

**Examen de Electrónica 2**  
**11/02/2010**

Resolver cada problema en hojas separadas.  
Duración de la prueba: 3 horas 30 minutos.  
La prueba es **sin** material.  
Los puntajes de los problemas se indican sobre un total de 100 puntos.

**Problema 1: (40 puntos)**

El circuito de la Figura 1 es un amplificador Folded Cascode (FC), mientras que el circuito de la Figura 2 es un amplificador Folded Cascode Modificado (FCM). Se pide para ambos:

- Calcular la transconductancia de cortocircuito a la salida.
- Calcular la ganancia en DC, el  $f_T$  y el Slew Rate.
- Calcular el consumo de corriente en reposo ( $I_{DD}$ ) y la figura de mérito:  $FOM = f_T \times CL / I_{DD}$ . En base a esta figura de mérito, ¿cuál de las 2 arquitecturas es más eficiente?

Datos:

- Todos los transistores tienen el mismo  $L$ , tensión de Early infinita y  $\delta_n = \delta_p = 0$ .
- Los transistores con el mismo nombre en ambos circuitos son idénticos.
- $W_{1a} = W_{1b} = W_1/2$ ,  $W_{2a} = W_{2b} = W_2/2$ ,  $W_{3a} = 3W_{3b}$ ,  $W_{4a} = 3W_{4b}$ .
- En ambos circuitos  $V_{bp1}$  es tal que por  $M0$  circula  $2I_B$  y  $V_{bn2}$  es tal que todos los transistores están saturados. En el FC (Fig. 1),  $V_{bn1}$  es tal que por  $M3$  y  $M4$  circula  $2I_B$ .

