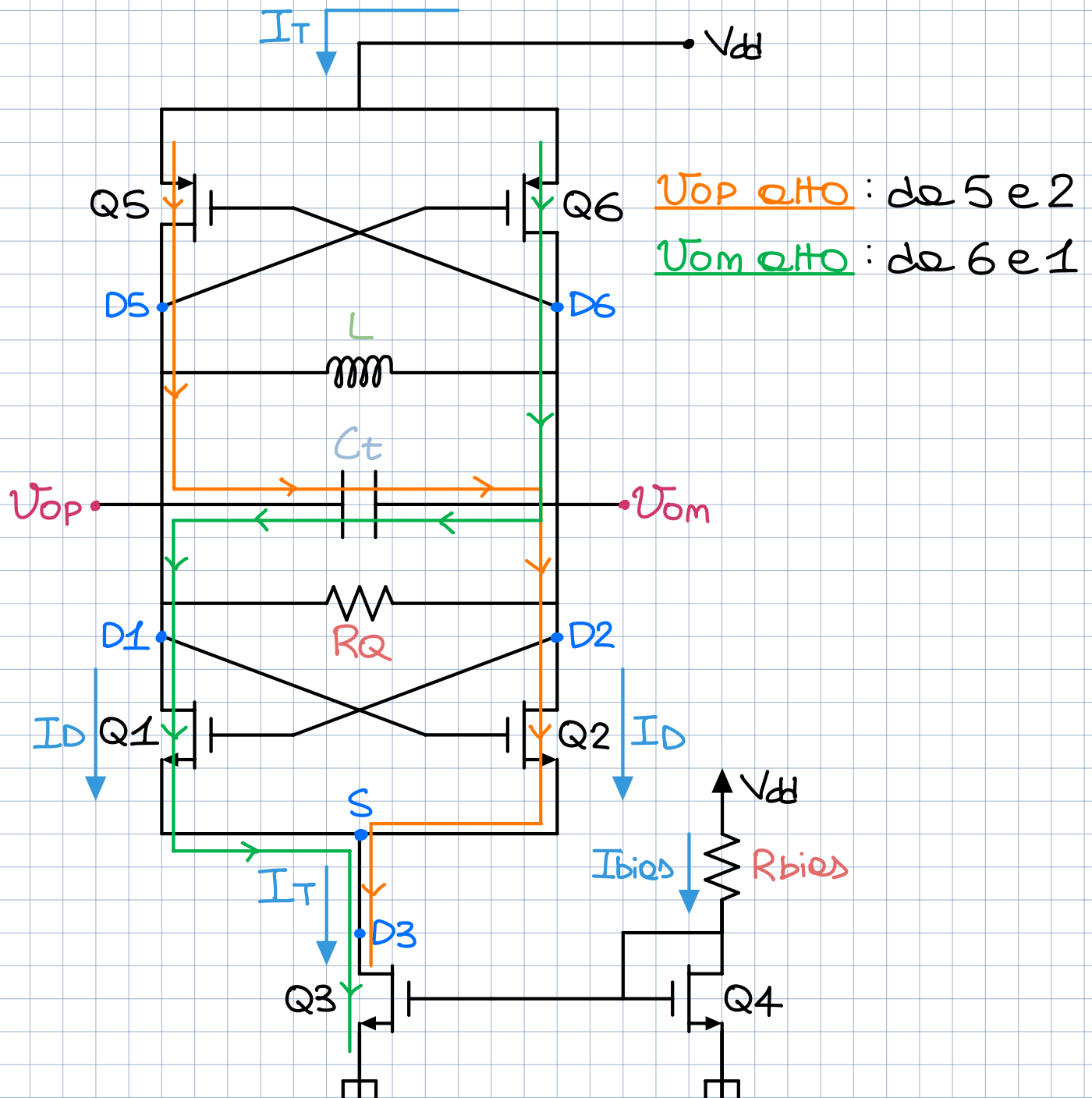


# Progetto: Integrati Wireless

## Oscillatore LC-Tank

IL circuito e' il seguente:



Note :  $f_0 = 5 \text{ GHz}$ ,  $L = 1 \text{ mH}$ ,  $R_s = 2 \Omega$

Dalla  $f_0$  si ricava la Capacite' :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \longrightarrow C_t = \frac{1}{4\pi^2 L f_0^2} = 1013.21 \text{ fF}$$

Sono noti i  $Q$  di  $L$  e di  $C$ :

$$Q_L = \frac{\omega_0 L}{R_s} = 15.71 \quad Q_C = 40 \text{ (dato)} \quad \left. \vphantom{\frac{\omega_0 L}{R_s}} \right\} \text{serie}$$

IL  $Q$  totale vale il Parallelo:

$$\frac{1}{Q_{TOT}} = \frac{1}{Q_L} + \frac{1}{Q_C} = 0.0887 \longrightarrow Q_{TOT} = 11.2788$$

Ma il  $Q$  totale e' pari a:

$$Q_{TOT} = \omega_0 R_Q C_t = \frac{R_Q}{\omega_0 L} \quad \left. \vphantom{\frac{R_Q}{\omega_0 L}} \right\} \text{parallelo}$$

Da questo si ricava:

$$R_Q = \omega_0 L Q_{TOT} = 354.33 \quad \Omega$$

Per ottenere la  $R_{bias}$  ci serve sapere la  $I_T$ . Scriviamo la Corrente di Drain con lo sviluppo in serie di Fourier:

$$i_D(t) = 2I_T \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\text{Sen}(m\pi/2)}{m\pi/2} \cdot \cos(m\omega_0 t)$$

A noi ci interessa la 1<sup>a</sup> Armonica:

$$i_{D1}(t) = \frac{4I_T}{\pi} \cos(\omega_0 t) = I_{D1} \cos(\omega_0 t)$$

La cui Ampiezza e' quella che definisce la Tensione di uscita Picco-Picco:

$$V_{outpp} = V_{upm} - V_{umM} = 2I_{D1}R_Q = \frac{8I_T}{\pi} R_Q$$

Da cui si ricava il valore di  $I_T$  noto  $V_{outpp} = 1 \text{ V (spec.)}$ :

$$I_T = V_{outpp} \frac{\pi}{8R_Q} = 1.108 \text{ mA}$$

Nota (spec.) il rapporto di specchio  $K_S = 10$  si ha:

$$I_{bias} \cong 110.8 \mu\text{A}$$

Questa corrente e' pari a:

$$I_{bias} = \frac{V_{dd} - V_{GS6}}{R_{bias}}$$

Ci serve sapere  $V_{GS6}$ . In saturazione, la corrente e':

$$I_D = \frac{\mu_m C_{ox}}{2} \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 (1 - \lambda V_{DS})$$

Considero un processo uguale (stessa tecnologia) si sceglie una  $L$  uguale tra  $M5$  e  $M6$  e la stessa  $V_{GS}$  (specchio). Quindi:

$$K_S = \frac{I_{D5}}{I_{D6}} = \frac{W_5(1 - \lambda V_{DS5})}{W_6(1 - \lambda V_{DS6})} \xrightarrow{L \text{ lungo}} K_S \cong \frac{W_5}{W_6}$$

Ricordiamo che da specifiche:

$M1$  e  $M2$ :  $L = L_{min} = 240 \text{ nm}$   $\rightarrow$  canale Non cortissimo

$M3$  e  $M4$ :  $L = L_{min} = 240 \text{ nm}$   $\rightarrow$  canale Non cortissimo

$M5$  e  $M6$ :  $L = 2L_{min} = 480 \text{ nm}$

Noti i valori di:

$$\mu_m = 0.032 \text{ V s/m}$$

$$C_{ox} = 5.31 \text{ mF/m}$$

$$V_t = 0.6 \text{ V}$$

$$W_6 = 2 \mu\text{m} \text{ (come esempio)}$$

Con  $I_D = I_{bias}$  si ricava:

$$V_{GS4} = \sqrt{\frac{2L I_{bias}}{\mu_m C_{ox} W}} + V_t = 1.1595 \text{ V}$$

Da cui si ottiene:  $R_{bias} \approx 12.1 \text{ k}\Omega$

Si iniziamo quindi le simulazioni con:

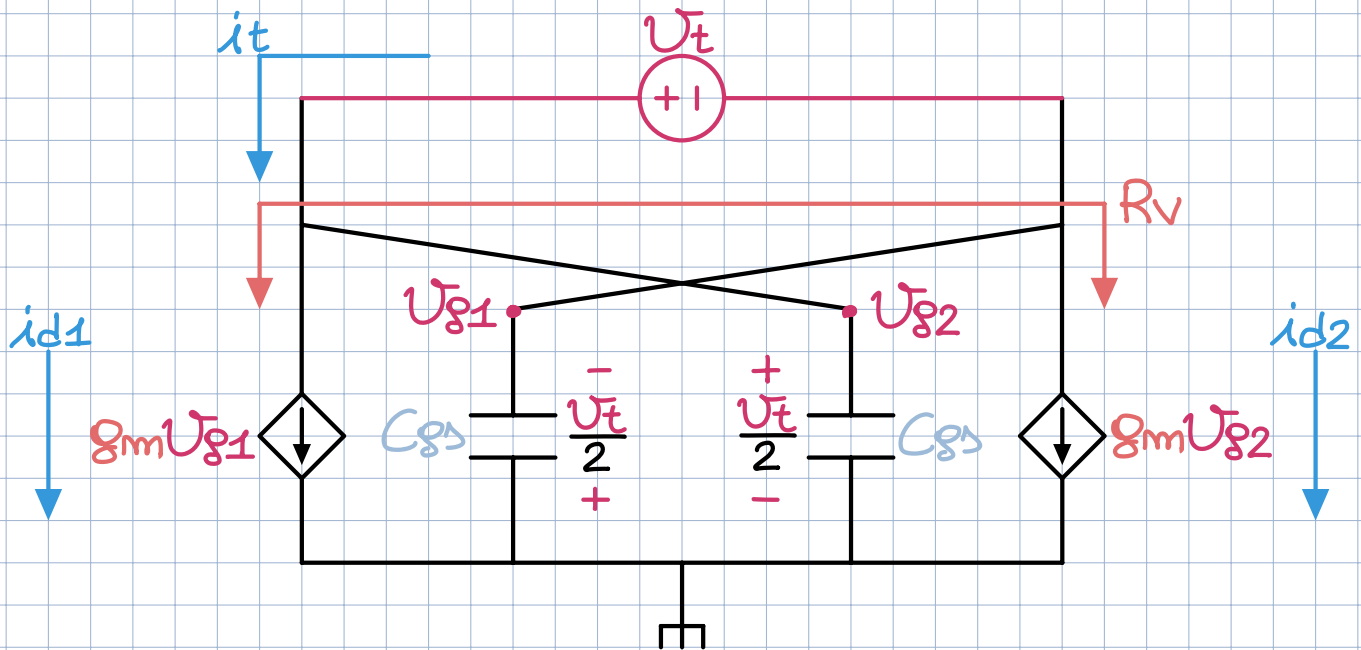
$$C_t = 1013 \text{ fF} \quad R_Q = 354.33 \text{ }\Omega \quad R_{bias} = 12.1 \text{ k}\Omega$$

Fare sempre in modo che la **single** Width di ogni MOS sia  $1 \text{ }\mu\text{m}$  (singolo Finger).

