

1. Za pojačavač sa slike odrediti spektralnu gustinu snage:
 a) ekvivalentnog termičkog šuma na ulazu.
 b) ekvivalentnog flicker šuma na ulazu.

Rešenje:

Prema oznakama na slici 1a, spektralna gustina snage izlaznog šuma je

$$V_{n0}^2 = V_{n0,1}^2 + V_{n0,2}^2 + V_{n0,3}^2 + V_{n0,4}^2 + V_{n0,5}^2,$$

gde su $V_{n0,1}^2$, $V_{n0,2}^2$, $V_{n0,3}^2$, $V_{n0,4}^2$ i $V_{n0,5}^2$ spektralne gustine snage izlaznog šuma koje potiču od generatora šuma tranzistora M_1 , M_2 , M_3 , M_4 i M_5 , respektivno.

Moduli naponskih pojačanja od gejta pojedinih tranzistora do izlaza su

$$|A_{1,2}| = g_{m1,2}R_0, \quad |A_{3,4}| = g_{m4}R_0 \quad \text{i} \quad |A_5| = \frac{g_{m5}}{2g_{m3,4}}.$$

Smenom se dobija

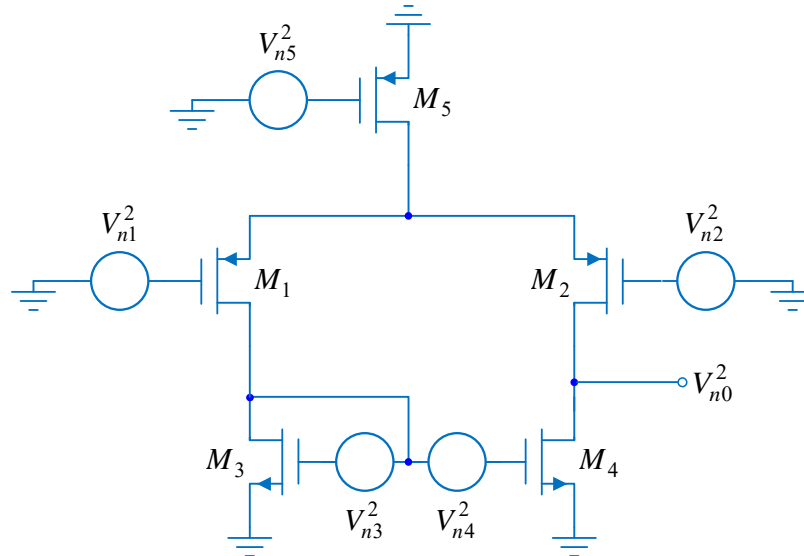
$$V_{n0}^2 = |A_{1,2}|^2 V_{n1}^2 + |A_{1,2}|^2 V_{n2}^2 + |A_{3,4}|^2 V_{n3}^2 + |A_{3,4}|^2 V_{n4}^2 + |A_5|^2 V_{n5}^2.$$

Spektralna gustina snage ekvivalentnog šuma na ulazu diferencijalnog pojačavača je

$$V_{ni}^2 = \frac{V_{n0}^2}{|A_{1,2}|^2} = V_{n1}^2 + V_{n2}^2 + \frac{|A_{3,4}|^2}{|A_{1,2}|^2} V_{n3}^2 + \frac{|A_{3,4}|^2}{|A_{1,2}|^2} V_{n4}^2 + \frac{|A_5|^2}{|A_{1,2}|^2} V_{n5}^2.$$

Pošto su tranzistori M_1 i M_2 uparenih karakteristika, isto kao i tranzistori M_3 i M_4 , to je

$$V_{ni}^2 = 2V_{n1}^2 + 2 \frac{|A_{3,4}|^2}{|A_{1,2}|^2} V_{n3}^2 + \frac{|A_5|^2}{|A_{1,2}|^2} V_{n5}^2 = 2V_{n1}^2 + 2 \left(\frac{g_{m3}}{g_{m1}} \right)^2 V_{n3}^2 + \left(\frac{g_{m5}}{2g_{m3}} \frac{1}{g_{m1}R_0} \right)^2 V_{n5}^2,$$



Slika 1a.