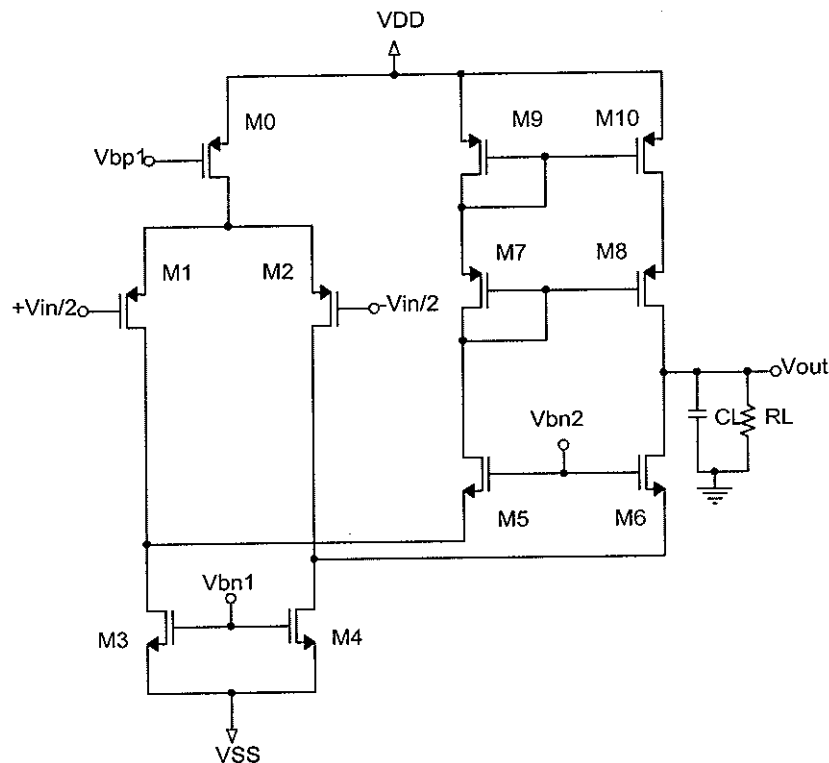


Figura 1

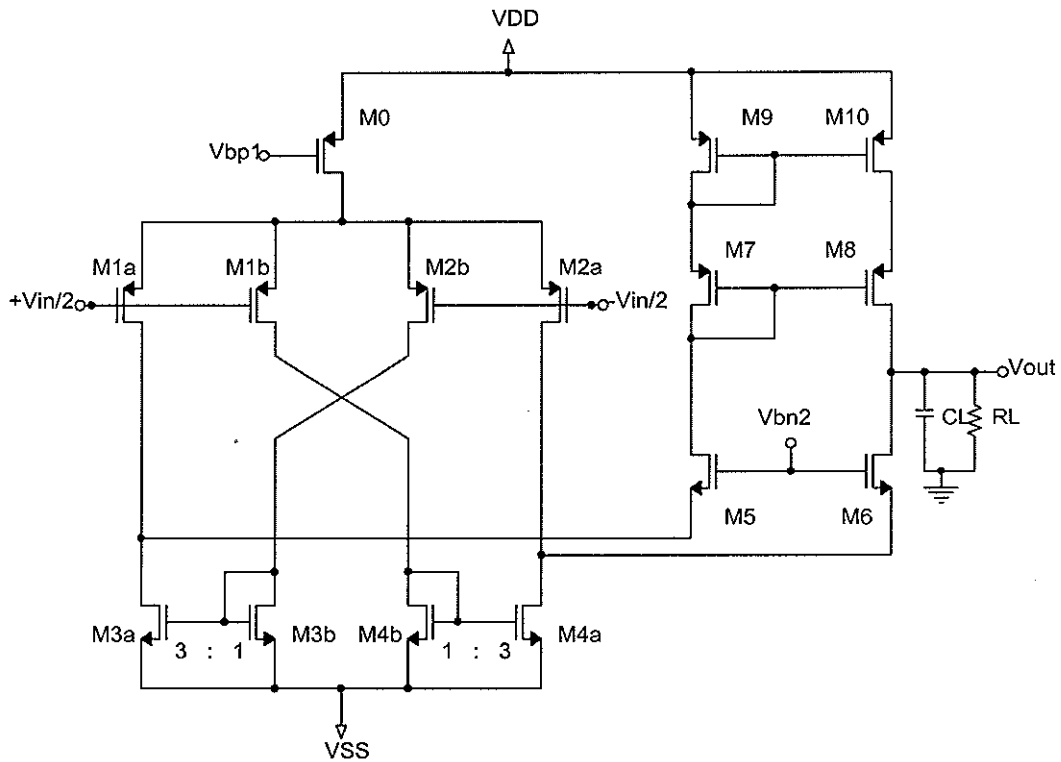


Figura 2

**Problema 2: (37 puntos)**

Para el circuito de la Figura 1 calcule:

- a) La ganancia en la banda pasante.
- b) La frecuencia de caída de -3dB.
- c) El margen de fase del amplificador.

Los dos transistores son modelo 2N5179 con los siguientes datos:  $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ ,  $\beta = 100$ ,  $C_{\mu} = 0.7 \text{ pF}$ ,  $C_{je} = 10 \text{ pF}$ ,  $f_T = 1.5 \text{ GHz @ } 10 \text{ mA}$ . Además  $V_{BIAS} = 2.1 \text{ V}$ ,  $V_{CC} = 5 \text{ V}$ ,  $R_1 = 50 \text{ }\Omega$ ,  $R_2 = 2.7 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 1.5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 75 \text{ }\Omega$ . Los condensadores C de desacople se pueden considerar infinitos.

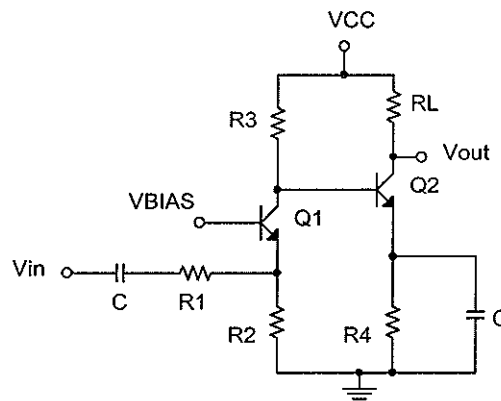
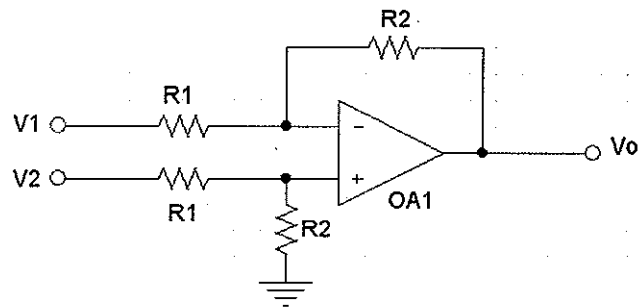


