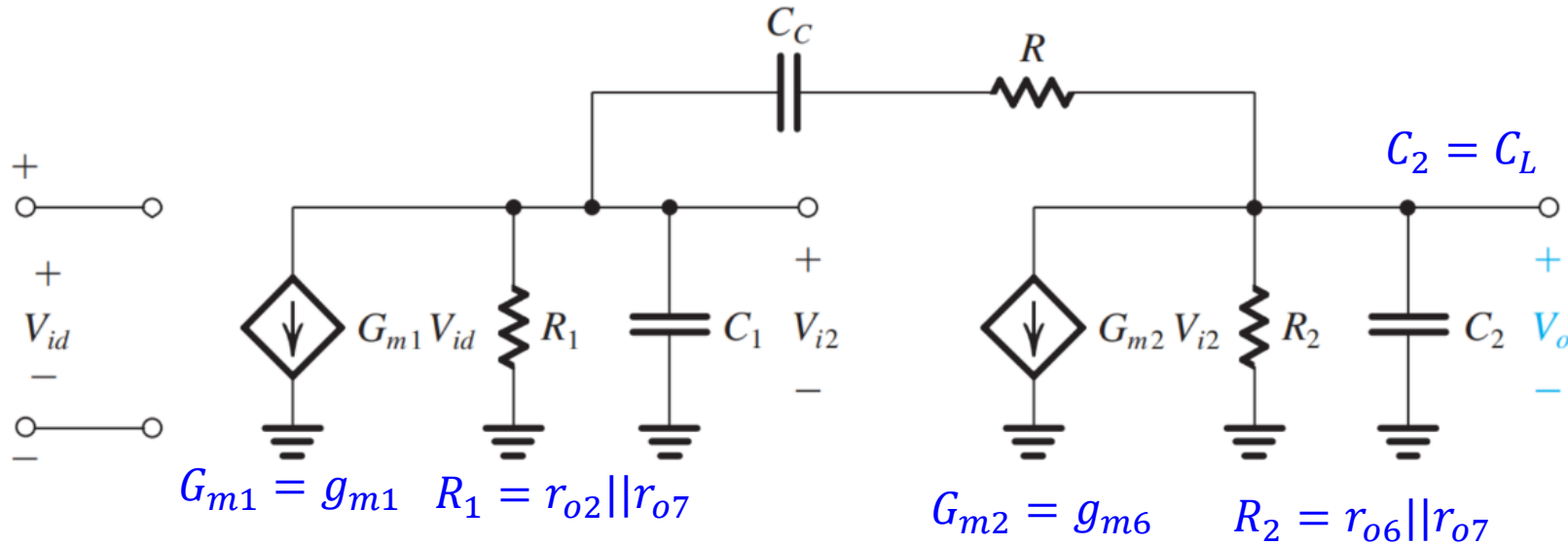
$$\textcircled{1} \quad \omega_t = \frac{g_{m1}}{C_c}$$

