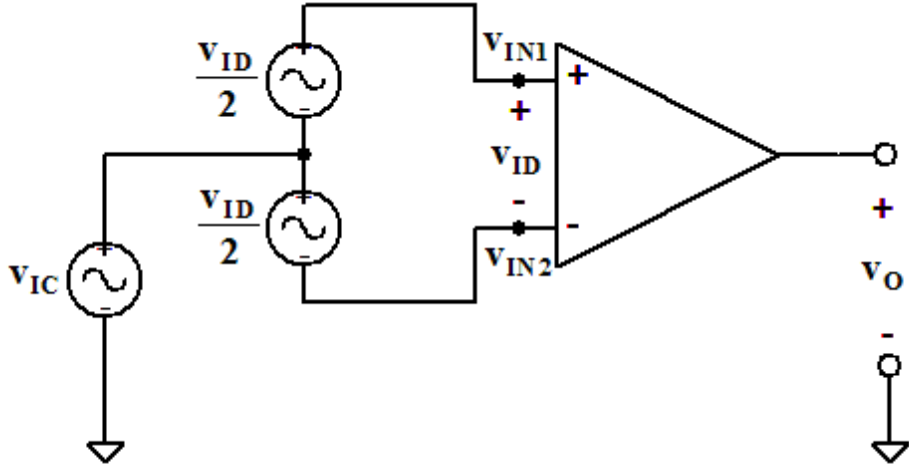


Диференциален усилвател

Парафазни и синфазни сигнали



$$v_{IN1} = v_{IC} + \frac{v_{ID}}{2} \quad v_{ID} = v_{IN1} - v_{IN2}$$

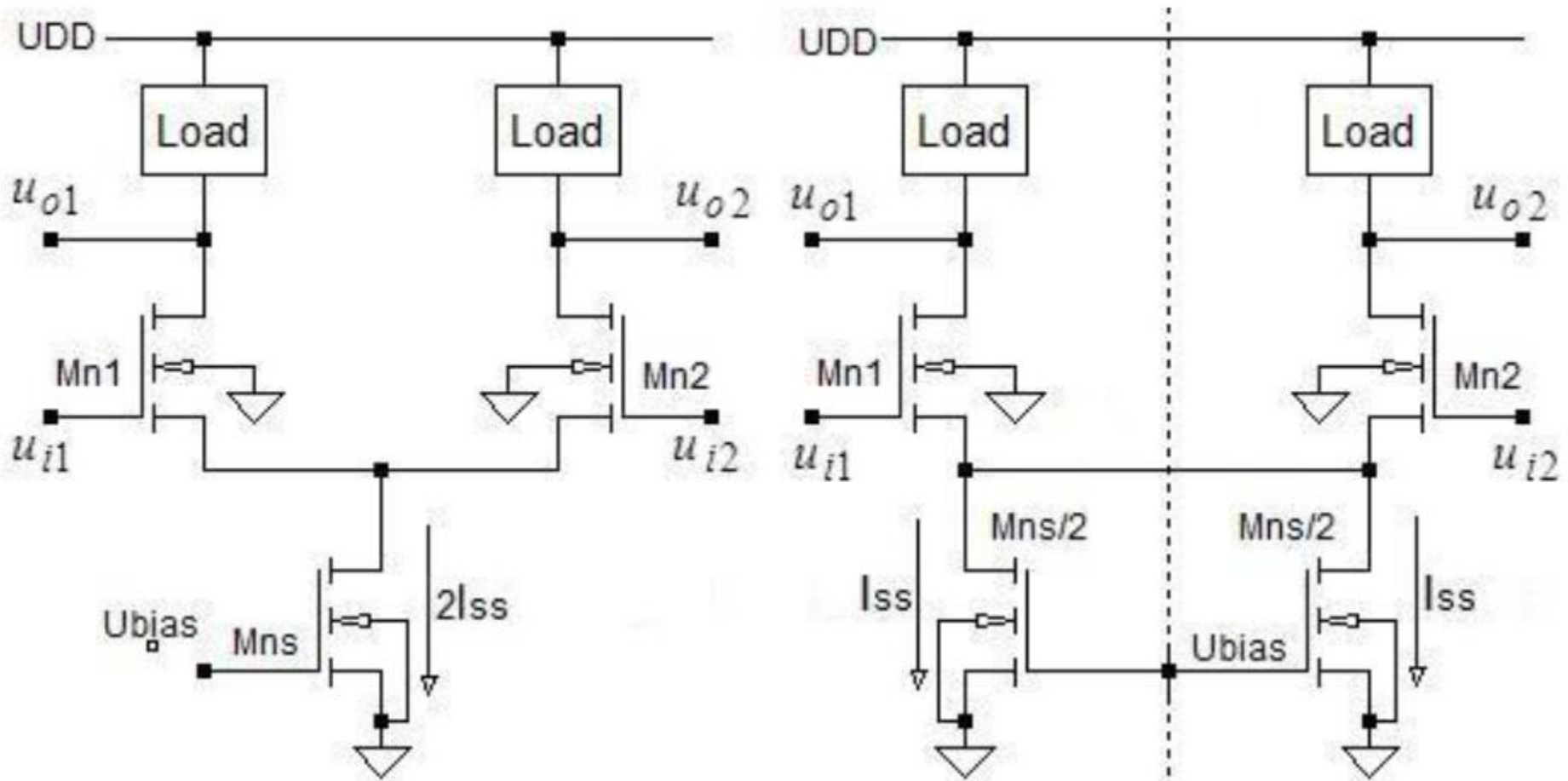
$$v_{IN2} = v_{IC} - \frac{v_{ID}}{2} \quad v_{IC} = \frac{v_{IN1} + v_{IN2}}{2}$$

Парафазни (противофазни, диференциални) сигнали – сигнали с противоположна полярност, носители на полезната информация.

Синфазни сигнали – сигнали с еднаква полярност, обикновено съдържат постояннотокова съставка (напр. за установяване на режима) и променливотокова съставка (напр. шум).

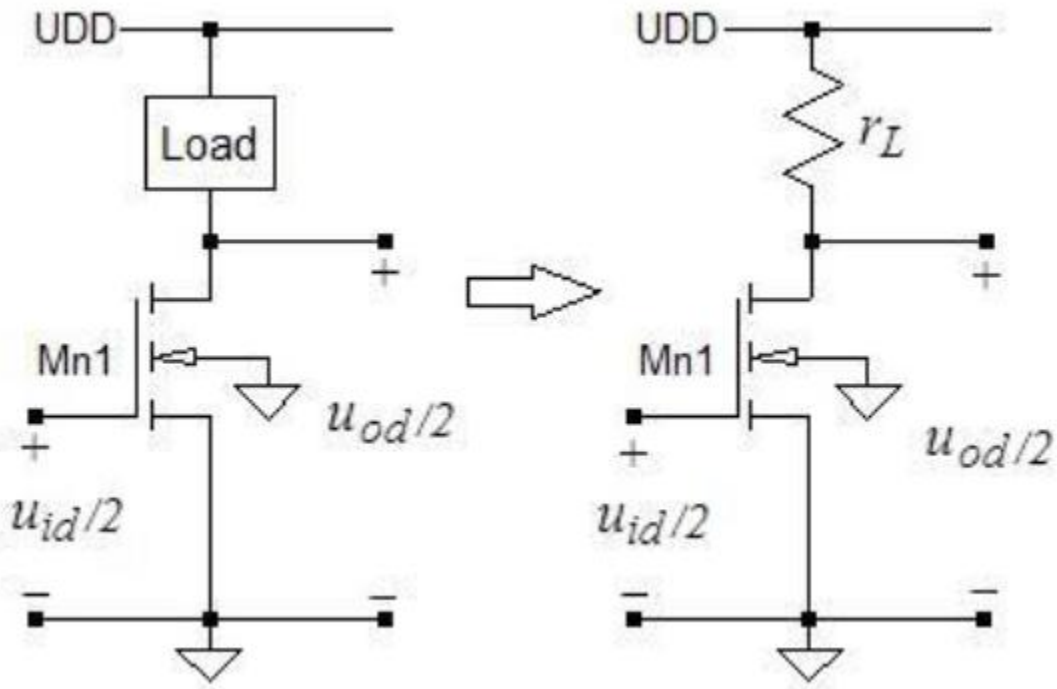
Диференциалният усилвател усилва парафазните и потиска синфазните сигнали. Използва се главно като първо стъпало в аналоговите схеми, където е необходимо да се изчисти шума.

Теорема за разделянето



Диференциален усилвател – принципна схема (в ляво) и схема за онагледяване на симетрията (в дясно) – за целта транзисторът Mns е представен чрез двата паралелни транзистора $Mns/2$, които са с два пъти по-малка широчина на канала.