Figura 1

**Pregunta : (23 puntos)**

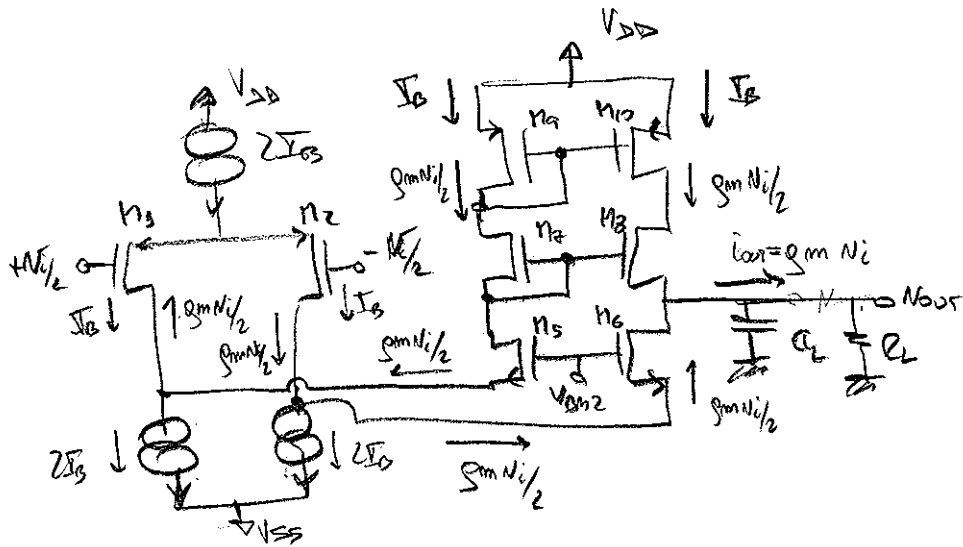
Para el circuito de la figura determinar el voltaje rms de ruido equivalente en las entradas V1 y V2. Para ello se deberá considerar el ruido aportado por las resistencias, que se trabaja sobre un ancho de banda ideal de B Hz y que el amplificador operacional OA1 tiene, en ese ancho de banda, un ruido equivalente de entrada con densidad espectral de potencia constante igual a  $S_A$  V<sup>2</sup>/Hz.



1

(C)

FC



EN DC:  $M_0, M_3$  y  $M_4$  se fueren le corriente:  $2I_B$

$$\Rightarrow I_{D1} = I_{D2} = I_{D5} = I_{D6} = I_{D7} = I_{D8} = I_{D9} = I_{D10} = I_B$$

$$\Rightarrow \left| \frac{I_{FC}}{I_{DD}} \right| = 4I_B$$

EN señal: Las corrientes de señal  $\pm \Delta i/2 = \pm g_m N_i/2$  circulan por  $M_5$  y  $M_6$  ( $M_3$  y  $M_4$  se fueren le corriente, circuitos abiertos a señal).

La corriente  $\Delta i/2$  que circula por  $M_5$  se copia a el espejo cascode  $M_7 - M_{10}$  y se suma a la corriente  $\Delta i/2$  que circula por  $M_6 \Rightarrow I_{out} |_{N_{out}=0} = \Delta i = g_m N_i$

$$\Rightarrow G_{mFC} = \frac{I_{out}}{V_{in}} |_{N_{out}=0} = g_{m1} = \sqrt{2I_B \beta_1}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{aligned} A_{vFC} &= G_{mFC} R_L \\ f_{FC} &= \frac{G_{mFC}}{2\pi C_L} \end{aligned} \right.$$

SR:  $M_2$  OFF  $\Rightarrow I_{D3} = 2I_B$   
 $\Rightarrow M_3$  OFF  $\Rightarrow M_7 - M_{10}$  OFF  
 $\Rightarrow I_{D6} = I_{out} = 2I_B \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} SR_{FC} &= \frac{2I_B}{C_L} \end{aligned} \right.$   
 (Analogamente se a  $M_1$  OFF)

