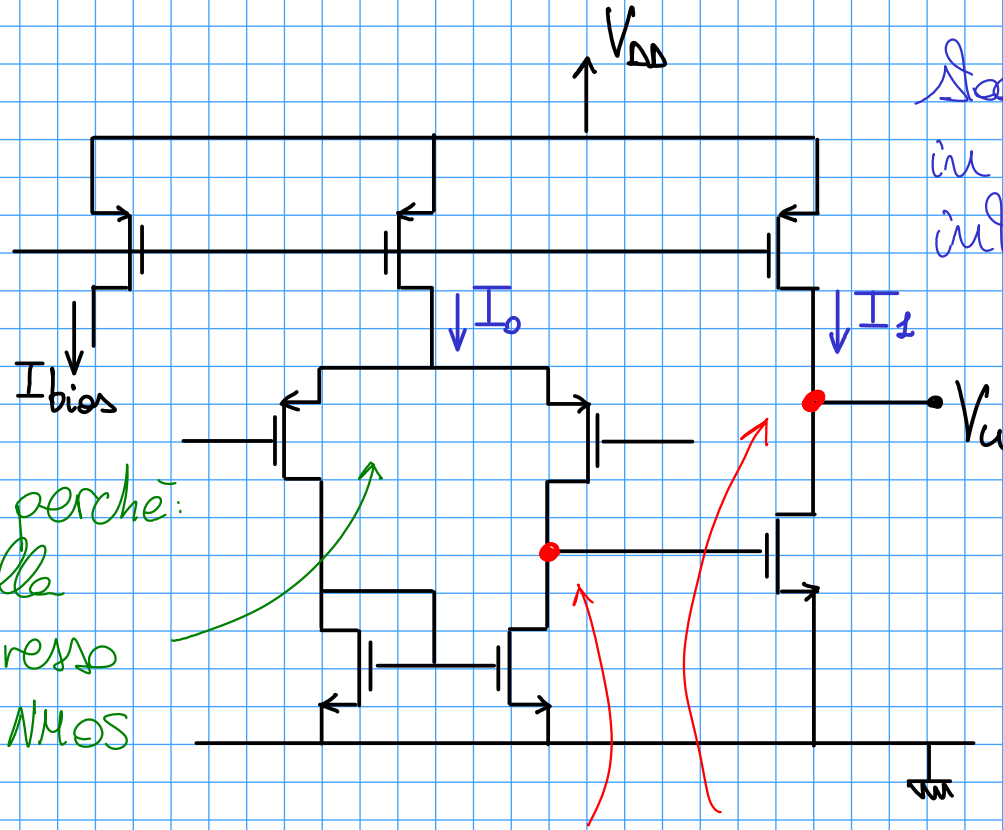


Progettare un amplificatore operazionale

27 OT

partiamo da una topologia e ne studiamo il dimensionamento
→ ampli a 2 stadi in classe A



Stadio di uscita
in classe A,
introduce amplificazione

si usa coppia PMOS perché:
→ include GND nella
dinamica di ingresso
→ minor flicker Vs NMOS

presente due nodi ad alta impedenza, che
associati alle capacità parassite, è probabile
che introducano poli a bassa frequenza

$$f_p = \frac{1}{2\pi R C_p}$$

trascurando interazioni tra le C_p

ogni stadio di
amplificazione
introduce un
polo a bassa freqⁿ

"ogni stadio di amplificazione introduce un polo a bassa frequenza"

2 stadi \rightarrow avrò sicuramente 2 poli a bassa frequenza
 \rightarrow pericolo se fase raggiunge π mentre
guadagno di quello è ancora maggiore di uno