$$\textcircled{2} \quad \omega_{p2} = \frac{g_{m6}}{C_L}$$

$$\textcircled{3} \quad \omega_z = \frac{1}{C_c(1/g_{m6} - R)}$$

$$\textcircled{4} \quad SR = \omega_t V_{OV1}$$

Dimensionamento dell'OpAmp



Equazioni di progetto

$$\textcircled{1} \quad \omega_t = \frac{g_{m1}}{C_c}$$

$$\textcircled{2} \quad \omega_{p2} = \frac{g_{m6}}{C_L}$$

$$\textcircled{3} \quad \omega_z = \frac{1}{C_c(1/g_{m6} - R)}$$

$$\textcircled{4} \quad SR = \omega_t V_{OV1}$$

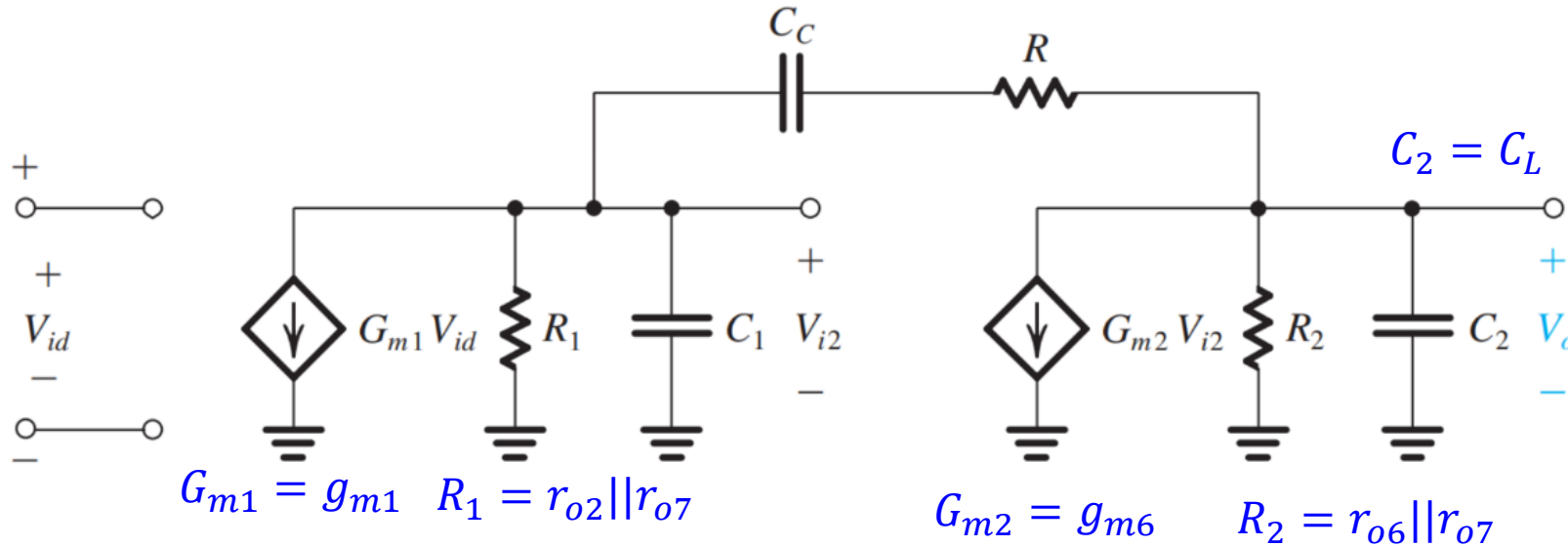
$$PM = 90^\circ - \text{atan}\left(\frac{\omega_t}{\omega_{p2}}\right) - \text{atan}\left(\frac{\omega_t}{\omega_z}\right)$$

Per ottenere un $PM > 70^\circ$, scegliamo $f_z = \infty$ e $f_{p2} = 4f_t$. $\longrightarrow PM = 90^\circ - \text{atan}\left(\frac{1}{4}\right) = 76^\circ$

$$\textcircled{3} \quad R = 1/g_{m6}$$

$$\textcircled{2} \quad g_{m6} = \omega_{p2} C_L = 4\omega_t C_L = 8\pi 10^8 \times 2 \cdot 10^{-12} \cong 5 \text{ mA/V}$$

Dimensionamento dell'OpAmp



Equazioni di progetto

$$\textcircled{1} \quad \omega_t = \frac{g_{m1}}{C_c}$$

$$\textcircled{2} \quad \omega_{p2} = \frac{g_{m6}}{C_L}$$

$$\textcircled{3} \quad \omega_z = \frac{1}{C_c(1/g_{m6} - R)}$$

$$\textcircled{4} \quad SR = \omega_t V_{OV1}$$

$$\textcircled{4} \quad V_{OV1} = \frac{SR}{\omega_t} = \frac{125 \times 10^6 V/s}{2\pi 10^8 Hz} \cong 0.2V$$

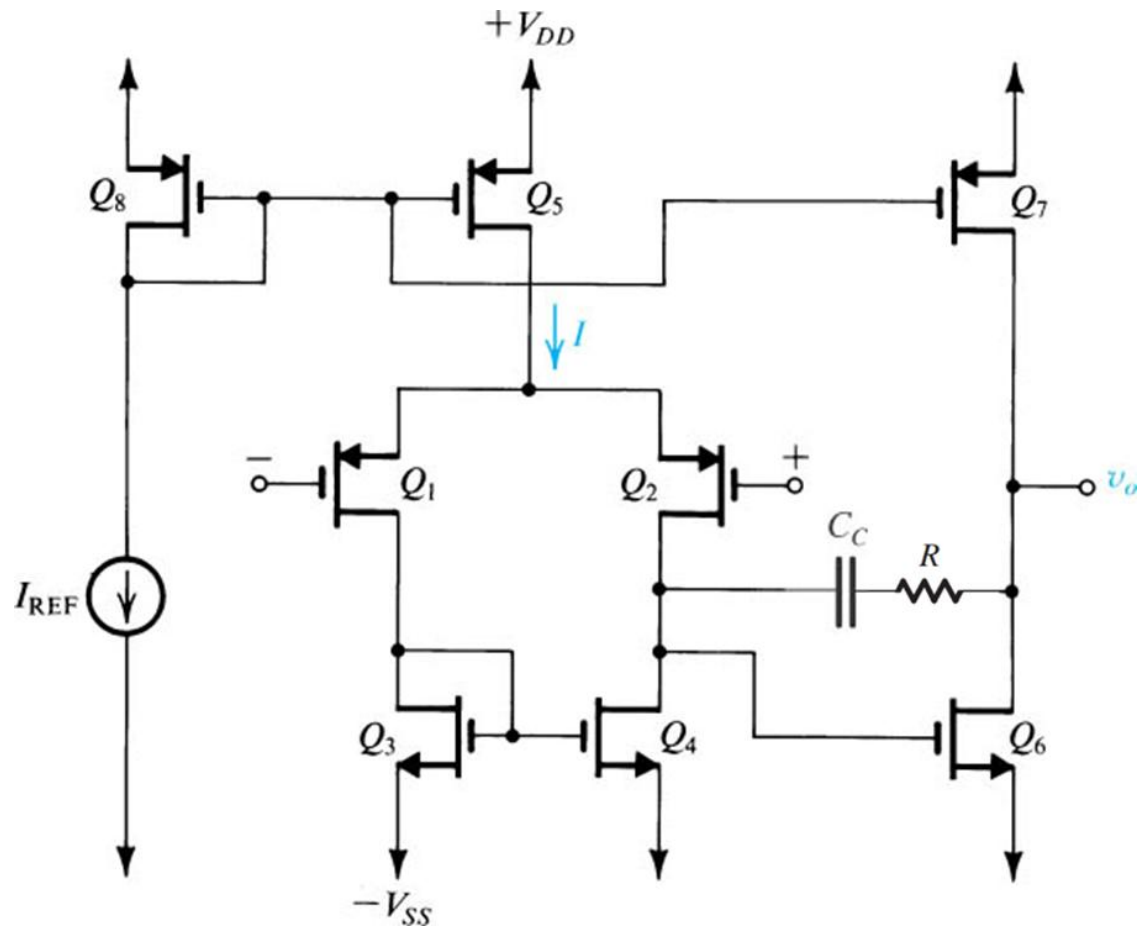
Scegliamo $g_{m1} = 1mS$. Allora:

$$g_{m1} = \frac{I}{V_{OV1}} \longrightarrow I = g_{m1} V_{OV1} = 200\mu A$$

$$\textcircled{1} \quad C_c = \frac{g_{m1}}{\omega_t} = \frac{1mS}{2\pi 10^8 Hz} \cong 1.6pF$$

NOTA. La scelta di g_{m1} è dettata in generale da diverse esigenze. Prima fra tutte il rumore dell'OpAmp, ma anche lo slew rate, come vedremo nelle simulazioni seguenti.

Dimensionamento dei Transistori



$$I = 200\mu A$$

$$g_{m1} = 1mA/V$$

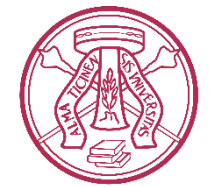
- Per semplicità, scegliamo lo stesso overdrive per tutti i transistori: $V_{ov}=0.2V$

$$g_{m6} = 5mA/V$$

$$I = 500\mu A$$

$$R = 1/g_{m6} = 200\Omega$$

$$C_C = 1.6pF$$



Dimensionamento dei Transistori

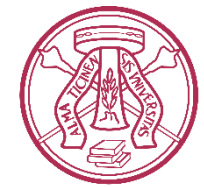
Foglio Excel

	tipo	PMOS T1	PMOS T2	NMOS T3	NMOS T4	PMOS T5	NMOS T6	PMOS T7	PMOS T8
Input	K'n/p [A/V ²]	4,00E-05	4,00E-05	1,00E-04	1,00E-04	4,00E-05	1,00E-04	4,00E-05	4,00E-05
Input	ID [A]	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	2,00E-04	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Input	W [um]	62,5	62,5	25	25	125	1	1	1
Input	L [um]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Valore calcolato	W/L	125	125	50	50	250	2	2	2
Valore calcolato	Vov [V]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	100	158,1139	158,113883
Input	VA [V]	20	20	20	20	20	20	20	20
Valore calcolato	Lamba (1/VA)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Valore calcolato	gm [A/V]	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	2,00E-03	2,00E-02	1,26E-02	1,26E-02
Valore calcolato	ro [Ohm]	2,00E+05	2,00E+05	2,00E+05	2,00E+05	1,00E+05	2,00E+01	2,00E+01	2,00E+01
Input	tox [m]	1,40E-08	1,40E-08	1,40E-08	1,40E-08	1,40E-08	1,40E-08	1,40E-08	1,40E-08
Costante	E ox [F/m]	3,4515E-11	3,45E-11	3,45E-11	3,4515E-11	3,45E-11	3,45E-11	3,45E-11	3,4515E-11
Costante	Cox [F/um ²]	2,47E-15	2,47E-15	2,47E-15	2,47E-15	2,47E-15	2,47E-15	2,47E-15	2,47E-15
Valore calcolato	Cgs [F]	5,14E-14	5,14E-14	2,05E-14	2,05E-14	1,03E-13	8,22E-16	8,22E-16	8,22E-16
Valore calcolato	fp' [Hz]			fp'1=	1,94E+09	fp'2=	7,96E+09		
Valore calcolato	Cap [F]	Cc	1,60E-12			CL	2,00E-12		
Valore calcolato		ft [Hz]	9,95E+07			fp2 [Hz]	1,59E+09		
Valore calcolato		SR [V/s]	1,25E+08						