① FCM

DC  $I_{D1a} = I_{D1b} = I_{D2a} = I_{D2b} = I_B/2$

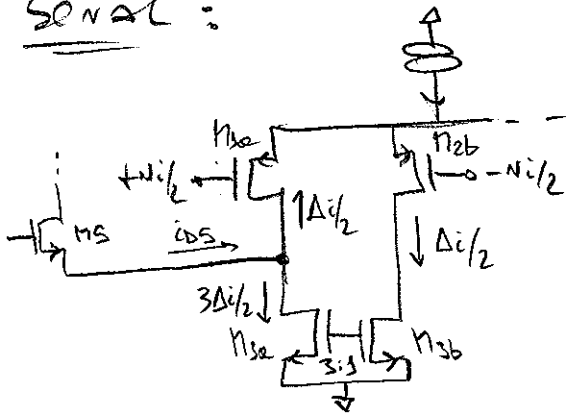
$\Rightarrow g_{m1a} = \sqrt{2 \frac{I_B}{2} \beta_{1a}} \left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow g_{m1a} = g_{m1}/2 \\ \beta_{1a} = \beta/2 \end{array} \right.$

$I_{D3b} = I_{D2b} \left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow I_{D3a} = I_{D4a} = 3I_B/2 \\ I_{D4b} = I_{D1b} \end{array} \right.$

$\Rightarrow I_{D5} = I_{D6} = I_{D7} = I_{D8} = I_{D9} = I_{D10} = I_B$

$\Rightarrow \boxed{I_{DD}^{Fcm} = 4I_B}$

Signal:



$\Rightarrow i_{DS} = 2\Delta i \quad / \quad \Delta i = g_{m1a} N_{i1} = \frac{g_{m1} N_i}{2}$

Analogue se  $i_{DS} = -2\Delta i$

$\Rightarrow i_{out} |_{N_{out}=0} = 4\Delta i = 2g_{m1} N_i$

$\Rightarrow \boxed{G_{mFCM} = 2 G_{mFC}}$

$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} A_{oFCM} = 2 A_{oFC} \\ f_{TFCM} = 2 f_{TFC} \end{array} \right.$

SR:  $N_{2a,b} \text{ OFF} \Rightarrow N_{3a,b} \text{ OFF}$

$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_{D1a} = 0 \Rightarrow I_{D1b} = 2I_B \\ I_{D5} = 0 \Rightarrow N_{7-10} \text{ OFF} \end{array} \right. \Rightarrow$

$\Rightarrow I_{D4a} = I_{D6} = I_{out} = 6I_B$

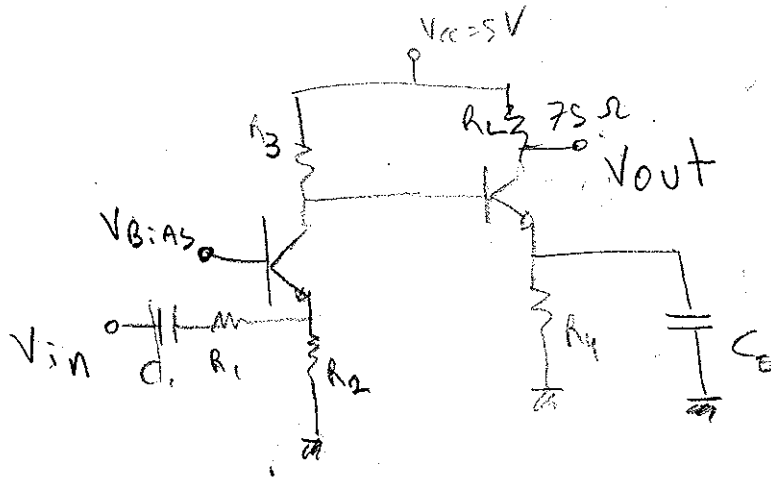
$\Rightarrow \boxed{SR_{FCM} = \frac{6I_B}{C_L} = 3 SR_{FC}}$