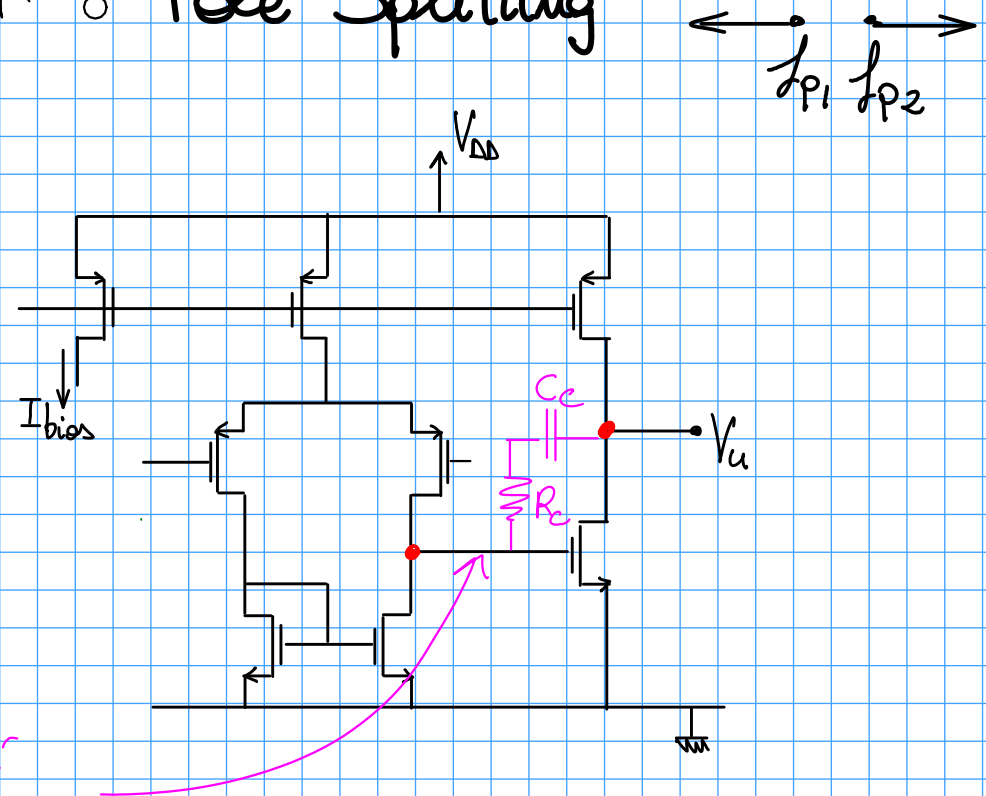
3 stadi \rightarrow 3 poli a bassa frequenza
 \rightarrow ancora una volta deve essere verificato
il margine di fase ϕ_M

Soluzione: Compensazione di Miller o Pole Splitting

sposto polo in ingresso in
basso e/o il polo superiore
in alto

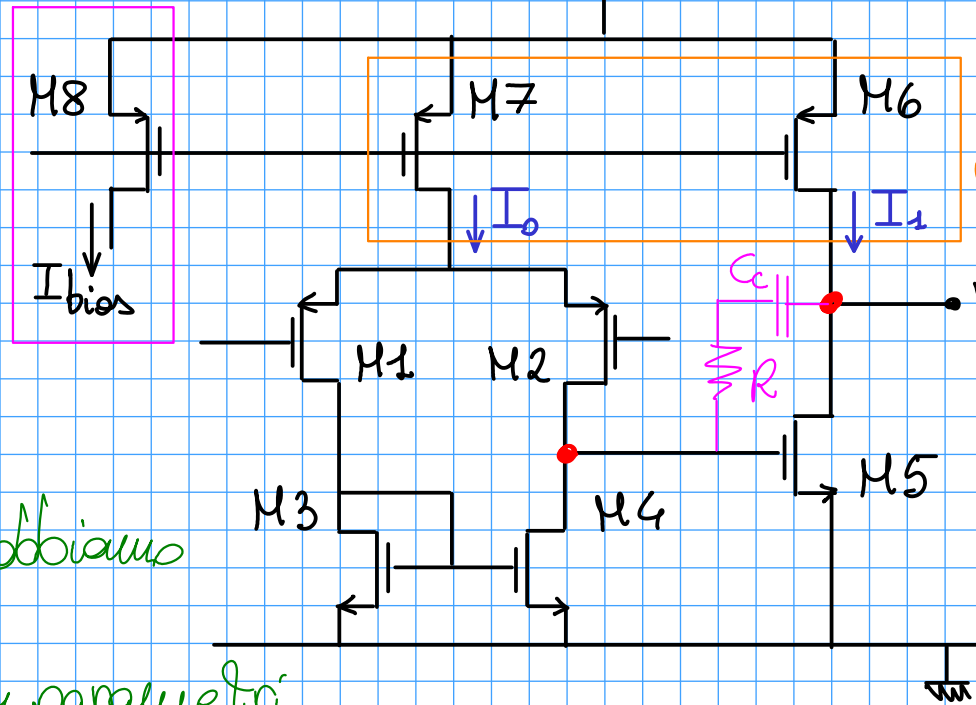
(ci si riconduce ad
una situazione di
polo dominante