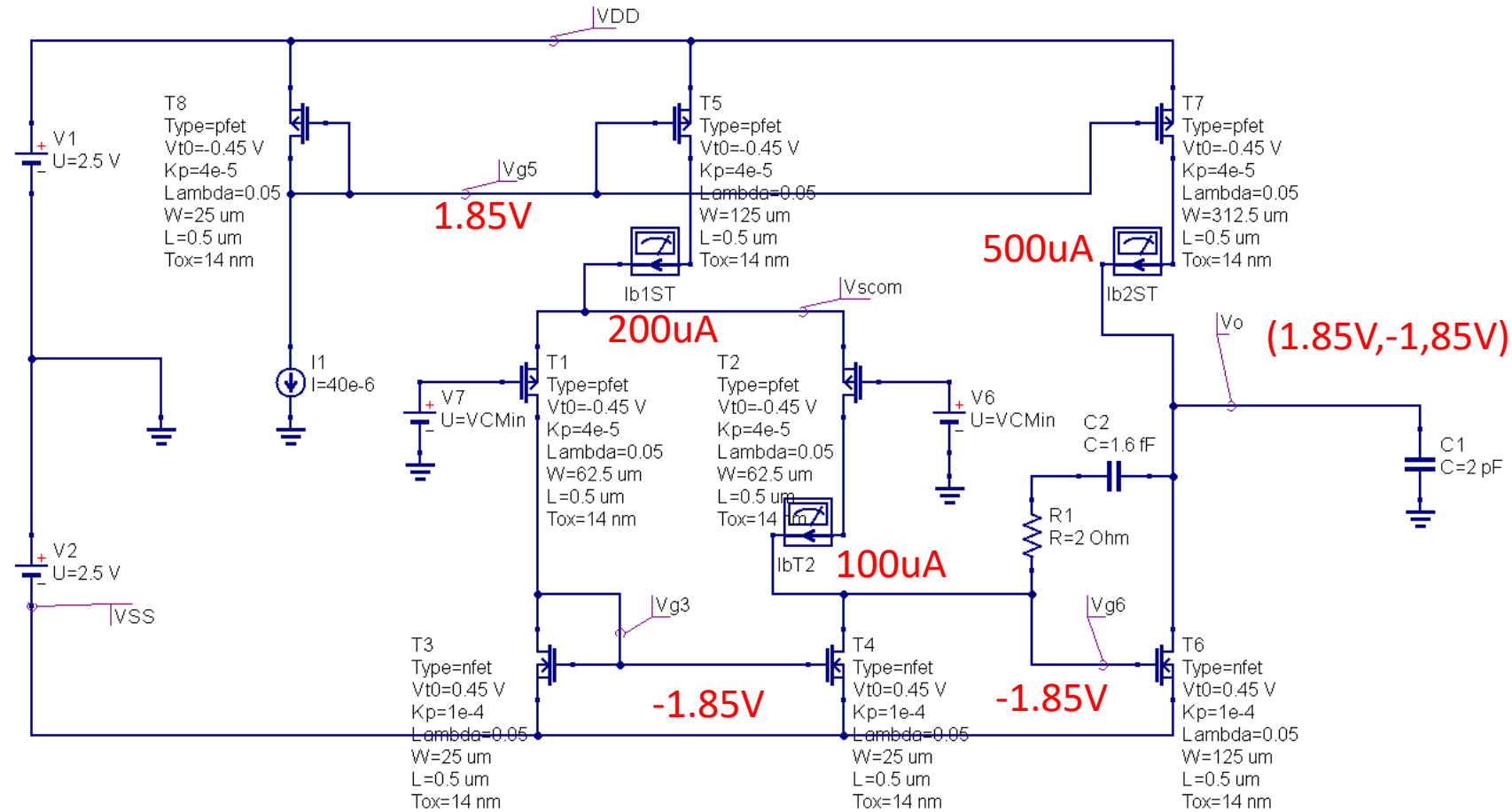
Corrente in saturazione

$$I = \frac{1}{2} k'_{n/p} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

- Per semplicità, scegliamo lo stesso overdrive per tutti i transistori: $V_{OV}=0.2V$
- Fissiamo $L=0.5\mu m$ e $\lambda=1/20V$ per tutti i transistori.
- Possiamo utilizzare un foglio Excel, incluso nel pacchetto scaricato, per aiutarci a determinare le W dei transistori.
- **Nota.** Le caratteristiche di ciascun transistore (k , V_t , W , L , λ) devono essere **impostate a mano**. I valori di W/L , V_{ov} , g_m , r_o vengono calcolati automaticamente dal foglio Excel.
- **Si consiglia di non modificare i valori di k e V_t .**
- **NOTA.** Le equazioni del foglio Excel hanno il solo scopo di aiutare a determinare W e non tengono conto dell'effetto Early, quindi in simulazione ci saranno dei piccoli scostamenti.