Анализ за диференциални сигнали (1)

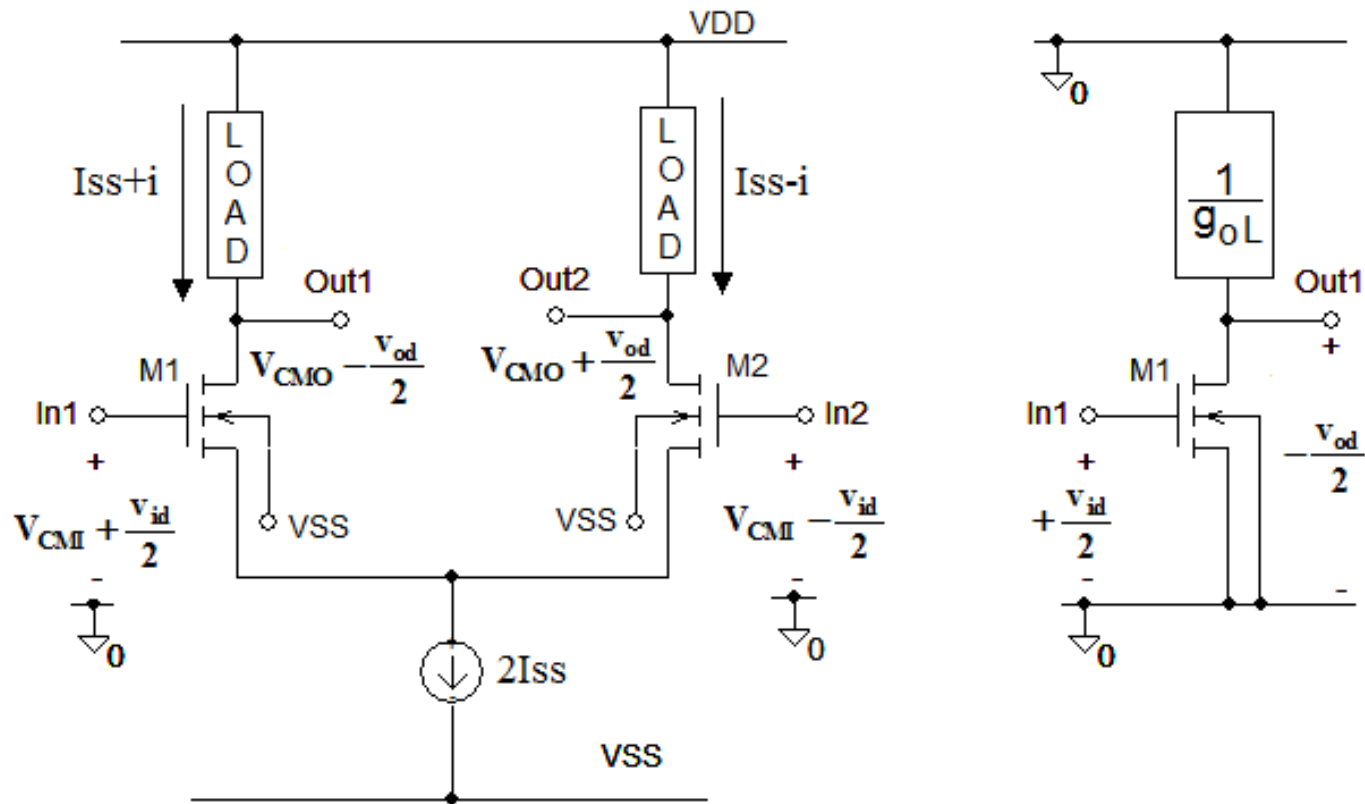


$A_{ud} = -\frac{g_{mn}}{g_{dsn} + g_L}$
$r_o = \frac{1}{g_{dsn} + g_L}$
$i_o = g_{mn} \frac{u_{id}}{2}$

Полусхема за диференциални сигнали.

Схемата съвпада с усилвателното стъпало с общ сорс.

Анализ за диференциални сигнали (2)



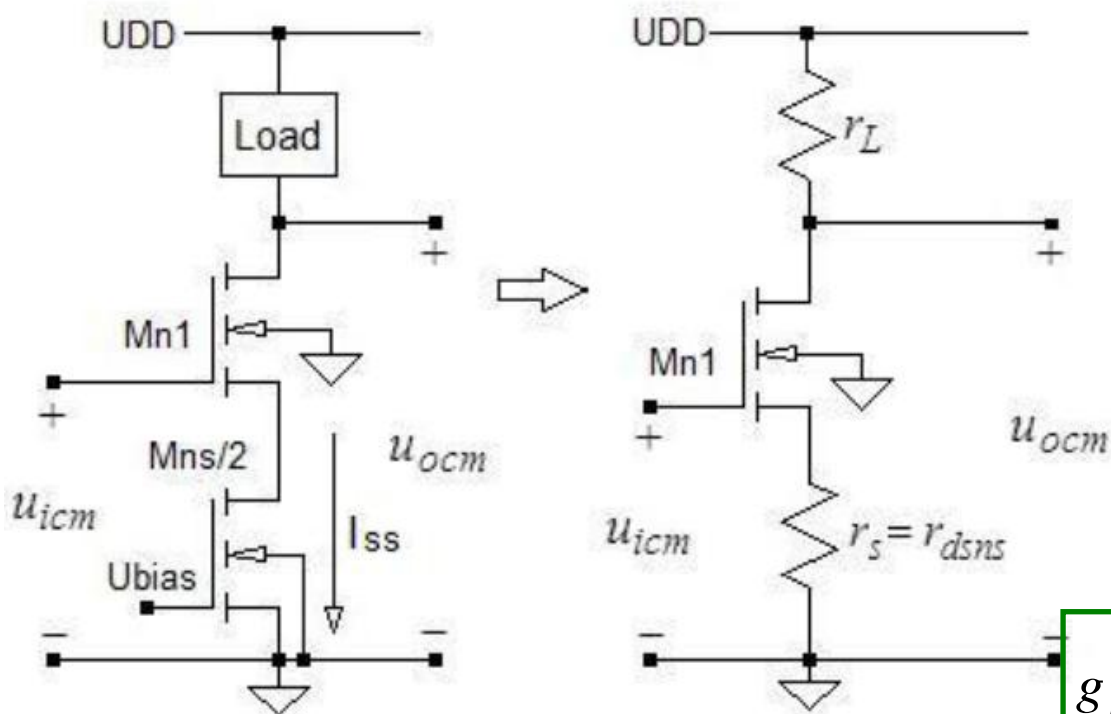
$$u_{out1} = A_{ud} \frac{u_{id}}{2} = -\frac{g_{m1}}{g_{o1} + g_{oL}} \frac{u_{id}}{2};$$

$$u_{out2} = A_{ud} \frac{-u_{id}}{2} = +\frac{g_{m2}}{g_{o2} + g_{oL}} \frac{u_{id}}{2};$$

$$u_{od} = u_{out1} - u_{out2} = -\frac{g_{m1}}{g_{o1} + g_{oL}} u_{id};$$

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = \frac{-g_{m1}}{g_{o1} + g_{oL}}$$

Анализ за синфазни сигнали (1)



$$r_s = r_{dsns} = \frac{1}{\lambda_n I_{SS}}$$

$$g_{ds-s} = \frac{g_{ds1} \cdot g_{dsns}}{g_{m1}}$$

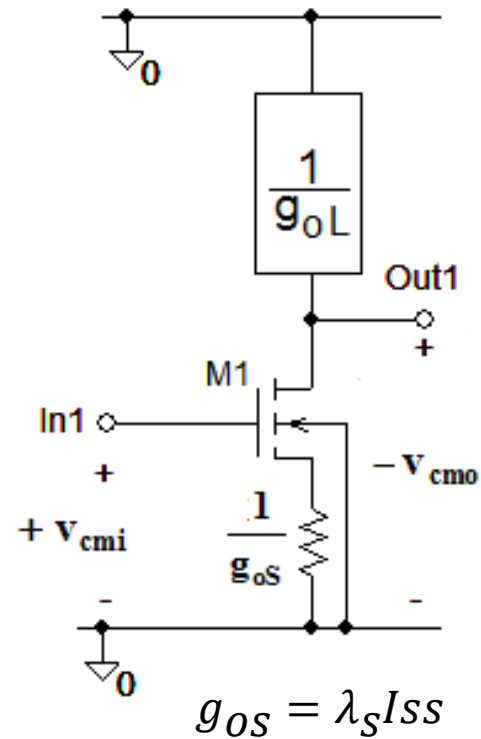
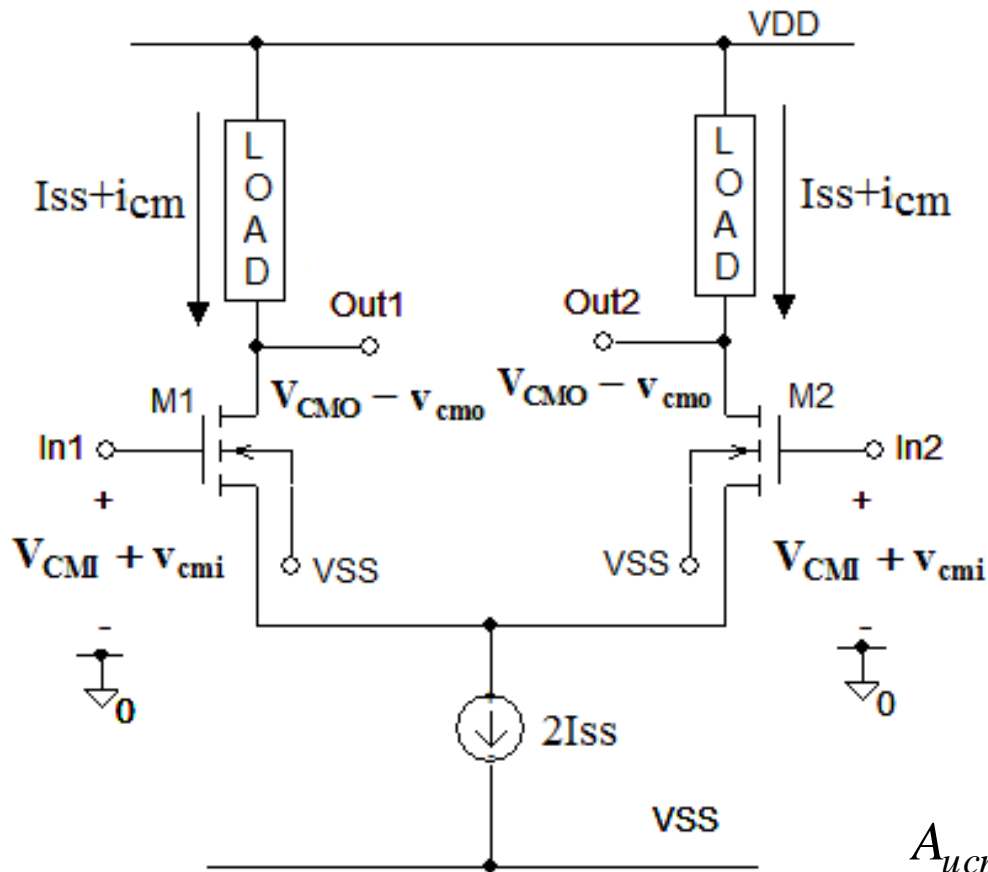
$$r_o = \frac{1}{g_{ds-s} + g_L} \approx r_L$$