rete di compensazione in
un amplificatore a 2 stadi



Dimensionamento dispositivi

specchio sulla I_{bias} , che può essere condivisa tra i diversi dispositivi on-chip



generatori di corrente per la polarizzazione

per ogni MOS dobbiamo definire W, L

\neq MOS \rightarrow 14 parametri
+ correnti I_0, I_1
+ R e C_c

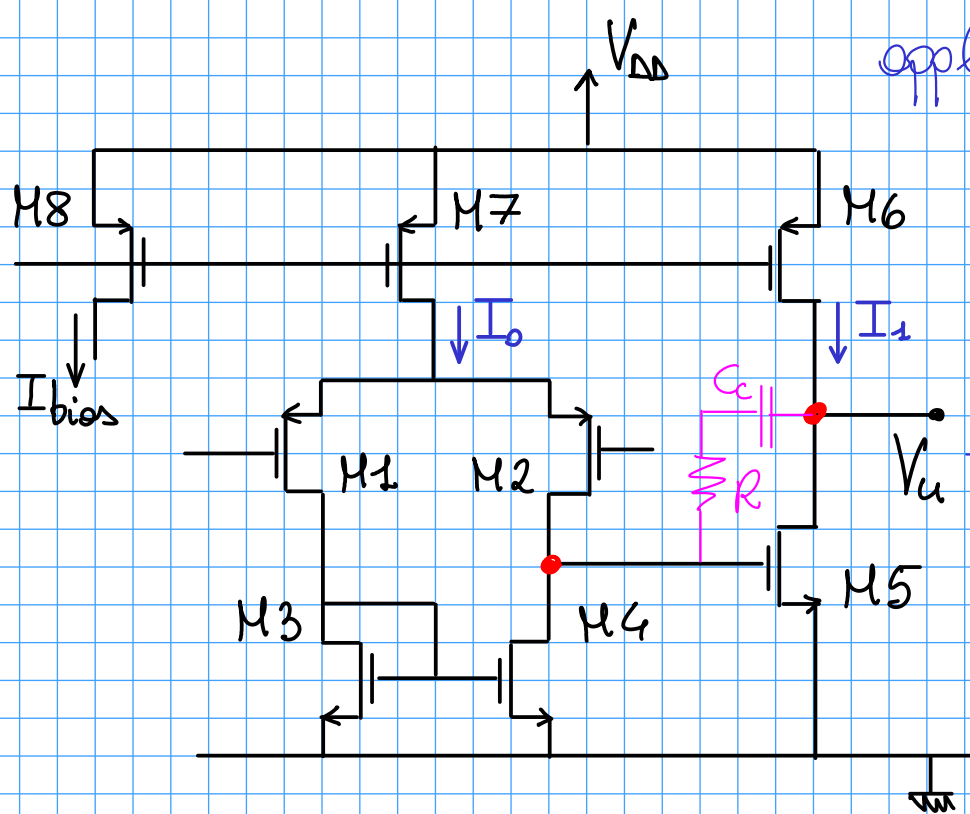
17 parametri, gradi di libertà, degrees of freedom DOF

esistono dei programmi di sintesi automatica, con l'obiettivo di ridurre il sistema su un certo numero di parametri, sfruttando:

- \rightarrow vincoli di uguaglianza (ad esempio per le coppie di ingresso)
- \rightarrow vincoli di disuguaglianza (specifiche su rumore ed errore)

applico simmetrie circuiti

280T



→ per quanto riguarda i MOS abbiamo $M1(-M2), M3(=M4), M5, M6, M7$ e per ognuno dobbiamo valutare W e L

→ solo per il comportamento dinamico dobbiamo dimensionare I_0 (I_1 dipende da $M7$), R e C_c di compensazione

DOF indipendenti 13

tra i primi 10 DOF devo imporre un primo vincolo → offset sistematico nullo

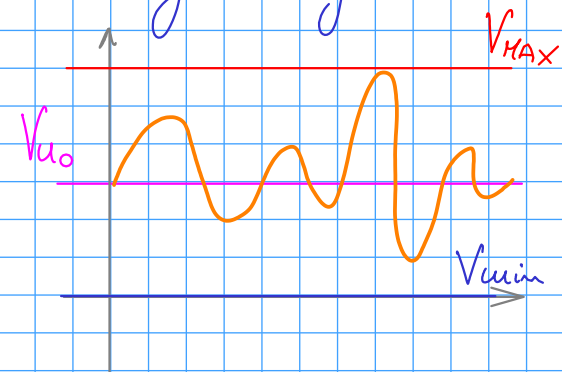
$V_u = A(V_d - V_{io})$ offset sarebbe la tensione da applicare agli ingressi V_d affinché si abbia uscita nulla

→ risolto il problema richiedendo $V_u(V_d=0) = V_{u0}$

non richiedo tensione nulla in uscita, ma un livello di riposo, utile per:

→ polarizzazione degli stadi successivi

→ fissato al centro della dinamica realizza simmetria



prevediamo come V_{u0} il punto intermedio della dinamica di uscita

progetto l'amplificatore
è in uscita d'ingresso

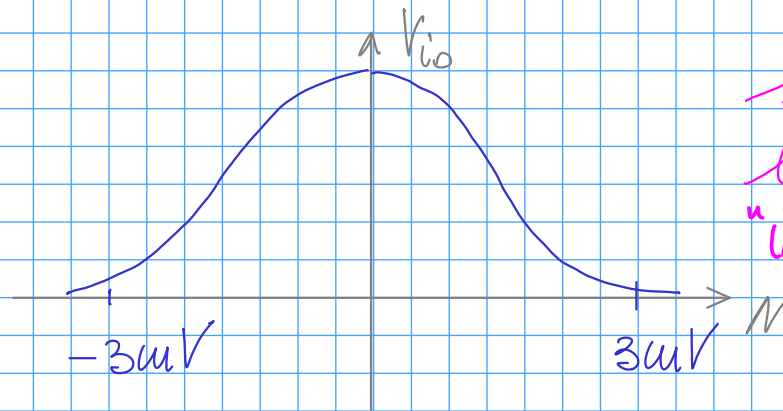
$$V_u(V_d=0) = \frac{V_{DD}}{2} - 1V \rightarrow \text{offset di } -1V$$

$$A \sim 100.000$$

in termini di offset
in ingresso

$$\rightarrow V_{i0} = \left| \frac{V_u}{A} \right| \approx \left| \frac{V_u}{g_m^2 r_d^2} \right| \approx 100 \mu V$$

con l'ottica di produrre il
chip devo prevedere una certa variabilità nei parametri
dovuta ad errori casuali di matching



se l'amplificatore ha un guadagno elevato
l'errore di offset sistemático risulta
"invisibile" rispetto all'errore casuale
purché offset sistemático non sia tale da
sbilanciare il punto di riposo