Verifica del Punto Operativo DC



Guadagno di Modo Comune DC

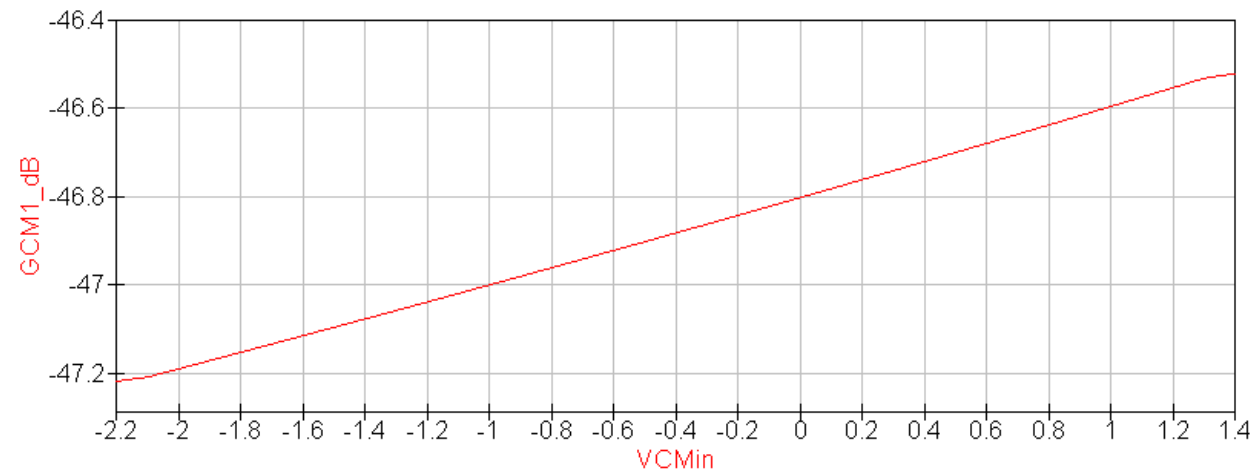
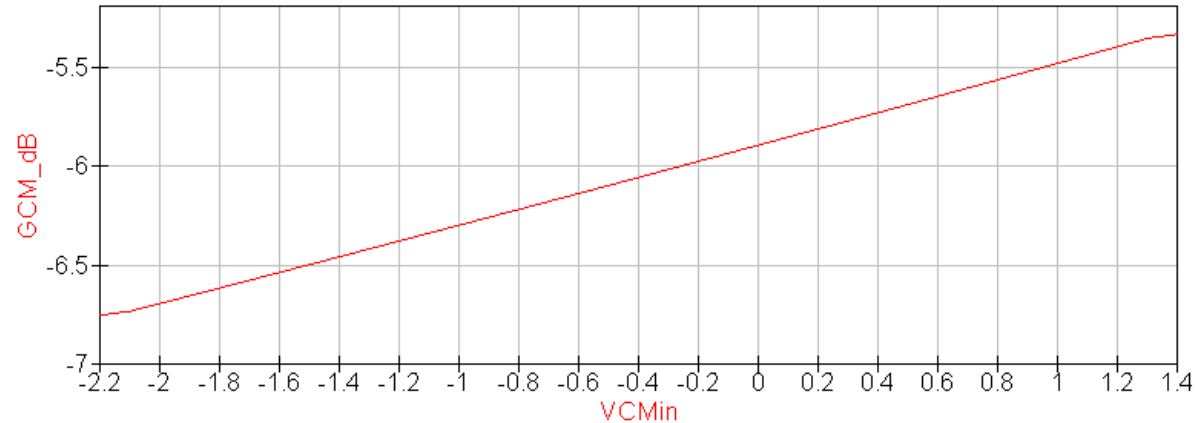
Facendo una scansione della tensione di modo comune in ingresso e valutando le variazioni della tensione d'uscita, calcoliamo il guadagno di modo comune in DC.

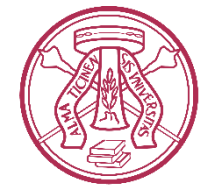
Parametro sweep

SW1
Sim=DC1
Type=lin
Param=VCMIn
Start=-2.2
Stop=1.4
Points=37

Equazione

Eqn1
 $GCM = \text{diff}(V_o, V, VCMIn)$
 $GCM_dB = \text{dB}(GCM)$
 $GCM1 = \text{diff}(V_{g6}, V, VCMIn)$
 $GCM1_dB = \text{dB}(GCM1)$