FOM  $FOM = \frac{f_T C_L}{I_{DD}}$

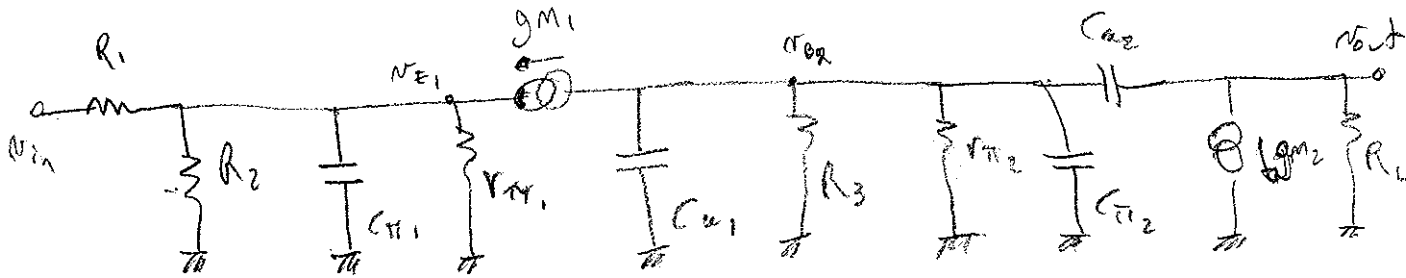
$\Rightarrow \boxed{FOM_{FCM} = 2 FOM_{FC}}$

Esta figura de merito mide el trade-off entre la velocidad ( $f_T$ ) y el consumo de corriente ( $I_{DD}$ ) x la carga  $C_L$  dada. Que da como entonces que el FCM es más eficiente que el FC.

2)



- $\beta = 100$
- $C_{cb} = 0,7 \text{ pF}$
- $f_T = 2,5 \text{ GHz} @ 10 \text{ mA}$
- $V_{BE} = 0,7$
- $C_{je} = 10 \text{ pF}$
- $V_{Bias} = 2,1 \text{ V}$
- $R_2 = 2,7 \text{ k}$
- $R_4 = 1,5 \text{ k}$



2)

$$I_{C1} = \frac{V_{Bias}}{R_2} = \frac{2,1 \text{ V}}{2,7 \text{ k}} = 0,78 \text{ mA} \Rightarrow \frac{1}{g_{m1}} = 50$$

$$R_i = 50$$

$$r_{\pi 1} = \frac{\beta}{g_{m1}} = 5 \text{ k}$$

$$f_T = 2,5 \text{ GHz} @ 10 \text{ mA} \Rightarrow 2,5 \text{ GHz} = \frac{g_m}{2\pi(C_{\pi} + C_u)} = \frac{10 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} \Rightarrow C_{\pi} + C_u = \frac{10 \text{ mA}}{2\pi \cdot 2,5 \text{ GHz} \cdot 26 \text{ mV}}$$

$$C_{\pi} + C_u = 40,8 \text{ pF} \Rightarrow C_{\pi} = 40,1 \text{ pF} = 10 \text{ pF} + K I \Rightarrow K = \frac{30,1}{10 \text{ mA}} = 3,01 \text{ pF/nA}$$

$$C_{\pi} @ 0,26 \text{ mA} = C_{je} = K \cdot 0,26 \text{ mA} = 10 \text{ pF} + 1,6 \text{ pF} = 11,6 \text{ pF}$$

$$R_3 = 1 \text{ k}$$

$$r_{\pi 2} = \frac{V_{BE}}{2}, \quad r_{b2} = g_{m1} \cdot r_{\pi 1} \cdot R_3 // r_{\pi 2} = r_{\pi 1} \cdot \frac{510}{50} = 10,2 r_{\pi 1}$$

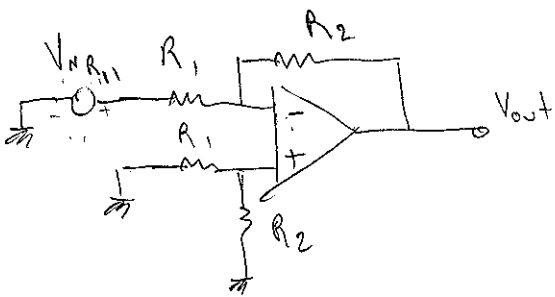
$$I_{C2} = \frac{V_{BE}}{R_4} = 2,5 \text{ mA} \Rightarrow I_{B2} = 0,025 \text{ mA} \ll I_{C1}$$

$$V_{B2} = V_{cc} - R_3 I_{C1} = 5 - 0,78 \text{ V} = 4,22 \text{ V} \Rightarrow V_{E2} = 3,78$$