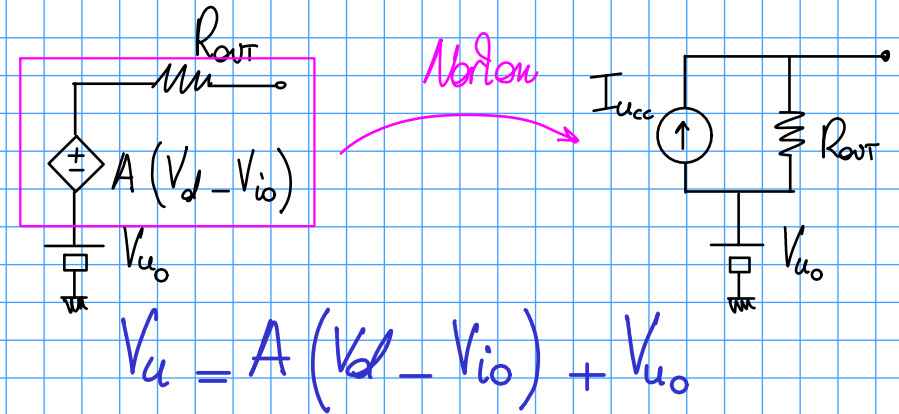
Per concludere

\rightarrow se A molto elevato \rightarrow trascuro effetti dell'errore di offset
sistemático

in pratica si imposta condizione sulla corrente di uscita nulla

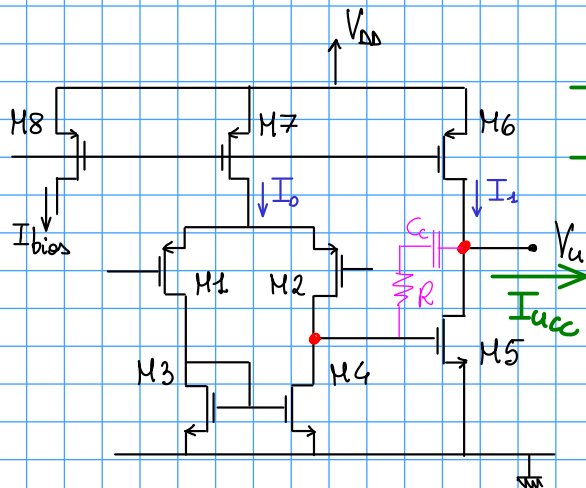
1° vincolo — corrente di uscita nulla
equivalente di Thevenin sull'uscita

$$I_{ucc} = \frac{A(V_d - V_{io})}{R_{out}} = 0$$

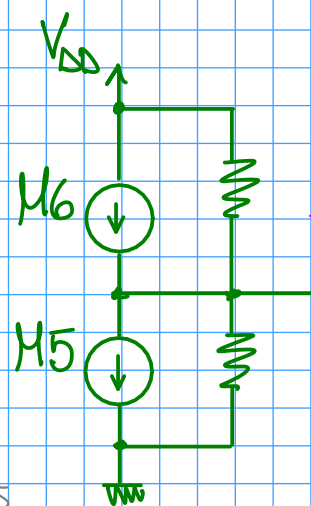
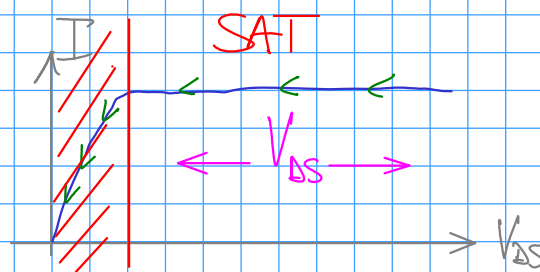


se corrente I_{ucc} non è nulla, in uscita si ha una tensione di offset a causa delle derivate R_{out}

in uscita si fa in modo di mantenere $M5$ e $M6$ in saturazione, quindi una V_{u0} al centro della dinamica



$$I_{ucc} = I_{D6} - I_{D5}$$



eventuali sbilanciamenti
nelle correnti vengono
stabilizzati con una
variazione della V_{ds}
e quindi della V_u !
nesso offset

$$I_{u_{cc}} \Big|_{V_d = \phi} = I_{D6} - I_{D5}$$

M6 e M7 hanno la stessa V_{GS}
(trascurando effetto V_{DS})

$$I_{D6} = I_1 = I_0 \frac{\beta_6}{\beta_7}$$

tensione $V_d = \phi$, sfrutto simmetria
elettrica $V_{D4} = V_{D3} = V_{GS3} = V_{DS4} = V_{GS5}$