Risposta in Frequenza

Guadagno AC senza Cc

Equazione

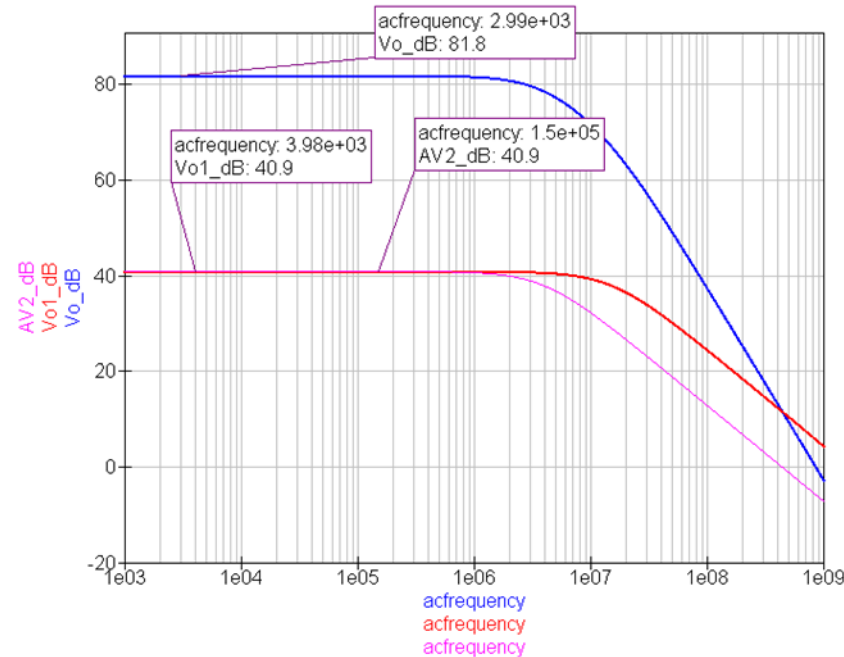
```
Eqn3
Vo_dB=dB(Vo.v)
Vo_deg=phase(Vo.v)
Vo_dB_max=max(dB(Vo.v))
fp_dom=xvalue(Vo_dB,Vo_dB_max-3)
```

Equazione

```
Eqn5
ft=xvalue(Vo_dB,0)
PM=yvalue(Vo_deg,ft)
```

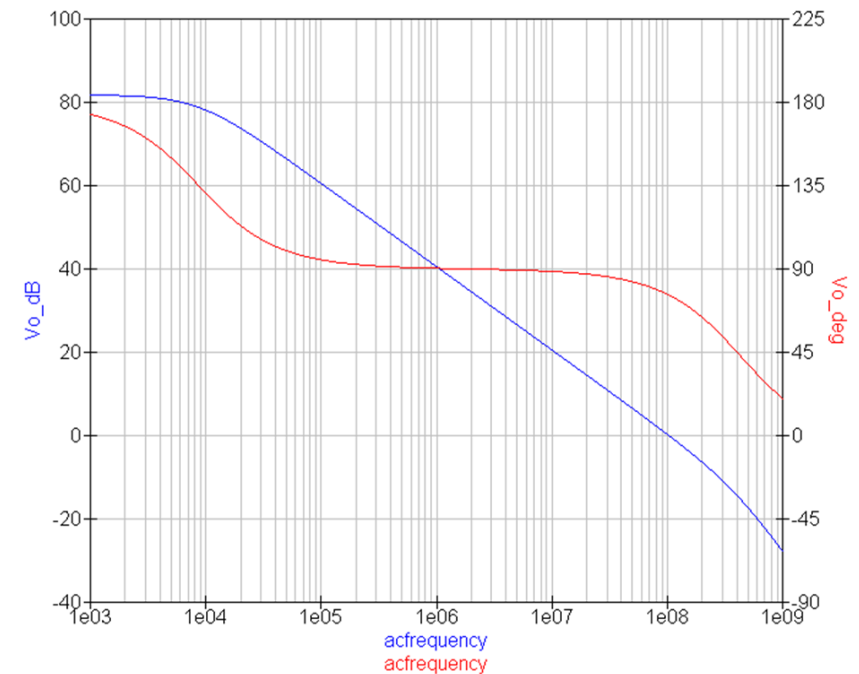
Equazione

```
Eqn4
Vo1_dB=dB(Vg6.v)
AV1_DC=max(Vo1_dB)
fp1=xvalue(Vo1_dB,AV1_DC-3)
AV2_dB=dB(Vo.v)-dB(Vg6.v)
AV2_DC=max(AV2_dB)
fp2=xvalue(AV2_dB,AV2_DC-3)
```