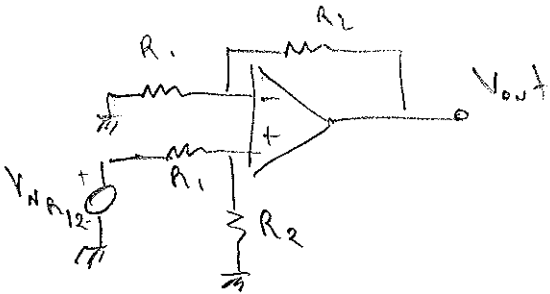
$$g_{m2} = \frac{2,5 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 0,096 \text{ A/V}, \quad r_{\pi 2} = 1041 \Omega$$

Pregunta 2)

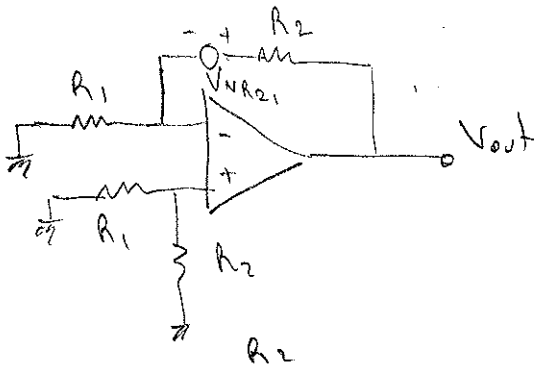
Superp.



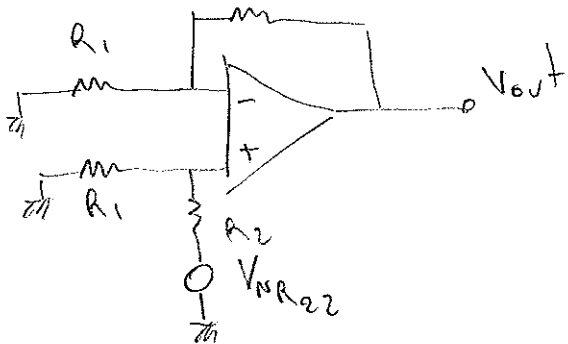
$$V_{out_{NR11}} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{NR11}$$



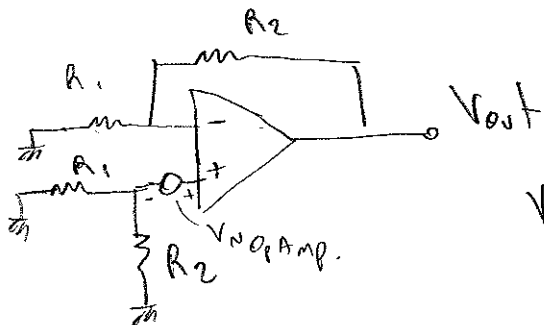
$$V_{out_{NR12}} = \frac{R_2}{R_1} V_{NR12}$$



$$\frac{V_{out} - V_{NR21}}{R_2} = 0 \Rightarrow V_{out} = V_{NR21}$$



$$V_{out_{NR22}} = \frac{V_{NR22} - R_1}{R_1 + R_2} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = V_{NR22}$$



$$V_{out_{NOpAmp}} = V_{NOpAmp} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$(V_{NR11})^2 = (V_{NR12})^2 = 4kTR_1$$

$$(V_{NR21})^2 = (V_{NR22})^2 = 4kTR_2$$

$$(V_{out_N})^2 = B \left( 2 \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot 4kTR_1 + 2 \cdot 4kTR_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot S_A \right)$$

$$(V_1 - V_2)_{RMS} = \frac{R_1}{R_2} \cdot \sqrt{B \left( 2 \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot 4kTR_1 + 2 \cdot 4kTR_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot S_A \right)}$$