ili približno

$$V_{ni}^2 \approx 2V_{n1}^2 + 2\left(\frac{g_{m3}}{g_{m1}}\right)^2 V_{n3}^2.$$

a) Termički šum koji potiče od MOS tranzistora je

$$V_{nj}^2 = \frac{4kT\gamma}{g_{mj}},$$

a posle smene je

$$V_{ni}^2 \approx 2\left[\frac{4kT\gamma}{g_{m1}} + \left(\frac{g_{m3}}{g_{m1}}\right)^2 \frac{4kT\gamma}{g_{m3}}\right] = \frac{8kT\gamma}{g_{m1}} \left(1 + \frac{g_{m3}}{g_{m1}}\right).$$

Budući da je

$$g_{mj} = \sqrt{2I_{Dj}\mu_j C_{ox}(W/L)_j},$$

prethodni izraz postaje

$$V_{ni}^2 \approx \frac{8kT\gamma}{g_{m1}} \left(1 + \sqrt{\frac{\mu_n(W/L)_3}{\mu_p(W/L)_1}}\right).$$

b) Kada se u izraz za ekvivalentni šum na ulazu uvrste Flicker šumovi koje unose pojedini tranzistori

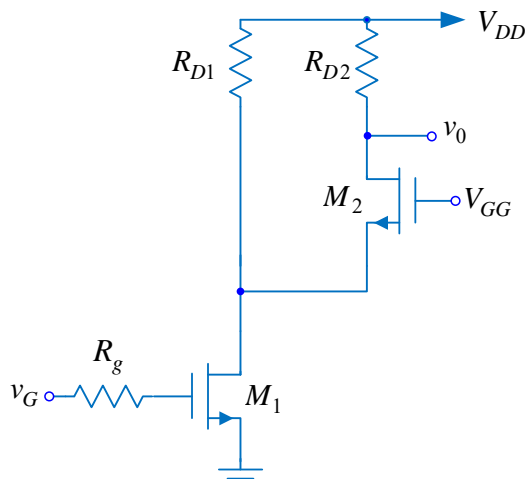
$$V_{nj}^2 = \frac{K_{Fj}}{W_j L_j C_{ox} f},$$

dobija se

$$V_{ni}^2 \approx 2V_{n1}^2 + 2\left(\frac{g_{m3}}{g_{m1}}\right)^2 V_{n3}^2 = 2\left[V_{n1}^2 + V_{n3}^2 \frac{\mu_n(W/L)_3}{\mu_p(W/L)_1}\right] = 2\left[\frac{K_{Fp}}{W_1 L_1 C_{ox} f} + \frac{K_{Fn}}{W_3 L_3 C_{ox} f} \frac{\mu_n(W/L)_3}{\mu_p(W/L)_1}\right],$$

odnosno

$$V_{ni}^2 \approx \frac{2K_{Fp}}{W_1 L_1 C_{ox} f} \left[1 + \frac{K_{Fn}}{K_{Fp}} \frac{\mu_n}{\mu_p} \left(\frac{L_1}{L_3}\right)^2\right] \approx \frac{2K_{Fp}}{W_1 L_1 C_{ox} f} \left[1 + 4\left(\frac{L_1}{L_3}\right)^2\right].$$



Slika 2.

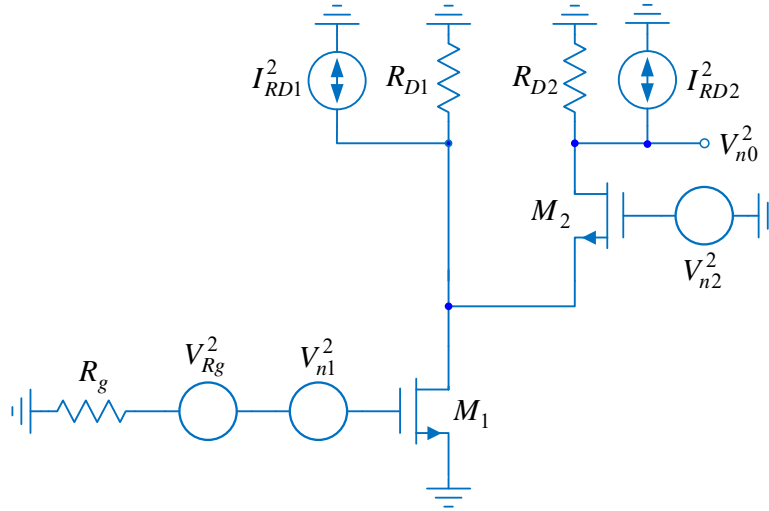
2. Za pojačavač sa slike odrediti faktor termičkog šuma. Zanimariti Earlijev efekat i efekat osnove.