$$g_{m(eff)} = \frac{g_{mn}}{1 + (g_{mn} + g_{mbn})r_s} \approx \frac{1}{r_s}$$

При $I_{SS}=20\mu A$, $\lambda_n=0,014$, $U_{eff}=0,2V$, r_L – източник на ток
 $r_s \approx 3,6M\Omega$, $g_{(ds-s)}=0,4e-9 A/V$; $r_L=2,8M\Omega$; $g_L=0,36e-6 A/V$
 $g_{mn}=0,2e-3 A/V$; $g_{mn}r_s = 0,2e-3 \cdot 3,6e+6 = 720 A/V \gg 1$
 $A_u = -0,78$

$$A_u = -g_{m(eff)}r_o \approx -\frac{r_L}{r_s}$$

Анализ за синфазни сигнали (2)



$$g_{oS} = \lambda_S I_{SS}$$

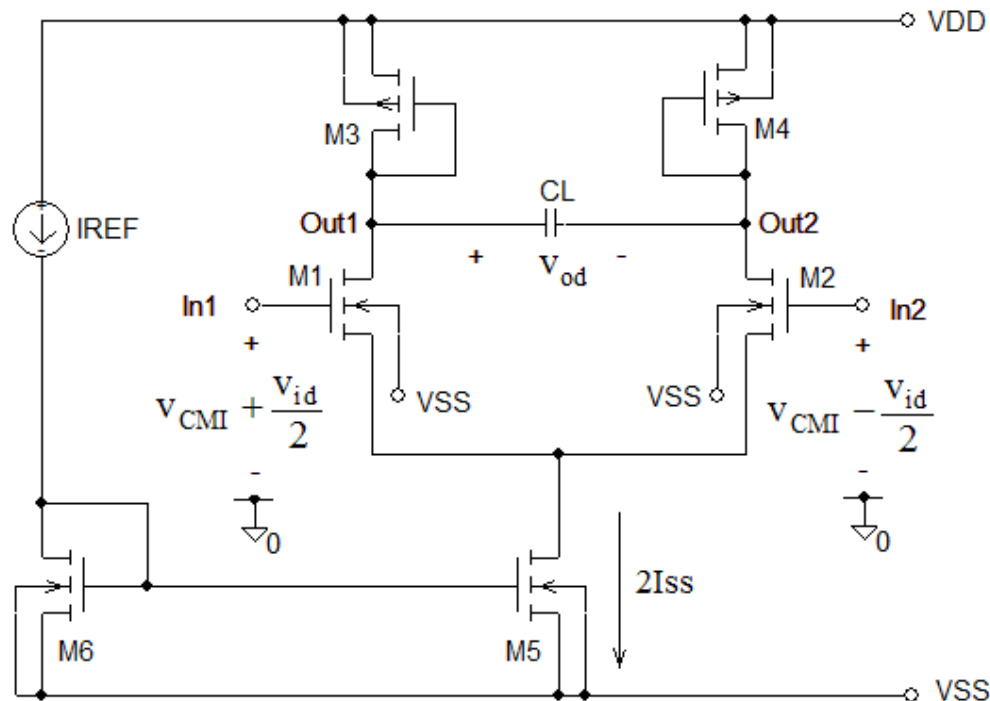
$$A_{ucm} = -\frac{g_{oS}}{g_{oL}}; \quad r_{out} \approx \frac{1}{g_{oL}}$$

$$v_{out1} = A_{ucm} v_{cmi} = -\frac{g_{oS}}{g_{oL}} v_{cmi};$$

$$v_{out2} = A_{ucm} v_{cmi} = -\frac{g_{oS}}{g_{oL}} v_{cmi};$$

$$v_{cmo} = v_{out1} - v_{out2} = 0$$

Анализ на ДУ със симетричен изход и нискоомен товар (1)



$$W_6 = W_5 = 20\mu m \quad L = 2\mu m$$

$$W_1 = W_2 = 10\mu m \quad L = 2\mu m$$

$$W_3 = W_4 = 25\mu m \quad L = 2\mu m$$

$$C_L = 10pF$$

$$I_{REF} = 20\mu A$$

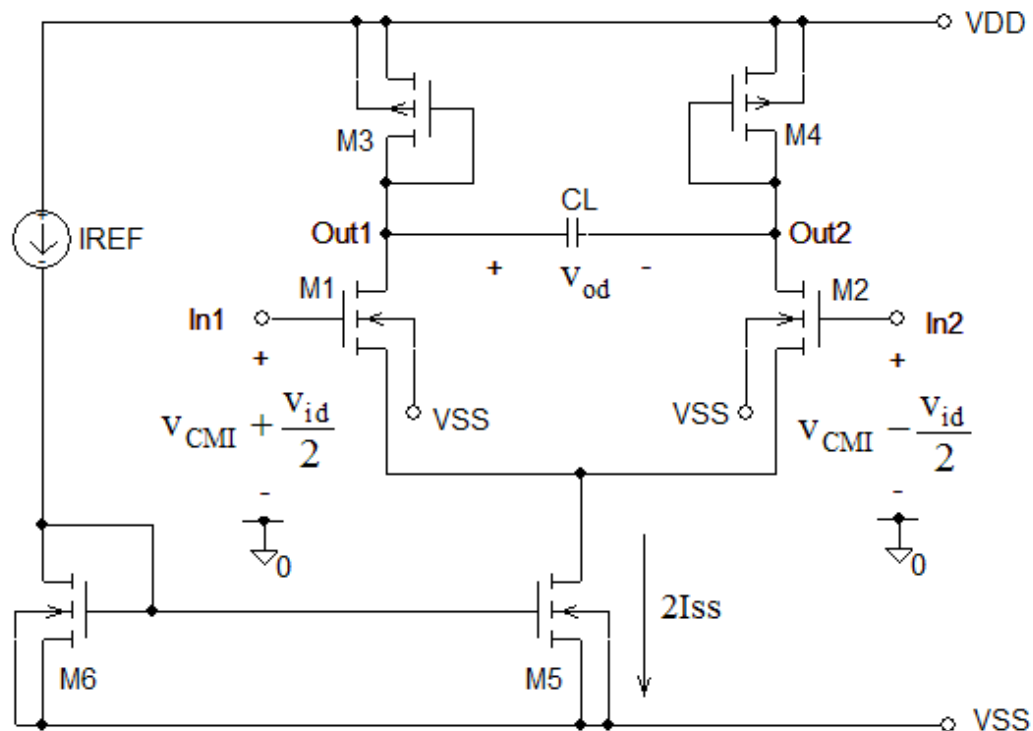
$$I_{SS} = \frac{I_{REF} \left(\frac{W_5/L_5}{W_6/L_6} \right)}{2} = 10\mu A$$

M3 и M4 – активни резистори $\rightarrow g_{oL} = g_{ds3} = g_{ds4} = g_{m3} = g_{m4}$

$$g_{m3} = g_{m4} = \sqrt{2K_p \frac{W_3}{L_3} I_{SS}} = 100 \frac{\mu A}{V}$$

$$A_{ud} = -\frac{g_{m1}}{g_{o1} + g_{m3}} \approx -\frac{g_{m1}}{g_{m3}} = -\sqrt{\frac{2K_n \frac{W_1}{L_1} I_{SS}}{2K_p \frac{W_3}{L_3} I_{SS}}} = -\sqrt{\frac{K_n \frac{W_1}{L_1}}{K_p \frac{W_3}{L_3}}} = \sqrt{\frac{100e-6 \cdot 10\mu m}{40e-6 \cdot 25\mu m}} = 1$$

Анализ на ДУ със симетричен изход и нискоомен товар (2)



$$W_6 = W_5 = 20\mu m \quad L = 2\mu m$$

$$W_1 = W_2 = 10\mu m \quad L = 2\mu m$$

$$W_3 = W_4 = 25\mu m \quad L = 2\mu m$$

$$C_L = 10pF$$

$$I_{REF} = 20\mu A$$

$$I_{SS} = \frac{I_{REF} \left(\frac{W_5/L_5}{W_6/L_6} \right)}{2} = 10\mu A$$

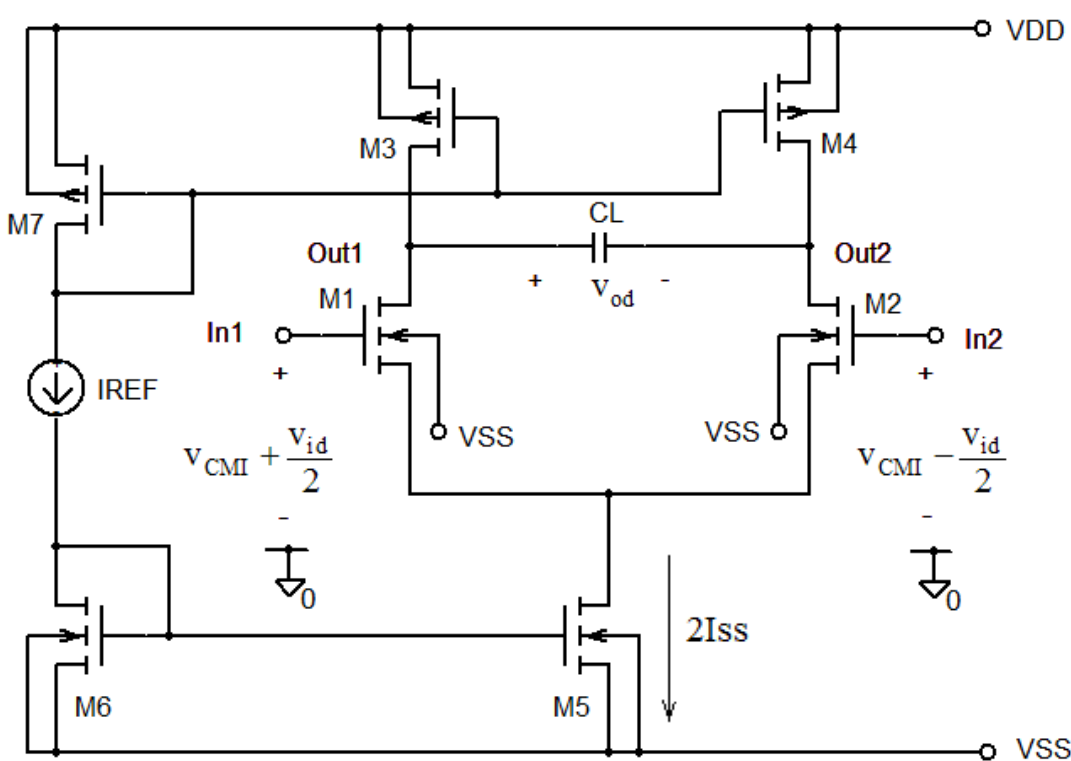
M3 и M4 – активни резистори $\rightarrow g_{oL} = g_{ds3} = g_{ds4} = g_{m3} = g_{m4}$

$$g_{m3} = g_{m4} = \sqrt{2K_p \frac{W_3}{L_3} I_{SS}} = 100 \frac{\mu A}{V}$$

$$g_{os} = \frac{g_{o5}}{2} = \lambda_5 I_{SS}$$

$$A_{ucm} = -\frac{g_{os}}{g_{oL}} = -\frac{\lambda_5 \cdot I_{SS}}{g_{m3}} = -\frac{0,014 \cdot 10e-6}{100e-6} \approx -0,0014$$