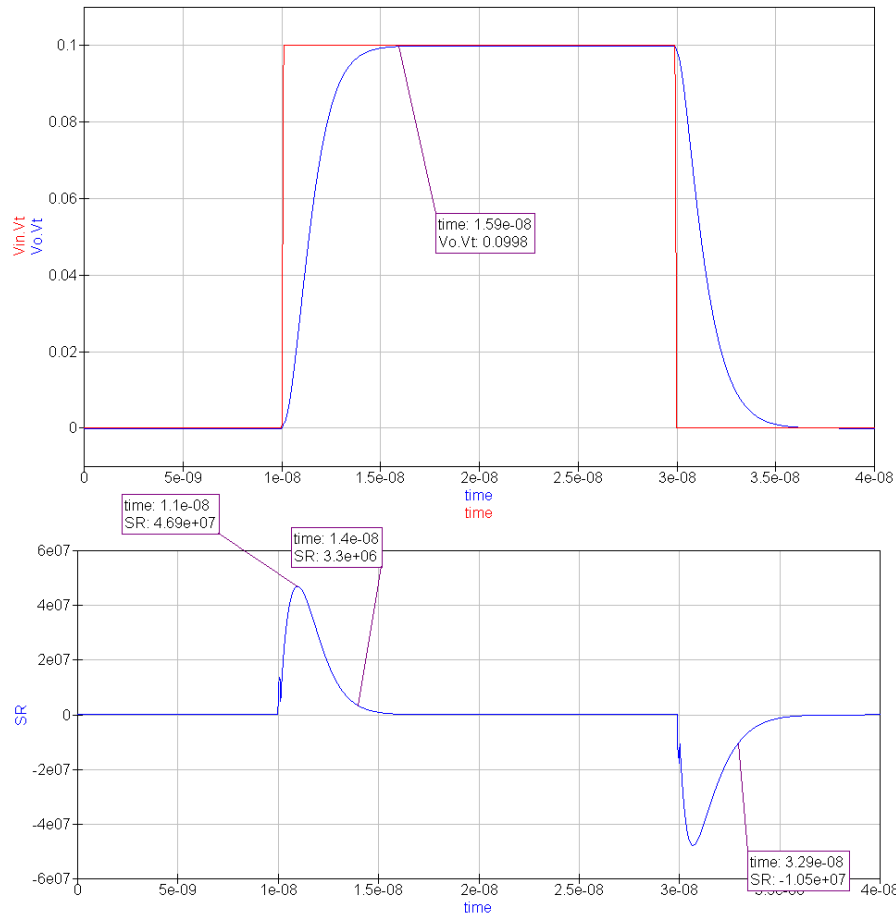
Guadagno AC con Cc

number	ft	PM	AV1_DC	fp1	AV2_DC	fp2
1	1.06e+08	75.5	40.8	8.91e+03	40.9	2.24e+06

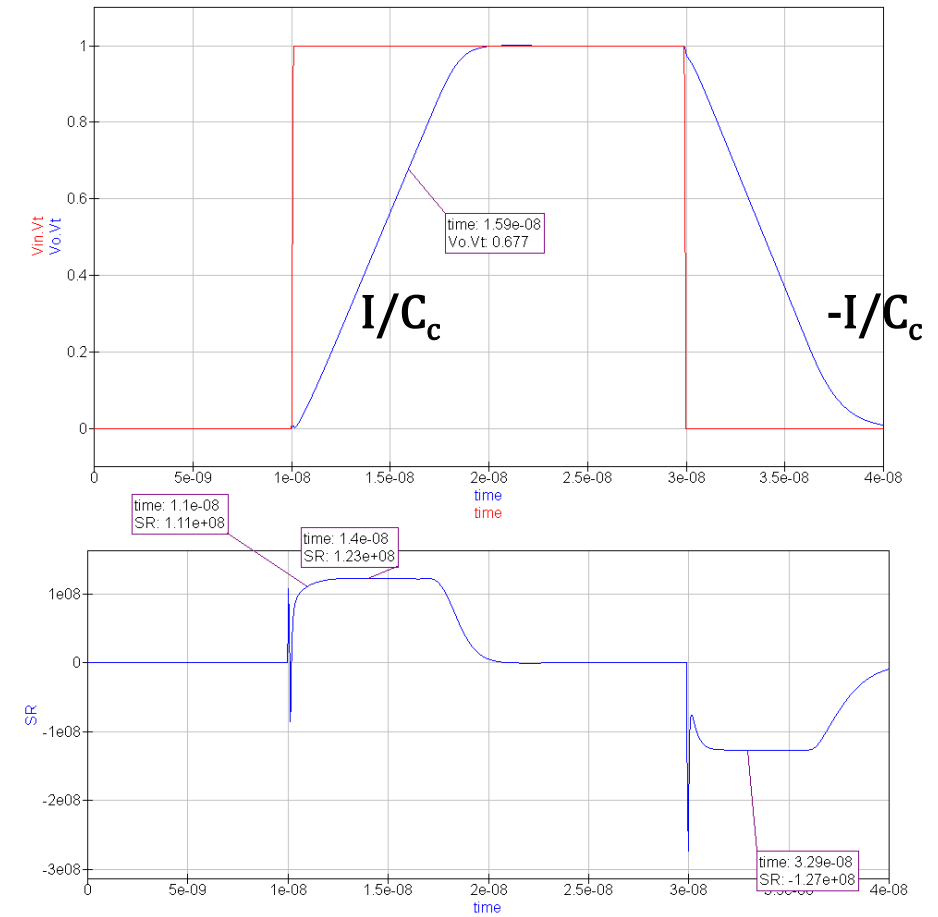


Risposta al Gradino

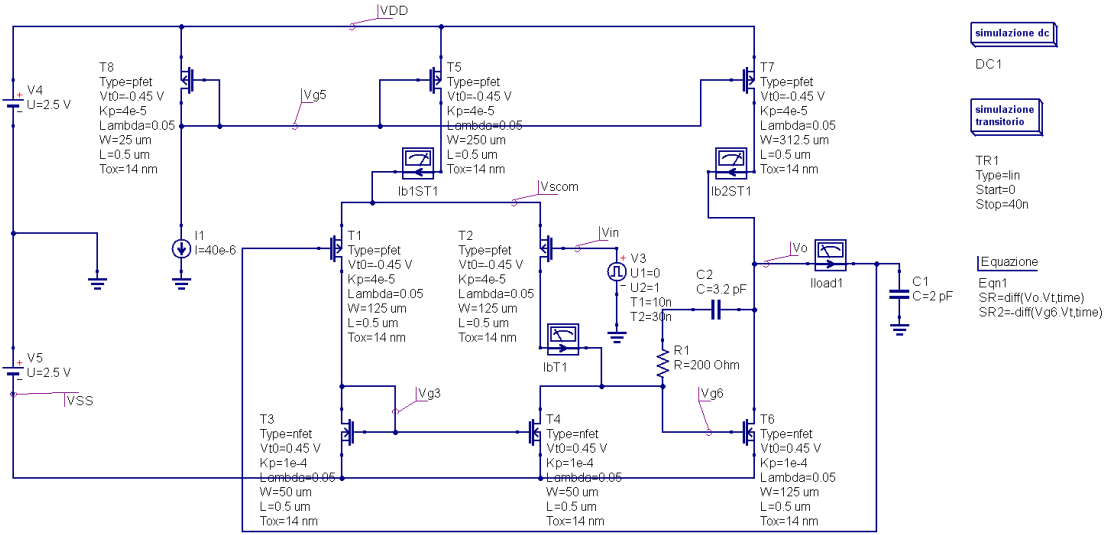
Settling Lineare



Slewing



Slewing Asimmetrico