Rešenje:

Na slici 2a je prikazana šema za male signale sa ekvivalentnim generatorima šuma. Primenom principa superpozicije, a prema oznakama na slici xa, je

$$V_{n0}^2 = V_{n0,1}^2 + V_{n0,2}^2 + V_{n0,R}^2,$$

gde su $V_{n0,1}^2$, $V_{n0,2}^2$ i $V_{n0,R}^2$ ekvivalentni naponi termičkog šuma na izlazu koji potiču od tranzistora M_1 , M_2 i otpornika u kolu, respektivno.



Slika 2a.

Izlazni šum koji potiče od tranzistora M_1 je

$$V_{n0,1}^2 = V_{n1}^2 \cdot g_{m1}^2 \left(R_{D1} \parallel \frac{1}{g_{m2}} \right)^2 R_{D2}^2 = V_{n1}^2 \cdot g_{m1}^2 \left(\frac{R_{D1}}{1 + g_{m1} R_{D1}} \right)^2 R_{D2}^2.$$

Izlazni šum koji potiče od tranzistora M_2 je

$$V_{n0,2}^2 = V_{n2}^2 \cdot \left(\frac{g_{m2} R_{D2}}{1 + g_{m2} R_{D1}} \right)^2.$$

Izlazni šum koji potiče od otpornika u kolu je

$$V_{n0,R}^2 = V_{Rg}^2 \cdot g_{m1}^2 \left(\frac{R_{D1}}{1 + g_{m1} R_{D1}} \right)^2 R_{D2}^2 + I_{RD1}^2 \left(\frac{R_{D1}}{1 + g_{m1} R_{D1}} \right)^2 R_{D2}^2 + I_{RD2}^2 R_{D2}^2.$$

Faktor šuma jednak je odnosu snage šuma na izlazu i snage šuma koji potiče od otpornosti R_g

$$F = \frac{V_{n0}^2}{V_{n0}^2 (V_{Rg}^2)} = \frac{V_{n0,1}^2 + V_{n0,2}^2 + V_{n0,R}^2}{V_{Rg}^2 \cdot g_{m1}^2 \left(\frac{R_{D1}}{1 + g_{m1} R_{D1}} \right)^2 R_{D2}^2},$$

odnosno

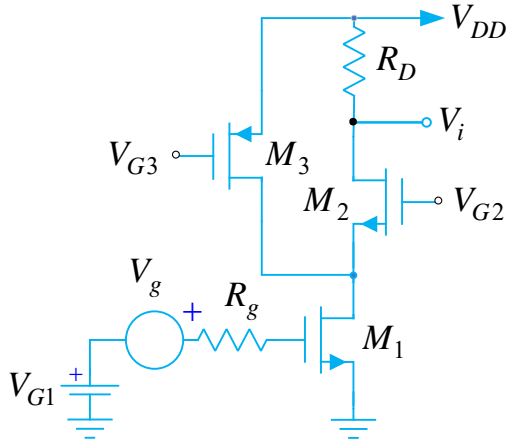
$$F = 1 + \frac{V_{n1}^2}{V_{Rg}^2} + \frac{I_{RD1}^2}{V_{Rg}^2 \cdot g_{m1}^2} + \frac{V_{n2}^2 \cdot \left(\frac{g_{m2} R_{D2}}{1 + g_{m2} R_{D1}} \right)^2 + I_{RD2}^2 R_{D2}^2}{V_{Rg}^2 \cdot g_{m1}^2 \left(\frac{R_{D1}}{1 + g_{m1} R_{D1}} \right)^2 R_{D2}^2}.$$

Pošto su generatori šuma

$$V_{n1}^2 = \frac{4kT\gamma}{g_{m1}}, \quad V_{n2}^2 = \frac{4kT\gamma}{g_{m2}}, \quad I_{RD1}^2 = \frac{4kT}{R_{D1}}, \quad I_{RD2}^2 = \frac{4kT}{R_{D2}} \quad \text{i} \quad V_{Rg}^2 = 4kTR_g,$$

to je

$$F = 1 + \frac{\gamma}{g_{m1}R_g} + \frac{1}{g_{m1}^2 R_{D1} R_g} + \frac{1}{g_{m2} R_g} \cdot \left(\frac{g_{m2} R_{D2}}{1 + g_{m2} R_{D1}} \right)^2 + \frac{R_{D2}}{R_g} \cdot \frac{1}{g_{m1}^2 \left(\frac{R_{D1}}{1 + g_{m1} R_{D1}} \right)^2 R_{D2}^2}.$$



Slika 3.