Анализ на ДУ със симетричен изход и високоомен товар (1)



$$W_6 = W_5 = 20\mu\text{m} \quad W_1 = W_2 = 10\mu\text{m}$$

$$W_3 = W_4 = 25\mu\text{m} \quad W_7 = 50\mu\text{m}$$

$$L = 2\mu\text{m} \quad C_L = 10\text{pF} \quad I_{REF} = 20\mu\text{A}$$

$$I_{SS} = \frac{I_{REF} \left(\frac{W_5/L_5}{W_6/L_6} \right)}{2} = 10\mu\text{A}$$

M3 и M4 – източници на ток

$$g_{oL} = g_{ds3} = g_{ds4} = \lambda_3 I_{SS} = \lambda_4 I_{SS}$$

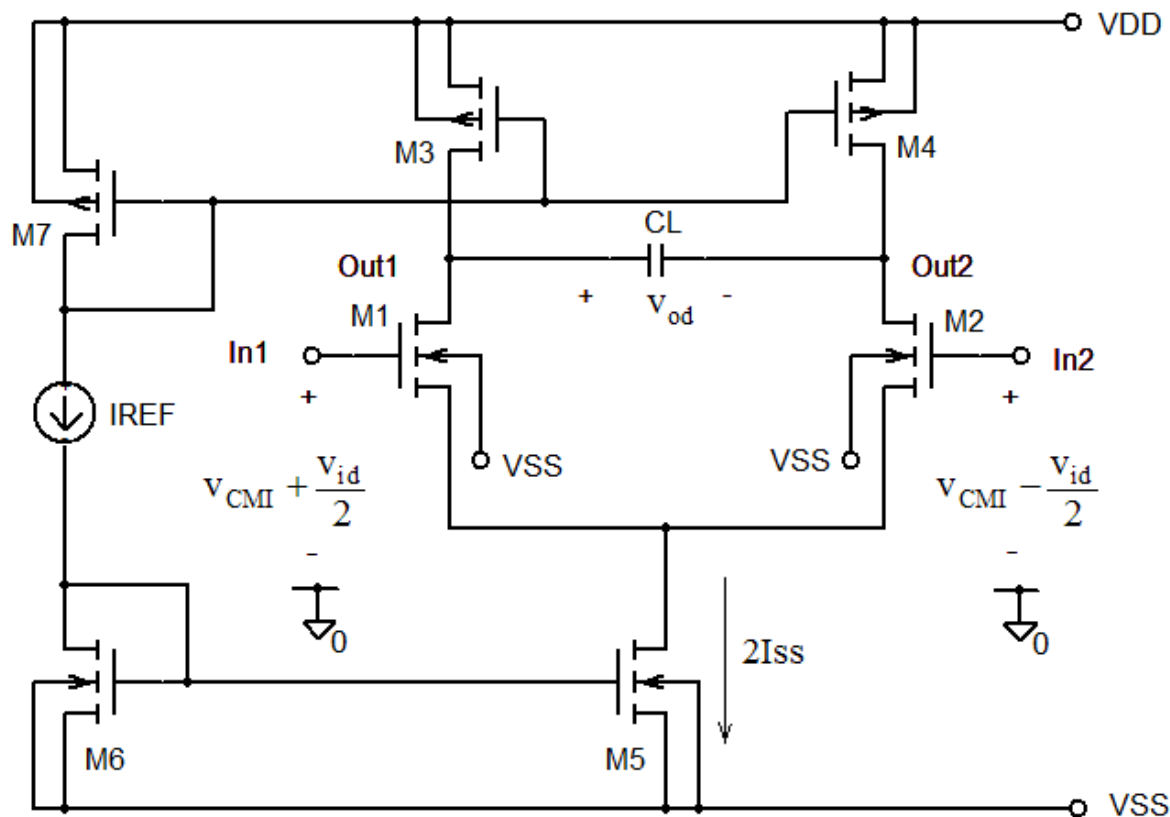
$$g_{os} = \frac{g_{o5}}{2} = \lambda_5 I_{SS}$$

$$A_{ud} = -\frac{g_{m1}}{g_{o1} + g_{o3}} = -\frac{\sqrt{2Kn \frac{W_1}{L_1} I_{SS}}}{(\lambda_1 + \lambda_3) I_{SS}} = -\frac{\sqrt{2 \cdot 100e-6 \frac{10}{2} 10e-6}}{(0,014 + 0,018) \cdot 10e-6} = -\frac{100}{0,32} = -312,5$$

$$BW = \frac{1}{2\pi r_{out} C_{Load}} \approx \frac{g_{o1} + g_{o3}}{2\pi(2C_L)} = \frac{g_{o1} + g_{o3}}{4\pi C_L} = \frac{0,32e-6}{4\pi 10e-12} = 2546,5\text{Hz}$$

$$GBW \approx |A_u| \cdot BW = 795,774\text{kHz}$$

Анализ на ДУ със симетричен изход и високоомен товар (2)



$$W_6 = W_5 = 20\mu m$$

$$W_1 = W_2 = 10\mu m$$

$$W_3 = W_4 = 25\mu m$$

$$W_7 = 50\mu m$$

$$L = 2\mu m \quad C_L = 10pF$$

$$I_{REF} = 20\mu A$$

$$I_{SS} = \frac{I_{REF} \left(\frac{W_5/L_5}{W_6/L_6} \right)}{2} = 10\mu A$$

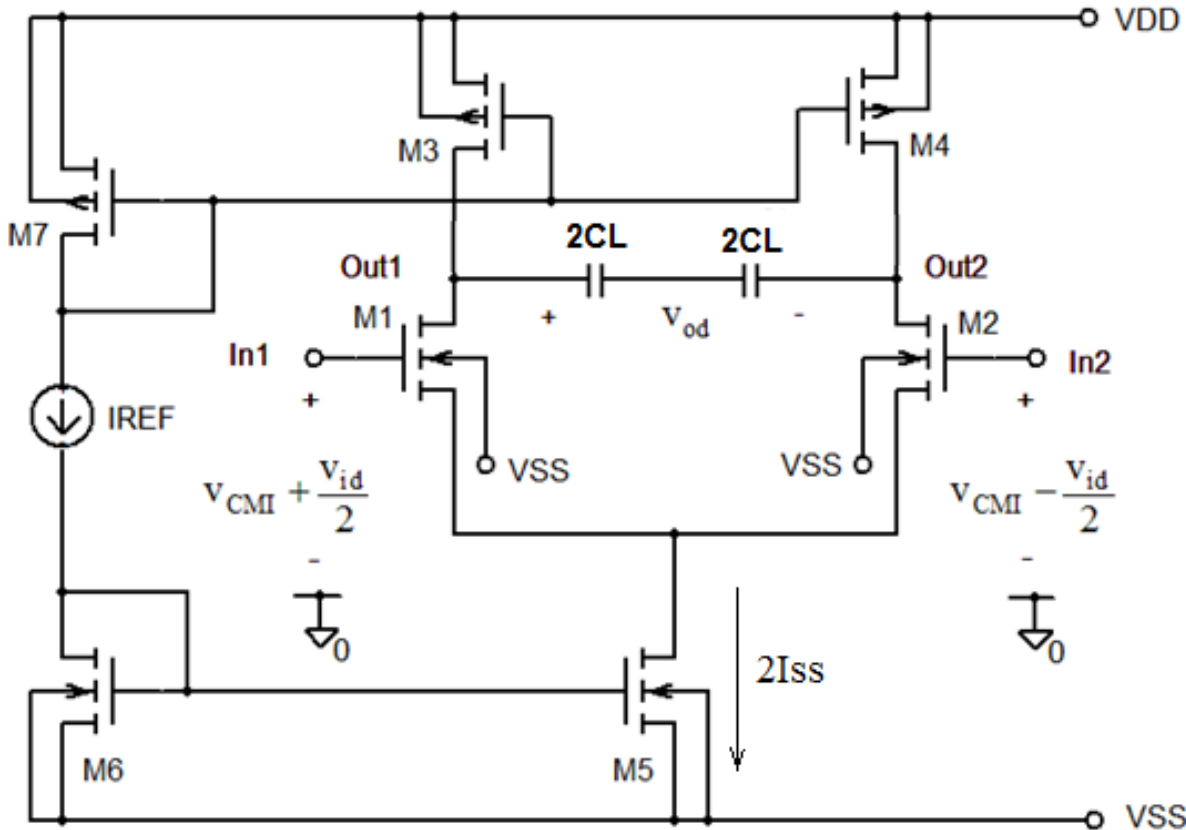
$$g_{os} = \frac{g_{o5}}{2} = \lambda_5 I_{SS}$$

M3 и M4 – източници на ток

$$g_{oL} = g_{ds3} = g_{ds4} = \lambda_3 I_{SS} = \lambda_4 I_{SS}$$

$$A_{u_{cm}} = -\frac{g_{os}}{g_{oL}} = -\frac{\lambda_5 \cdot I_{SS}}{\lambda_3 I_{SS}} = -\frac{\lambda_5}{\lambda_3} = \frac{0,014}{0,018} = -0,78$$

Проектиране на ДУ със симетричен изход и високоомен товар (1)