Con la simulazione (2.2) si ottiene:

$$R_{bias} \approx 10.723 \text{ k}\Omega$$

Si osserva che la coppia cross-coupled **PMOS** mostra la stessa  **$R_V$**  della coppia cross-coupled **NMOS** perché il circuito per le variazioni dei PMOS è uguale a quello degli **NMOS**:

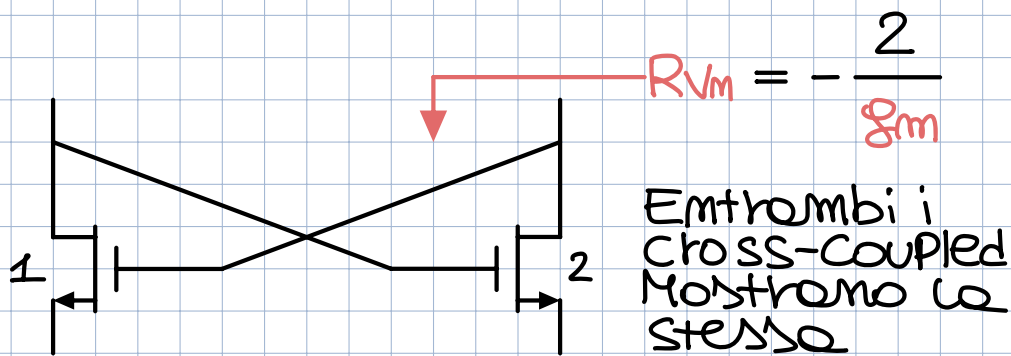


Si ricava quindi la **Resistenza Vista**:

$$i_t = -g_m \frac{v_t}{2} + \underbrace{j\omega C_{gs} \frac{v_t}{2}}_{\text{Troscuro}} \longrightarrow R_{vp} = \frac{v_t}{i_t} = -\frac{2}{g_m}$$

Si trascura il valore di  $\omega C_{gs}$  rispetto al valore di  $g_m$ . La **Resistenza** vista è uguale a  **$R_{vm}$** .

Il  **$g_m$**  desiderato lo si vede osservando che la **Resistenza** vista da sopra la coppia cross-coupled deve essere:



A regime deve valere:

$$R_{V_{TOT}} = R_{V_m} \parallel R_{V_p} = \frac{R_{V_m}}{2} = -\frac{1}{g_m} = -R_Q \longrightarrow \frac{1}{g_m} = R_Q$$

Uscendo dalla condizione di regime, deve valere:

$$g_m \geq \frac{1}{R_Q} \approx 2.82 \text{ mS}$$

A regime il  $g_m$  vale proprio 2.8 mS. All'immezzo e' un po' maggiore. La corrente di saturazione per un transistor a canale corto si puo' scrivere:

$$I_{Dsat} = \frac{\mu_m C_{ox}}{2} W E_{sat} (V_{GS} - V_t)$$

Dove si ha che:  $E_{sat} = \frac{2V_{sat}}{V_t} = 4.08 \text{ MV/m}$

Inoltre, per la tecnologia che si ha:

$$\mu_m = 0.032 \text{ V/s/m} \quad C_{ox} = 5.31 \text{ mF/m} \quad V_t = 0.6 \text{ V}$$

Si vuole dimensionare la  $W$  della coppia cross-coupled e andare a vedere il valore necessario affinché:

$$g_m \geq 2.82 \text{ mS}$$

Il  $g_m$  si ricava con la derivata:

$$g_m \triangleq \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = \frac{\mu_m C_{ox}}{2} W E_{sat} \geq 2.82 \text{ mS}$$

Da questa relazione si ricava la  $W$ :

$$W \geq \frac{2 g_m}{\mu_m C_{ox} E_{sat}} = 8.135 \mu m$$

I Parametri e Piccoli segnali si possono ricavare dalla Simulazione. La Simulazione (2.6) restituisce:

$$M1, M2: g_{m1} = g_{m2} = 2.93 \text{ mA/V}$$

$$M3, M4: g_{m3} = g_{m4} = 3.125 \text{ mA/V}$$

$$M5: g_{m5} = 3.385 \text{ mA/V}$$

$$M6: g_{m6} = 352.2 \mu \text{A/V}$$

La Resistenza vista misurata dalla simulazione vale:

$$R_{VOT} = -121.495 \Omega \neq -R_Q$$

Utilizzando:  $W_p = 50 \mu m$  e  $W_m = 15 \mu m$  si ottiene un valore di  $V_{pp}$  troppo basso:

$$V_{pp} = 0.153 \text{ V} \quad \text{e inoltre: } f_0 = 4.685 \text{ GHz}$$

Si modifica quindi con:  $W_p = 65 \mu m$  e  $W_m = 40 \mu m$

Tramite il Parameter Sweep della Capacità  $C_t$  si ricava il valore corretto:

$$C_t = 835 \text{ fF} \quad \text{per avere: } f_0 = 5 \text{ GHz}$$

Dalla Simulazione HB (4.0) si ottiene lo spettro dell'oscillazione generata. L'armonica Principale ha:

$$f_0 = 5 \text{ GHz} \quad P(\text{dBm}) = 3.883 \text{ dBm} \quad V_{outpp} = 0.992 \text{ V}$$

Mentre, facendo il calcolo, si ottiene:

$$V_{outpp} = 2 \sqrt{\frac{2 R_o}{10^3}} 10^{\frac{P(\text{dBm})}{20}} = 0.989 \text{ V}$$

Si sostituiscono, per il momento,  $C_t$ ,  $R_Q$  e  $R_{bias}$  con i componenti Reali seguenti:

⊗  $R_Q = 354.33 \Omega$

com  $r_{PPd}$ :  $W = 2 \mu m$   $L = 2.32 \mu m$

⊗  $R_{bias} = 10.723 k\Omega$

com  $r_{high}$ :  $W = 2 \mu m$   $L = 13.403 \mu m$

⊗  $C_t = 835 fF$

com  $C_{mim}$ :  $L = 28.896 \mu m$

## Lab: VCO CMOS

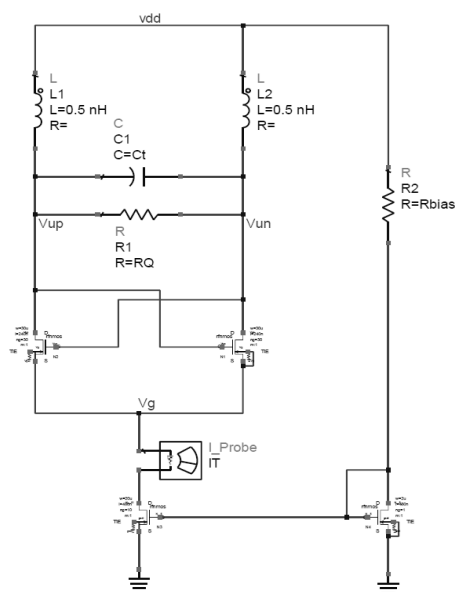
Diversi da quelli già visti

L'obiettivo di questo laboratorio è progettare con l'ausilio del CAD ADS un Voltage Controlled Oscillator (VCO) CMOS cross-coupled, utilizzando i transistori rfmos disponibili nella tecnologia IHP SG25H4. Il circuito dovrà essere dimensionato per soddisfare le seguenti specifiche di progetto:

- tensione di alimentazione pari a 2.5 V;
- frequenza di oscillazione ~~5.25 GHz~~; 5 GHz
- valore induttore nel tank LC pari a 1 nH con resistenza serie pari a 2  $\Omega$ ; } Modelliamo le NON
- fattore di qualità del condensatore nel tank LC pari a 40; } idealità separatamente
- tensione in uscita picco-picco di circa ~~1.2 V~~; 1 V } Resistenza serie di perdita nel dielettrico.

# Guida al laboratorio

Per realizzare il VCO cross-coupled, consideriamo la cella riportata nella figura seguente e costituita da un tank LC, una coppia cross-coupled di tipo N ed uno specchio semplice di corrente con rapporto di specchio pari a 10. I parametri dei transistori  $r_{f\text{nmos}}$  ed i parametri circuitali  $C_t$ ,  $R_{bias}$  ed  $R_Q$  devono essere scelti per soddisfare le specifiche date. Procedere nel dimensionamento, seguendo i passi sottoelencati, cercando di soddisfare le specifiche fornite.