3. Za kolo sa slike odrediti faktor šuma. Zanemariti efekat osnove.

Rešenje:

Na slici 3a je prikazana šema za male signale sa generatorima šuma u kolu pojačavača. Spektralne gustine snaga šuma su

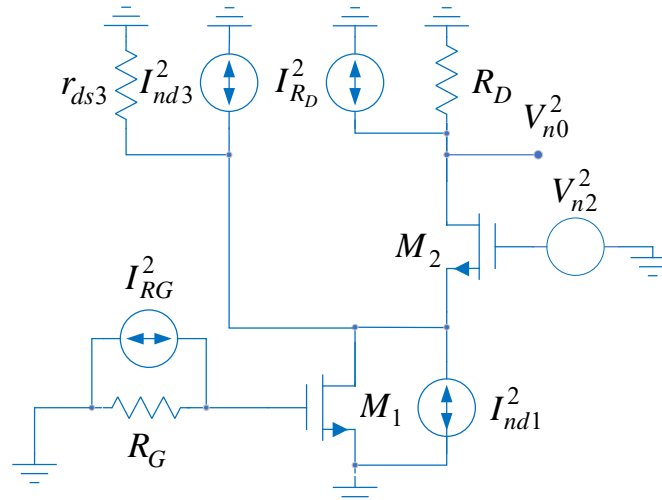
$$I_{nd1}^2 = 4kT\gamma g_{m1}, \quad V_{n2}^2 = \frac{4kT\gamma}{g_{m2}},$$

$$I_{nd3}^2 = 4kT\gamma g_{m3}, \quad I_{R_G}^2 = \frac{4kT}{R_G}, \quad I_{R_D}^2 = \frac{4kT}{R_D}.$$

Spektralna gustina snage izlaznog šuma zavisi od šuma koje unose otpornici i tranzistori. Pošto su ovi izvori

šuma nekorelisani, to je

$$V_{n0}^2 = V_{n0,R_D}^2 + V_{n0,R_G}^2 + V_{n0,M_1}^2 + V_{n0,M_2}^2 + V_{n0,M_3}^2.$$



Slika 3a

Primenom principa superpozicije se dobija

$$V_{n0,R_D}^2 = I_{R_D}^2 R_D^2 = 4kTR_D,$$

$$V_{n0,R_G}^2 = I_{R_G}^2 R_G^2 A_v^2 \approx 4kTR_G (g_{m1} R_D)^2,$$

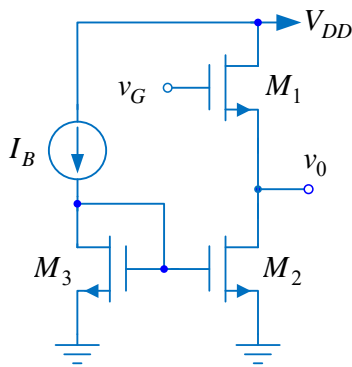
$$V_{n0,M_1}^2 = I_{nd1}^2 \left(\frac{r_{ds1} \parallel r_{ds3}}{\frac{1}{g_{m2}} + (r_{ds1} \parallel r_{ds3})} \right)^2 R_D^2 = 4kT\gamma g_{m1} \left(\frac{r_{ds1} \parallel r_{ds3}}{1 + g_{m2}(r_{ds1} \parallel r_{ds3})} \right)^2 R_D^2,$$

$$V_{n0,M_2}^2 = V_{n2}^2 \left(\frac{g_{m2} r_{ds2} R_D}{R_D + (r_{ds1} \parallel r_{ds3}) + r_{ds2}(1 + g_{m2}(r_{ds1} \parallel r_{ds3}))} \right)^2,$$