Дадено: $C_L = 10 \text{ pF}$;
 $GBW = 1 \text{ MHz}$;
 $K_n = 100 \mu\text{A}/\text{V}^2$;
 $K_p = 40 \mu\text{A}/\text{V}^2$;
 $U_{eff} = 0,2 \text{ V}$

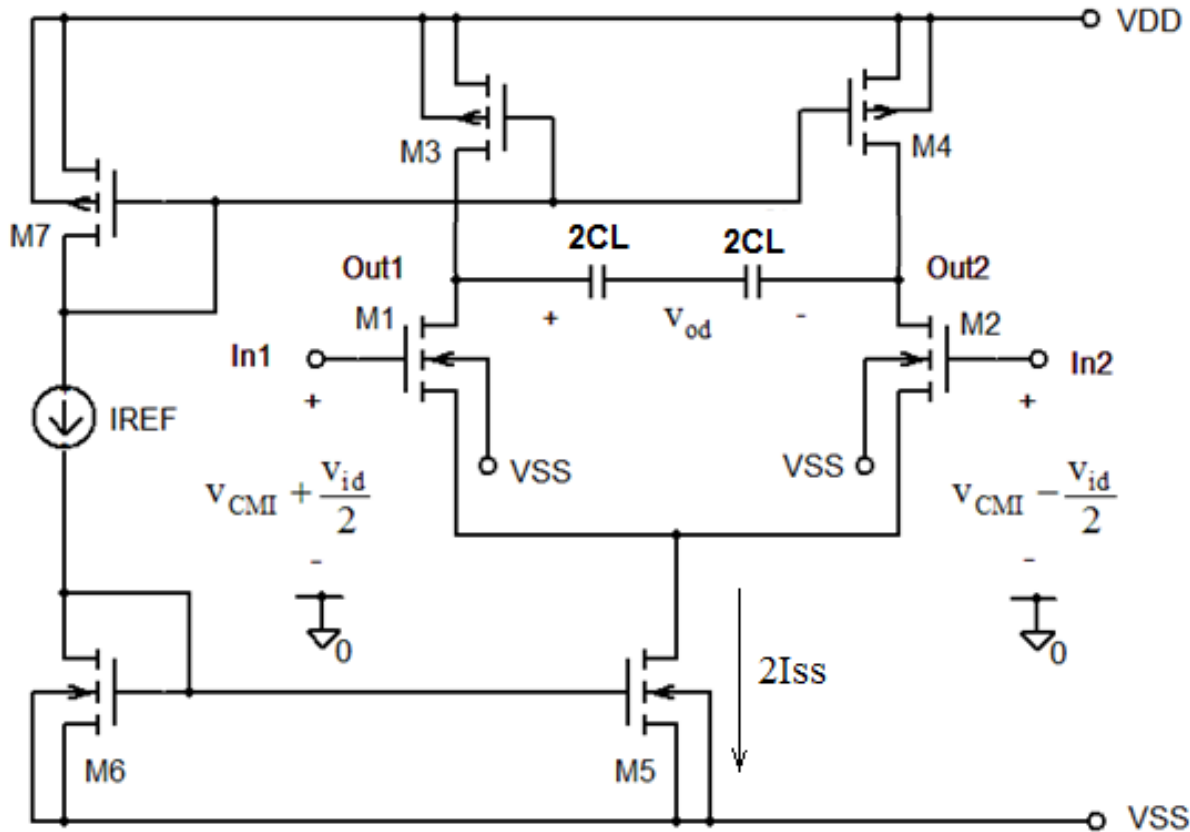
Да се определят: I_{REF} ; $\frac{W}{L}$;
 A_u ; BW

Оразмеряване на схемата:

$$GBW = |A_u| \cdot BW = \frac{g_{m1}}{4\pi C_L} \quad g_{m1} \approx 4\pi C_L \cdot GBW \approx 0,126 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$g_{m1} = \frac{2I_{ss}}{U_{eff}} \quad 2I_{ss} = g_{m1} U_{eff} = 25,2 \mu\text{A} \quad \text{Избираме: } 2I_{ss} = 30 \mu\text{A}; \quad I_{REF} = 10 \mu\text{A}$$

Проектиране на ДУ със симетричен изход и високоомен товар (2)



Дадено: $CL=10\text{pF}$;
 $GBW=1\text{ MHz}$;
 $K_n=100\mu\text{A}/\text{V}^2$;
 $K_p=40\mu\text{A}/\text{V}^2$;
 $U_{eff}=0,2\text{V}$

Да се определят: I_{REF} ; $\frac{W}{L}$;
 A_u ; BW

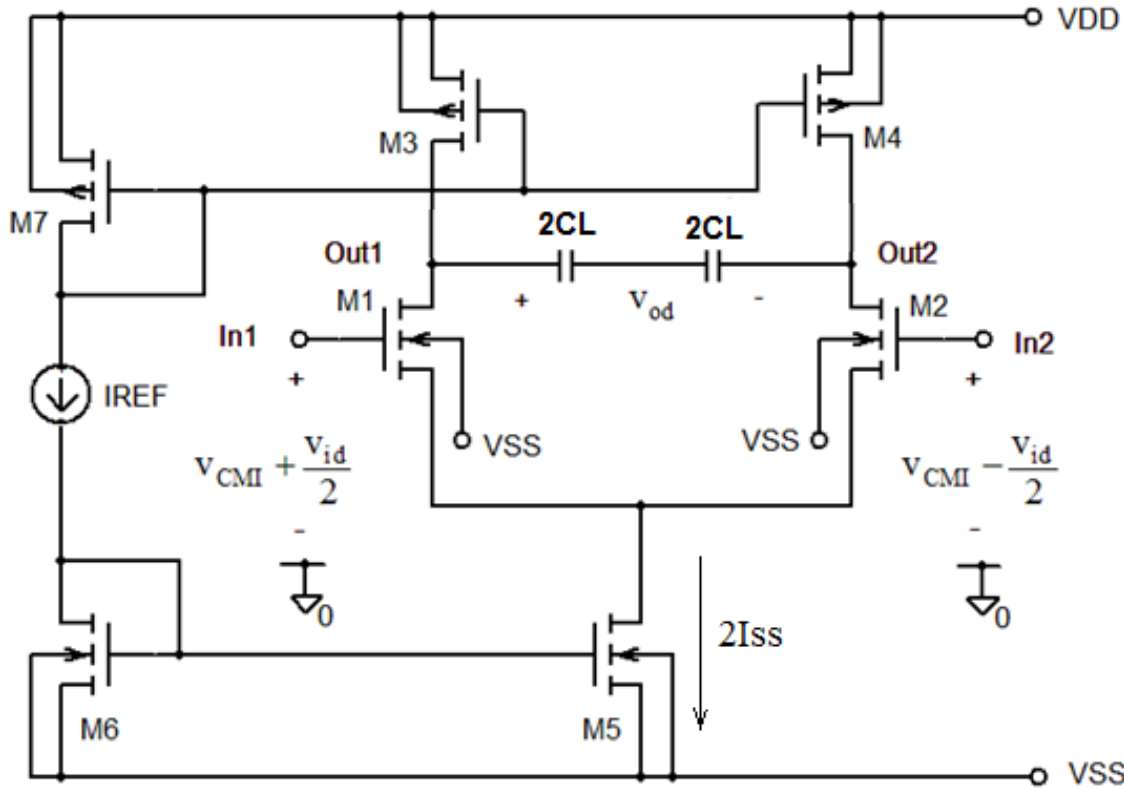
$$I_{REF} = I_{D6} = I_{D7} = 10\mu\text{A} \quad I_{D5} = 2I_{SS} = 30\mu\text{A} \quad I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = 15\mu\text{A}$$

$$I_D = \frac{KW}{2L} U_{eff}^2 \quad W = \frac{2L}{KU_{eff}^2} I_D, \mu\text{m}$$

nMOS $K_n=100\mu\text{A}/\text{V}^2$ $W6/L6=10/2$ $W5/L5=30/2$ $W1/L1=W2/L2=15/2$

pMOS $K_p=40\mu\text{A}/\text{V}^2$ $W7/L7=25/2$ $W3/L3=W4/L4=37,5/2$

Проектиране на ДУ със симетричен изход и високоомен товар (3)