## 1. Dimensionamento tank LC

- Scegliere il valore  $C_t$  opportuno per soddisfare la frequenza di oscillazione di 5.25 GHz.
- Calcolare il valore di  $R_Q$  considerando le specifiche fornite. *Suggerimento*: calcolare il valore del  $Q_{\text{tot}}$  del gruppo LC ed estrarre  $R_Q$ .

## 2. Dimensionamento transistori

- Considerando la specifica relativa alla tensione di uscita picco-picco, scegliere la  $R_{bias}$  e le dimensioni dei transistori dello specchio per ottenere la corrente di tail  $I_T$  desiderata. *Suggerimento:* utilizzare una lunghezza dei transistori doppia rispetto alla minima per diminuire l'errore dello specchio.
- Considerando le condizioni di oscillazione dimensionare i transistor cross-coupled affinché l'oscillazione possa innescarsi ed il circuito oscillare. Verificare tramite simulazione DC che il  $g_m$  dei transistori sia quello desiderato.
- Verificare che l'impedenza vista nei drain della coppia cross-coupled sia a parte reale negativa e



di valore  $R_v = -\frac{2}{gm}$ . *Suggerimento:* Inserire un generatore di corrente con verso opportuno ed eseguire una simulazione AC, andando ad escludere il gruppo LC.

### 3. Simulazione transient

- a. Eseguire una simulazione di tipo *Transient* per osservare l'innesco dell'oscillazione e verificare che la cella progettata sia in grado di sostenerla. Dato che i generatori di rumore non sono stati attivati è necessario innescare l'oscillazione altrimenti il circuito non oscilla. Quindi imporre una condizione iniziale sul condensatore applicando 1 mV. *Suggerimento:* applicare 1 mV nella variabile *Initcond* del condensatore ed abilitare l'opzione "Use user-specified initial conditions" nel gestore della simulazione *Transient*.<sup>1</sup>
- b. Verificare che la tensione picco-picco di uscita ottenuta non soddisfa le specifiche. Verificare che la  $I_d$  dei transistor cross-coupled non si annulla e che quindi non siamo nelle condizioni per cui la cella è stata progettata. È necessario intervenire sui parametri circuitali per ottenere una tensione picco-picco di almeno 1 V. *Suggerimento:* agire sulla dimensioni dei transistor cross-coupled per aumentare il gm.
- c. Graficare lo spettro della tensione di uscita utilizzando la funzione *fs()* e verificare la frequenza di oscillazione. Se il requisito della frequenza di oscillazione non è verificato agire su  $C_t$  per riportarlo all'interno delle specifiche. *Suggerimento:* estrarre la  $C_{ds}$  e  $C_{dg}$  dei transistori cross-coupled.

### 4. Simulazione HB e Phase noise

- a. Eseguire una simulazione di tipo *Harmonic Balance* per verificare la frequenza di oscillazione. Verificare che la frequenza e l'ampiezza del segnale di uscita concordano con i valori ottenuti con la simulazione *Transient*. *Suggerimento:* inserire il componente *OscPort* nell'anello di reazione ed abilitare l'analisi *Oscillator* nel controllore di simulazione HB.
- b. Plottare lo spettro del phase noise dell'oscillatore e verificare la presenza delle componenti  $\frac{1}{f^3}$  e  $\frac{1}{f^2}$ . È possibile estrarre il phase noise abilitando il rumore all'interno del controllore di simulazione HB. *Suggerimento:* Inserire il componente *HB Noise Controller (NoiseCons)*, dimensionarlo e collegarlo con il controllore HB. Abilitare il *phase noise spectrum* e plottare la variabile *pnmx*.

---

<sup>1</sup> *Attenzione:* la simulazione transient senza condizioni iniziali potrebbe generare un'oscillazione. Questo è dovuto alla presenza di rumore numerico chiamato anche "trapezoidal noise" dovuto al risolutore "trapezoidal" utilizzato. Cambiando tipo di simulatore l'oscillazione sparisce. *Questo tipo di effetto non è un innesco valido.*