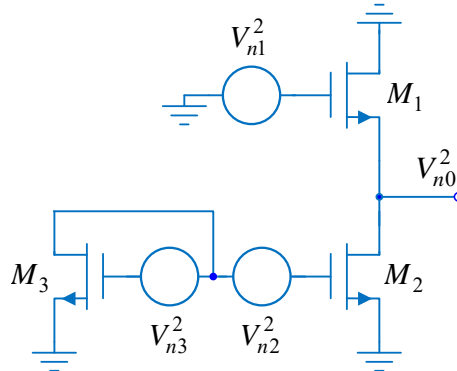
$$V_{n0,M_3}^2 = I_{nd3}^2 \left(\frac{r_{ds1} \parallel r_{ds3}}{\frac{1}{g_{m2}} + (r_{ds1} \parallel r_{ds3})} \right)^2 R_D^2 = 4kT\gamma g_{m3} \left(\frac{r_{ds1} \parallel r_{ds3}}{1 + g_{m2}(r_{ds1} \parallel r_{ds3})} \right)^2 R_D^2.$$

Faktor šuma jednak je odnosu ukupne snage šuma na izlazu i snage šuma koju unosi otpornik R_G ,

$$F = \frac{V_{n0}^2}{V_{n0,R_G}^2} = 1 + \frac{V_{n0,R_D}^2 + V_{n0,M_1}^2 + V_{n0,M_2}^2 + V_{n0,M_3}^2}{V_{n0,R_G}^2}.$$



Slika 4.



Slika 4a.

4. Za pojačavač sa slike odrediti spektralnu gustinu snage ekvivalentnog termičkog šuma na ulazu. Zanimariti efekat osnove.

Rešenje:

Na slici 4a je prikazana šema za male signale sa ekvivalentnim generatorima šuma. Prema oznakama na ovoj slici je

$$V_{n1}^2 = \frac{4kT\gamma}{g_{m1}}, \quad V_{n2}^2 = \frac{4kT\gamma}{g_{m2}}, \quad V_{n3}^2 = \frac{4kT\gamma}{g_{m3}}.$$

Određivanjem struje kratkog spoja izlaza se dobija

$$V_{n0}^2 = V_{n0,1}^2 + V_{n0,2}^2 + V_{n0,3}^2,$$

gde su $V_{n0,1}^2$, $V_{n0,2}^2$ i $V_{n0,3}^2$ spektralne gustine snaga šuma na izlazu koje potiču od termičkog šuma tranzistora M_1 , M_2 i M_3 , respektivno.

Prema oznakama na slici ya je

$$V_{n0,1}^2 = g_{m1}^2 R_0^2 V_{n1}^2 = g_{m1}^2 R_0^2 \frac{4kT\gamma}{g_{m1}} = 4kT\gamma g_{m1} \cdot R_0^2,$$

$$V_{n0,2}^2 = g_{m2}^2 R_0^2 V_{n2}^2 = g_{m2}^2 R_0^2 \frac{4kT\gamma}{g_{m2}} = 4kT\gamma g_{m2} \cdot R_0^2$$

$$V_{n0,3}^2 \approx g_{m2}^2 R_0^2 V_{n3}^2 = g_{m2}^2 R_0^2 \frac{4kT\gamma}{g_{m3}},$$

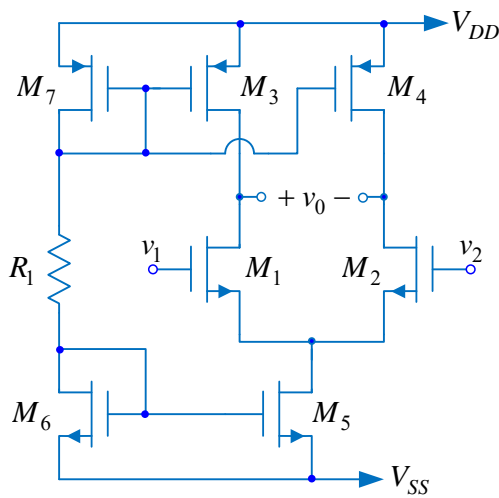
gde je R_0 izlazna otpornost pojačavača.