possiamo dire che M3 e M5 sono
montati a specchio (solo con $V_d = 0$)

$$I_{D5} = I_{D3} \frac{\beta_5}{\beta_3} = \frac{I_0}{2} \frac{\beta_5}{\beta_3}$$

$$I_{u_{cc}} = \phi \rightarrow I_{D5} = I_{D6} \rightarrow$$

$$\frac{\beta_6}{\beta_7} = \frac{1}{2} \frac{\beta_5}{\beta_3}$$

impone corrente
di uscita nulla

↓
si riflette su offset

nota: visto l'elevato guadagno dell'amplificatore non è possibile
azzerare l'offset ma con quest'ultima condizione si
fa in modo che in uscita abbia un valore "accettabile"

siccome $\beta = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$ → relazione su offset riduce DOF
da 13 a 11 (condizione su un β)

→ alcuni mos si comportano da specchi, ad esempio M7M6 e M3M5
in questo caso una diversa L comporta errore su $V_{GS} - V_t$

2° vincolo — lunghezze L in MOS a specchio

$$L_7 = L_6$$

$$L_5 = L_3$$

precisione specchio a beneficio dell'offset
riduco a 9 DOF

in determinate situazioni è un vincolo "pesante"

3° vincolo — dinamica simmetrica di uscita vincolo progettuale

V_{DD}

$$V_{DSAT6} = V_{GS6} - V_{t6}$$

← sottolineo il modulo perché si tratta di un PMOS

GND

$$V_{DSAT5} = V_{GS5} - V_{t5}$$

$$(V_{GS} - V_t)_6 = (V_{GS} - V_t)_5$$

in questo modo fisso punto di riposo e dinamica di uscita

in termini di DOF → fissando una $V_{GS} - V_t$ in pratica
ho impostato un β , rapporto W/L | riduco a 8 DOF

Restano gli ultimi 8 gradi di libertà, cerco di arrivare ad equazioni semplici e con un legame diretto con una singola performance
quali sono MOS "più importanti"?

M1 (e M2) \rightarrow necessitano di $(W_1, L_1, (V_{GS} - V_t)_1)$

M5 (altro mos che amplifica) $\rightarrow (W_5, L_5, (V_{GS} - V_t)_5)$

poi resta L_6

7 parametri legati alle prestazioni del circuito

sostituisco ai DOF alcuni parametri di progetto dei MOS

Qual è il loro collegamento con i DOF?

$$\rightarrow I_0 = 2I_{D1} = 2 \frac{\beta_1}{2} (V_{GS} - V_t)^2$$

$$\rightarrow I_1 = I_{D5}$$

$$\rightarrow M3: I_{D3} = I_{D1}, (V_{GS} - V_t)_3 = (V_{GS} - V_t)_5 \text{ a riposo} \rightarrow \text{calcolo } \beta_3$$

$$\text{dato } \beta_3 = \frac{2I_{D1}}{(V_{GS} - V_t)_3^2} \rightarrow \text{uso rapporto } \frac{W_3}{L_3} \text{ con } L_5 = L_3 \rightarrow \text{trovo } W_3$$

acvin.it Stessa cosa per M4 e M5

→ M6:

$$\left. \begin{array}{l} (V_{GS} - V_t)_6 = (V_{GS} - V_t)_5 \\ I_{D6} = I_{D5} \end{array} \right\} \beta_6 = \beta_5 \rightarrow \frac{W_6}{L_6} \text{ con } L_6 \text{ DOF} \rightarrow W_6$$

→ M7:

$$\left. \begin{array}{l} (V_{GS} - V_t)_7 = (V_{GS} - V_t)_6 = (V_{GS} - V_t)_5 \\ I_{D7} = 2 I_{D1} \end{array} \right\} \beta_7 \rightarrow \frac{W_7}{L_7} \text{ con } L_7 = L_6$$

know W_7

ok, dati i 7 parametri posso ricavare i DOF restanti' ---

Quanto valgono questi parametri?