$$2I_{ss} = 30\mu\text{A}; \quad I_{REF} = 10\mu\text{A}$$

$$W_1/L_1 = W_2/L_2 = 15/2$$

$$W_3/L_3 = W_4/L_4 = 37,5/2$$

$$W_5/L_5 = 30/2$$

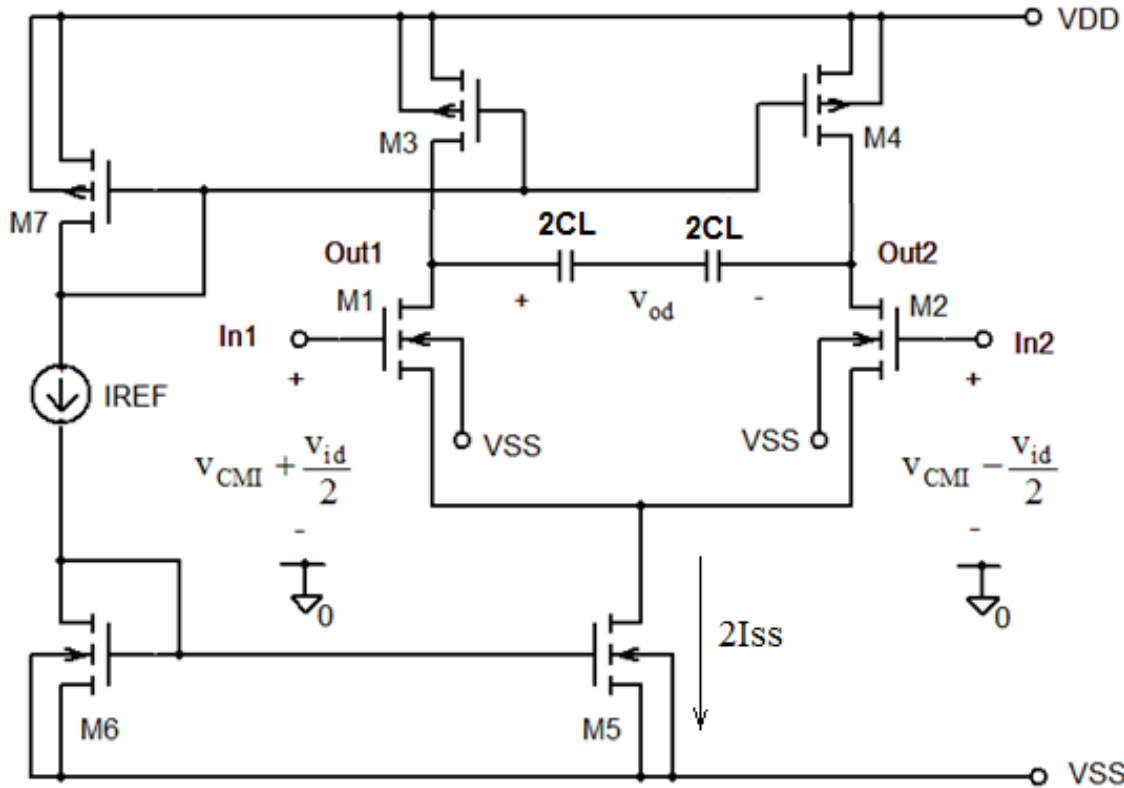
$$W_6/L_6 = 10/2$$

$$W_7/L_7 = 25/2$$

$$A_{ud} = -\frac{g_{m1}}{g_{o1} + g_{o3}} = -\frac{\sqrt{2Kn \frac{W_1}{L_1} I_{ss}}}{(\lambda_1 + \lambda_3) I_{ss}} = -\frac{\sqrt{2 \cdot 100e-6 \cdot \frac{15}{2} \cdot 15e-6}}{(0,014 + 0,018) \cdot 15e-6} = -\frac{150}{0,48} = -312,5 \text{ (49,9 dB)}$$

$$A_{ud} = -\frac{g_{m1}}{g_{o1} + g_{o3}} = -\frac{2I_{ss}/U_{eff}}{(\lambda_1 + \lambda_3) I_{ss}} = -\frac{2}{(\lambda_1 + \lambda_3) U_{eff}} = -\frac{2}{(0,014 + 0,018) \cdot 0,2} = -312,5 \text{ (49,9 dB)}$$

Проектиране на ДУ със симетричен изход и високоомен товар (4)



$$2I_{SS} = 30\mu A; I_{REF} = 10\mu A$$

$$W1/L1 = W3/L3 = 15/2$$

$$W3/L3 = W4/L4 = 37,5/2$$

$$W5/L5 = 30/2$$

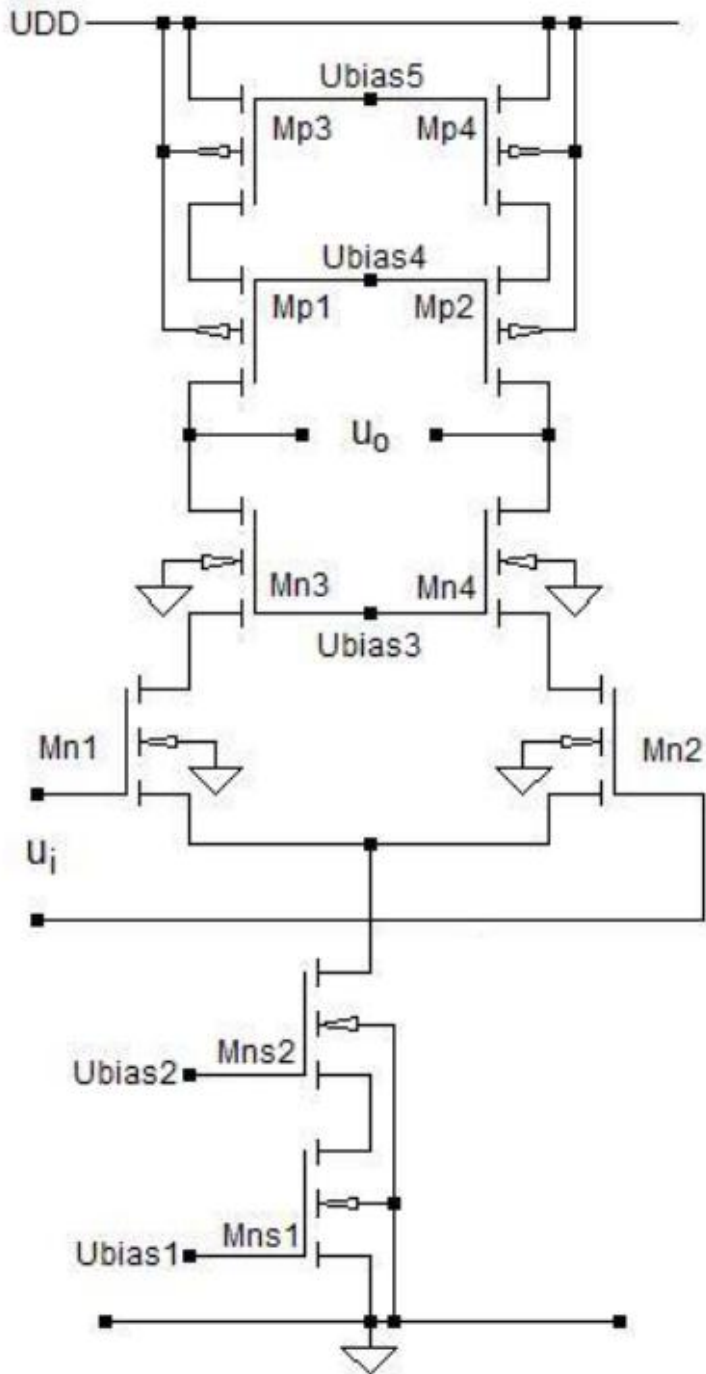
$$W6/L6 = 10/2$$

$$W7/L7 = 25/2$$

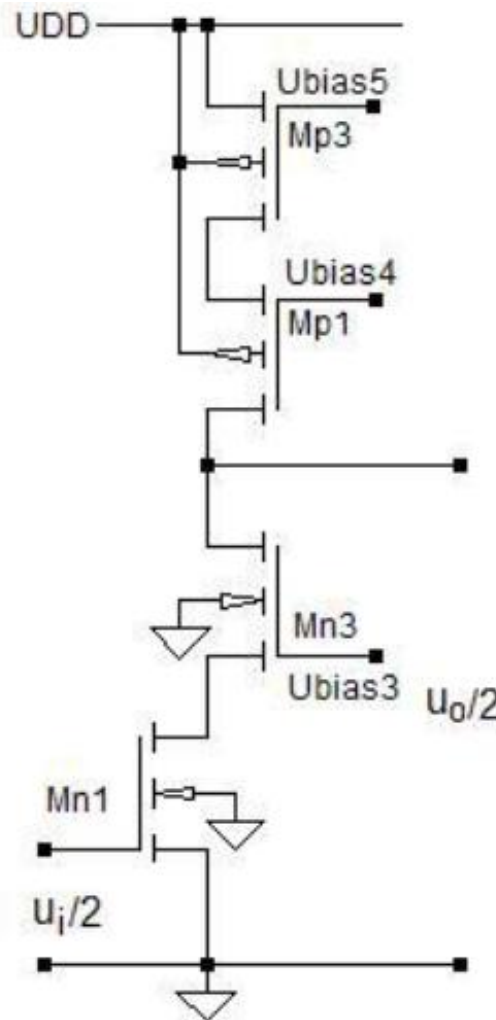
$$BW = \frac{g_{o1} + g_{o3}}{4\pi C_L} = \frac{(\lambda_n + \lambda_p) I_{SS}}{4\pi C_L} = \frac{0,032 \cdot 15e-6}{4\pi 10e-12} = 3820 \text{ Hz}$$

$$GBW = |A_v| \cdot BW = 312,5 \cdot 3820 \approx 1,2 \text{ MHz}$$

Каскоден дифференциален усилвател (1)



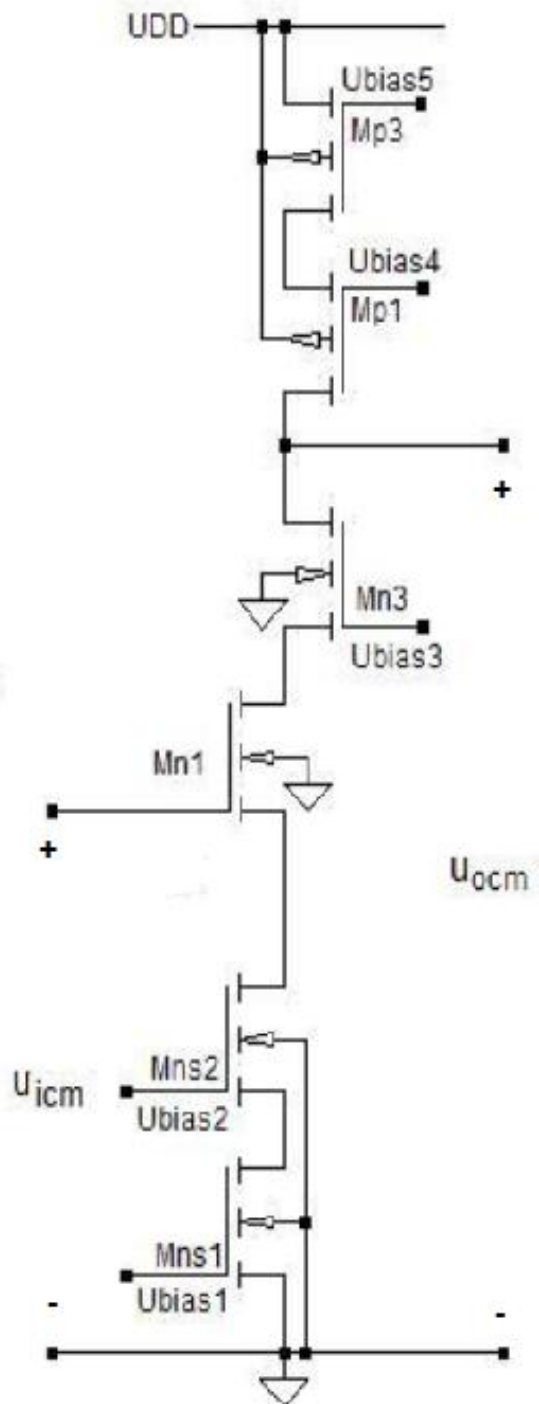
$$|A_{ud}| = g_{mn1}(r_{on3-1} \parallel r_L) = \frac{g_{mn1}}{g_{on3-1} + g_L} \gg 1$$



$$g_L = \frac{1}{g_{mp1} r_{dsp1} r_{dsp3}} = \frac{g_{dsp1} g_{dsp3}}{g_{mp1}}$$

$$g_{on3-1} = \frac{1}{g_{mn3} r_{dsn1} r_{dsn3}} = \frac{g_{dsn1} g_{dsn3}}{g_{mn3}}$$