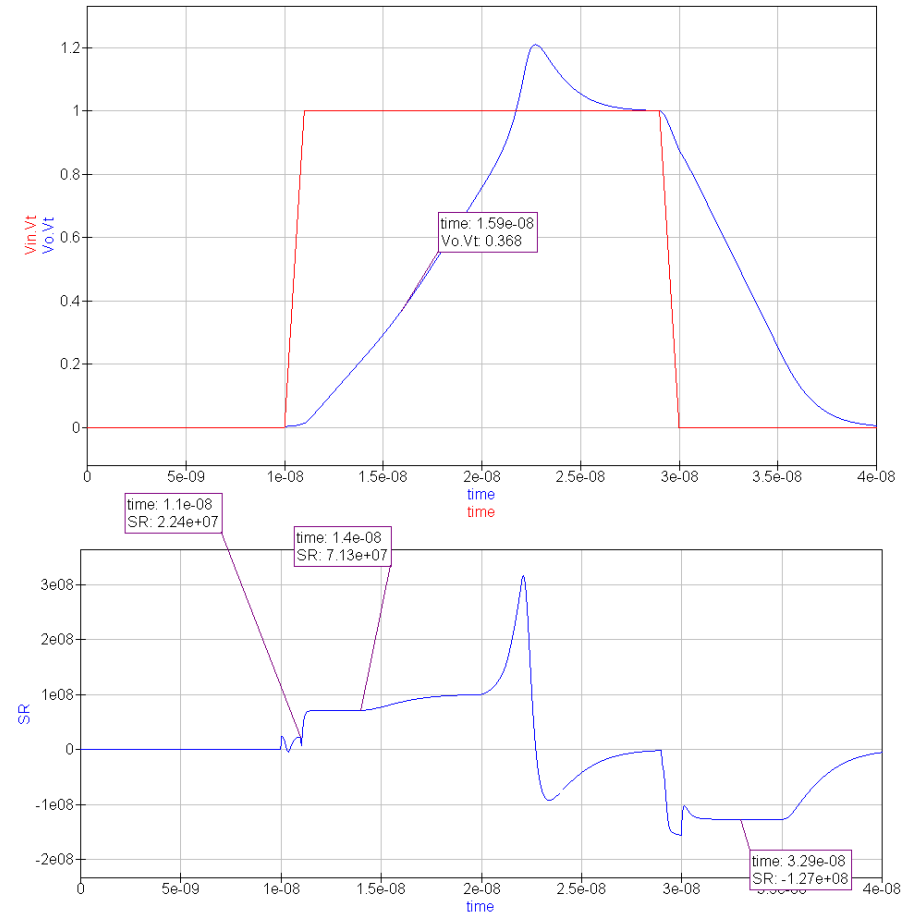


Quando C_c è troppo grande, I_7 non riesce a caricare C_c e C_L insieme.

Regola aggiuntiva di progetto:

$$\frac{I_7}{C_L + C_C} > \frac{I}{C_C}$$

Questa regola è rispettata nel design originale ma non nel re-design, che infatti ha slewing più lento sul fronte di salita.





UNIVERSITÀ
DI PAVIA