Ekvivalentni napon šuma na ulazu pojačavača jednak je

$$V_{ni}^2 = \frac{V_{n0}^2}{g_{m1}^2 R_0^2} = \frac{4kT\gamma}{g_{m1}} + \frac{4kT\gamma g_{m2}}{g_{m1}^2} + \left(\frac{g_{m2}}{g_{m1}}\right)^2 \frac{4kT\gamma}{g_{m3}}.$$

Kada su tranzistori M_1 i M_2 identičnih karakteristika i $(W/L)_3 = 0.2(W/L)_2$, tada je

$$V_{ni}^2 = \frac{4kT\gamma}{g_{m1}} + \frac{4kT\gamma}{g_{m1}} + \frac{4kT\gamma}{\sqrt{0.2}g_{m1}} = \frac{4kT\gamma}{g_{m1}} \left(2 + \frac{1}{\sqrt{0.2}}\right).$$



Slika 5.

5. Za kolo pojačavača sa slike odrediti sepektralnu gustinu snage ekvivalentnog šuma na njegovom ulazu. Poznato je $(W/L)_1 = (W/L)_2$, $(W/L)_3 = (W/L)_4$, $(W/L)_7 = (W/L)_{3-4}$, $(W/L)_5 = 2(W/L)_6$.

Rešenje:

Pošto je izlaz simetričan, spektralna gustina snage izlaznog šuma koja potiče od tranzistora M_{5-7} i otpornika R_1 ravna je nuli. Spektralna gustina snage šuma koje unosi tranzistor M_3 se dobija primenom bisekcionog teorema, slika 5a. Prema oznakama na ovoj slici je

$$\frac{V_0}{V_{n3}} = \frac{g_{m3}}{g_{ds3} + g_{ds1}},$$

pa je

ekvivalentni napon šuma na ulazu koji potiče od tranzistora M_3 ,

$$V_{ni}(V_{n3}) = \frac{V_0}{A_d} = \frac{V_0}{\frac{g_{m1}}{g_{ds1} + g_{ds3}}} = \frac{g_{m3}}{g_{m1}} V_{n3}.$$

Spektralna gustina snage ovog šuma na ulazu je

$$V_{ni}^2(V_{n3}^2) = \left(\frac{g_{m3}}{g_{m1}}\right)^2 V_{n3}^2.$$

Budući da su tranzistori M_3 i M_4 identičnih karakteristika, ista je i spektralna gustina snage ulaznog šuma koji potiče od tranzistora M_4 ,

$$V_{ni}^2(V_{n4}^2) = \left(\frac{g_{m3}}{g_{m1}}\right)^2 V_{n4}^2 = \left(\frac{g_{m3}}{g_{m1}}\right)^2 V_{n3}^2.$$

Spektralna gustina snage ekvivalentnog šuma na ulazu diferencijalnog pojačavača jednaka je

$$V_{ni}^2 = V_{ni}^2(V_{n1}^2) + V_{ni}^2(V_{n2}^2) + V_{ni}^2(V_{n3}^2) + V_{ni}^2(V_{n4}^2),$$

odnosno

$$V_{ni}^2 = V_{n1}^2 + V_{n2}^2 + 2\left(\frac{g_{m3}}{g_{m1}}\right)^2 V_{n3}^2 = 2V_{n1}^2 \left(1 + \left(\frac{g_{m3}}{g_{m1}}\right)^2 \frac{V_{n3}^2}{V_{n1}^2}\right).$$

Kada se u obzir uzmu generatori Flicker i termičkog šuma, ekvivalentni šum na ulazu ima spektralnu gustinu snage

$$V_{ni}^2 = V_{ni,th}^2 + V_{ni,1/f}^2 = \frac{8kT\gamma}{g_{m1}} \left(1 + \frac{g_{m3}}{g_{m1}}\right) + \frac{2K_{Fn}}{W_1 L_1 C_{ox} f} \left(1 + \left(\frac{g_{m3}}{g_{m1}}\right)^2 \frac{\frac{K_{Fp}}{W_3 L_3 C_{ox} f}}{\frac{K_{Fn}}{W_1 L_1 C_{ox} f}}}\right),$$

odnosno

$$V_{ni}^2 = \frac{8kT\gamma}{\sqrt{2I_{D1}\mu_n C_{ox} (W/L)_1}} \left(1 + \sqrt{\frac{\mu_p (W/L)_3}{\mu_n (W/L)_1}}\right) + \frac{2K_{Fn}}{W_1 L_1 C_{ox} f} \left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} \frac{K_{Fp}}{K_{Fn}} \left(\frac{L_1}{L_3}\right)^2\right).$$