Каскоден дифференциален усилвател (2)



$$A_{ucm} = -g_{mn1(eff)}(r_{on3-ns1} \parallel r_L)$$

$$r_L = g_{mp1} r_{dsp1} r_{dsp3} = \frac{g_{mp1}}{g_{dsp1} g_{dsp3}}$$

$$r_{on3-ns1} \rightarrow \infty \quad r_{on3-ns1} \gg r_L$$

$$g_{mn1(eff)} = \frac{g_{mn1}}{1 + (g_{mn1} + g_{mbn1})r_s}$$

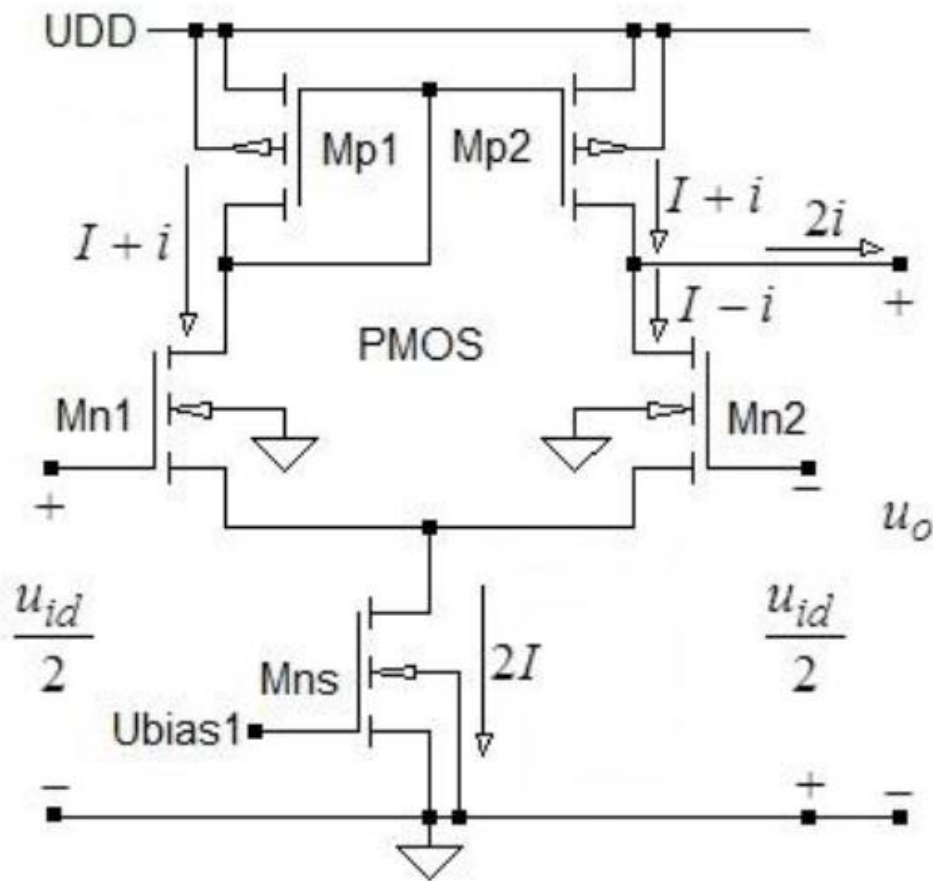
$$r_s = g_{mns2} r_{dsns2} r_{dsns1} = \frac{g_{mns2}}{g_{dsns2} g_{dsns1}}$$

$$g_{mn1} \gg g_{mbn1} \quad 1 \ll g_{mn1} r_s$$

$$A_{ucm} = -g_{mn1(eff)}(r_{on3-ns1} \parallel r_L) \approx -\frac{r_L}{r_s}$$

$$A_{ucm} = -\frac{r_L}{r_s} = -\frac{g_{mp1}}{g_{dsp1} g_{dsp2}} \frac{g_{dsn2} g_{dsn1}}{g_{mns2}} \approx -\frac{\lambda_n^2}{\lambda_p^2}$$

Диференциален усилвател с токово огледало (1)

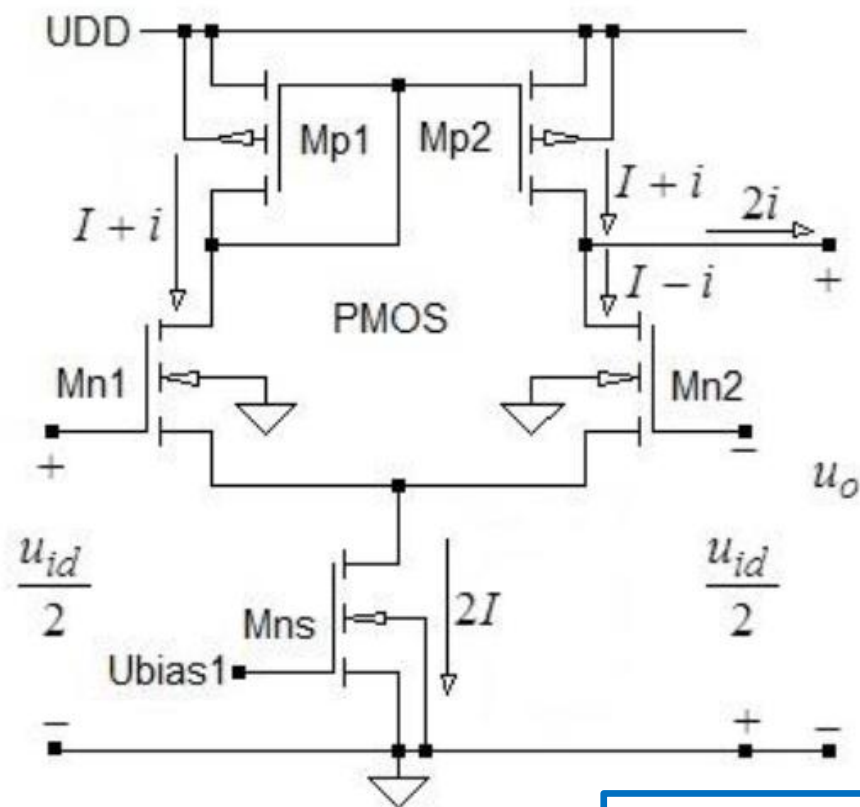


Модифициран интуитивен анализ
(отчита постоянната и променливата съставки на тока):

1. Нанасяме постоянните токове с техните реални посоки.
2. Добавяме или изваждаме променливата съставка на тока, предизвикана от входното напрежение.
3. Определяме променливата съставка на изходния ток, който тече през изходното съпротивление на схемата.

4. Произведението между тока и изходното съпротивление определя изходното напрежение.

Диференциален усилвател с токово огледало (2)



$$i = g_{mn} \frac{u_{id}}{2}$$

$$i_o = I + i - (I - i) = 2i = g_{mn} u_{id}$$

$$r_o = \frac{1}{g_{dsn2} + g_{dsp2}}$$

$$u_o = i_o r_o = \frac{2i}{g_{dsn2} + g_{dsp2}} = \frac{g_{mn} u_{id}}{g_{dsn2} + g_{dsp2}}$$

$$A_{ud} = \frac{u_o}{u_{id}} = \frac{g_{mn}}{g_{dsn2} + g_{dsp2}}$$

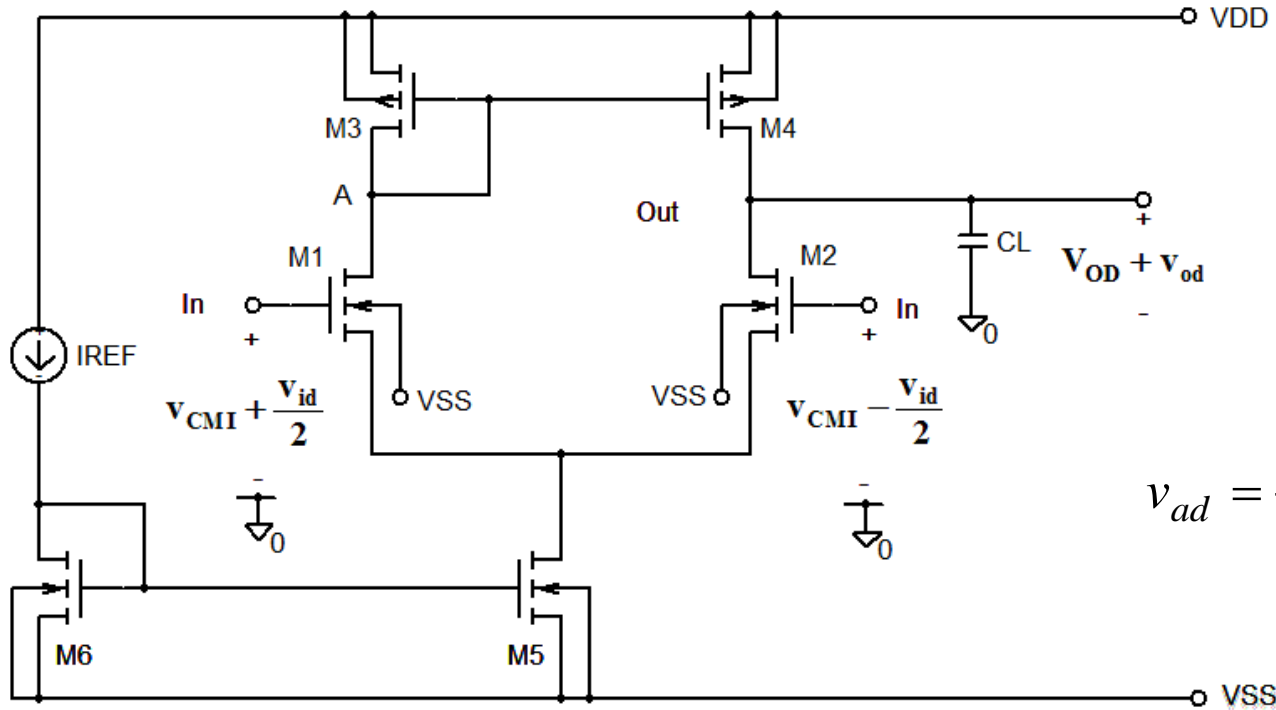
При анализ \Rightarrow

$$A_{ud} = -\frac{g_{mn}}{g_{dsn2} + g_{dsp2}} = -\frac{\sqrt{2K_n \frac{W_n}{L_n} I}}{(\lambda_n + \lambda_p) I} = -\frac{\sqrt{2K_n \frac{W_n}{L_n}}}{(\lambda_n + \lambda_p) \sqrt{I}}$$

При проектиране \Rightarrow

$$A_{ud} = -\frac{g_{mn}}{g_{dsn2} + g_{dsp2}} = -\frac{2I/U_{eff}}{(\lambda_n + \lambda_p) I} = -\frac{2}{(\lambda_n + \lambda_p) U_{eff}}$$

Дифференциален усилвател с токово огледало (3)



$$g_{oL3} \approx g_{m3} = g_{m4};$$

$$g_{oL4} \approx g_{o4};$$

$$g_{m1} = g_{m2};$$

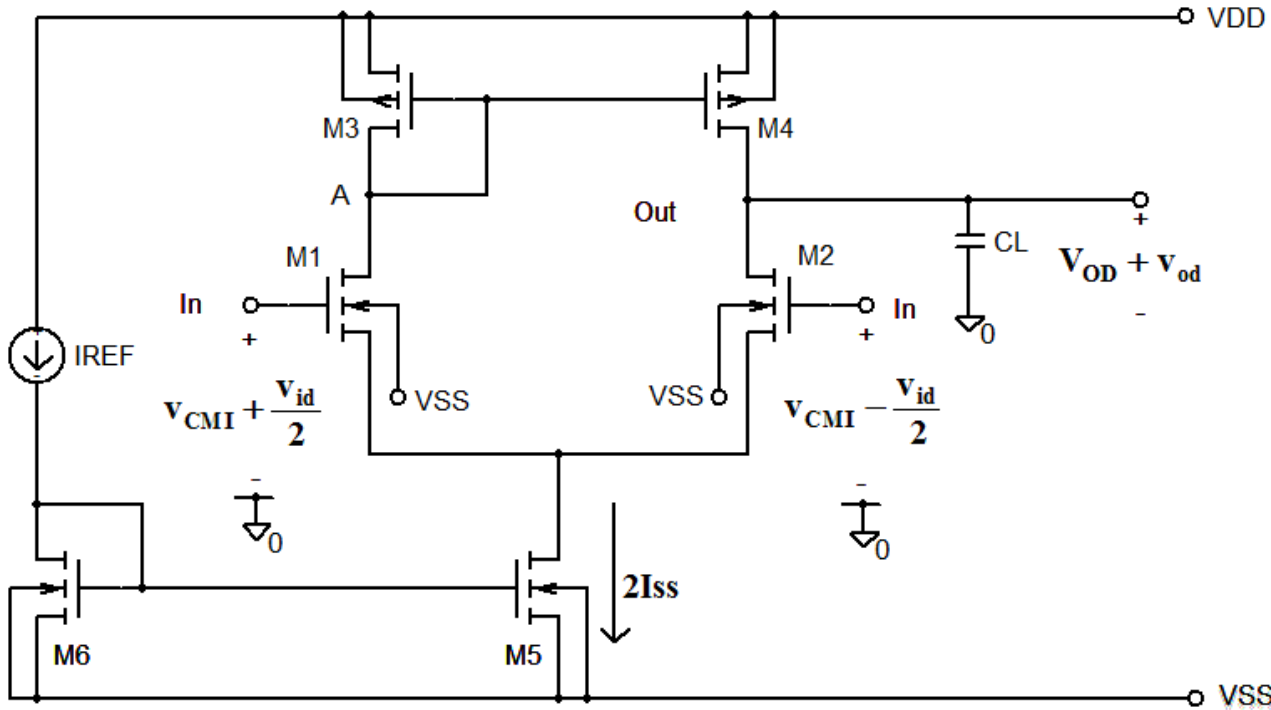
$$g_{o1} = g_{o2}.$$

$$v_{ad} = \frac{-g_{m1}}{g_{m3} + g_{o1}} \frac{v_{id}}{2} \approx \frac{-g_{m1}}{g_{m3}} \frac{v_{id}}{2}$$

$$v_{od} = \frac{-g_{m4}}{g_{o4} + g_{o2}} v_{ad} + \frac{-g_{m2}}{g_{o2} + g_{o4}} \frac{-v_{id}}{2} = \frac{g_{m1}}{g_{o4} + g_{o2}} \frac{v_{id}}{2} + \frac{g_{m2}}{g_{o2} + g_{o4}} \frac{v_{id}}{2} = \frac{g_{m2}}{g_{o2} + g_{o4}} v_{id}$$

$$A_{ud} = \frac{g_{m2}}{g_{o4} + g_{o2}}; \quad r_{out} \approx \frac{1}{g_{o4} + g_{o2}}; \quad BW = \frac{g_{o4} + g_{o2}}{2\pi C_L}; \quad GBW = \frac{g_{m2}}{2\pi C_L}.$$

Оразмеряване на ДУ с токово огледало (1)



Дадено:

$$C_L = 10 \text{ pF}; V_o = 1 \text{ V};$$

$$f_{\text{max}} = 250 \text{ kHz}; U_{\text{eff}} = 0.2 \text{ V}$$

Да се определят:

$I_{\text{REF}}, W/L, A_u, \text{BW}, \text{GBW}$

Решение:

$$SR > 2\pi f_{\text{max}} V_o$$

$$SR = \frac{2I_{\text{ss}}}{C_L}$$

$$2I_{\text{ss}} \geq 2\pi f_{\text{max}} V_o C_L = 15,7 \mu\text{A}$$

Избираме $I_{\text{ss}} = 8 \mu\text{A}; I_{\text{REF}} = 10 \mu\text{A}$

Оразмеряване на транзисторите:

$$I_D = \frac{KW}{2L} U_{\text{eff}}^2$$

$$W = \frac{2L}{K U_{\text{eff}}^2} I_D, \mu\text{m}$$

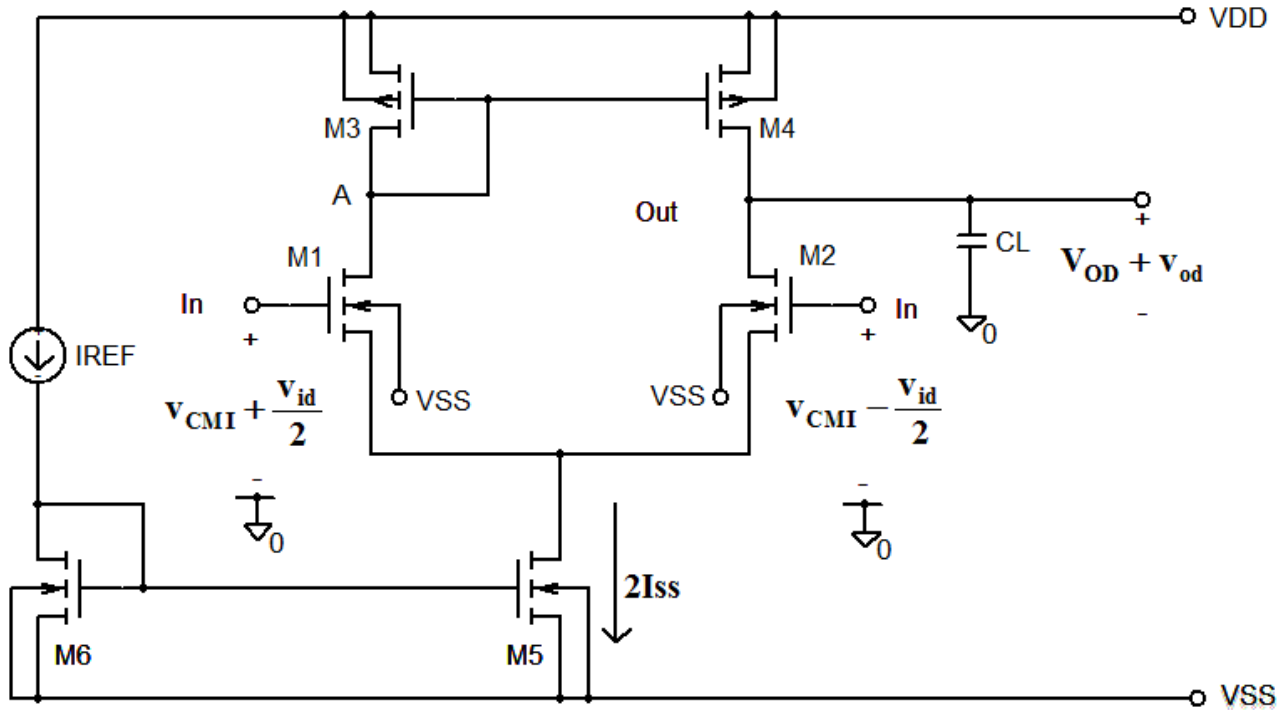
$$W_1/L_1 = W_2/L_2 = 8/2$$

$$W_3/L_3 = W_4/L_4 = 20/2$$

$$W_6/L_6 = 10/2$$

$$W_5/L_5 = 16/2$$

Оразмеряване на ДУ с токово огледало (2)



Дадено:

$C_L = 10\text{pF}$; $V_o = 1\text{V}$;
 $f_{\text{max}} = 250\text{kHz}$; $U_{\text{eff}} = 0.2\text{V}$

Да се определят:

I_{REF} , W/L , A_u , BW , GBW

$$A_{ud} = -\frac{g_{m2}}{g_{o2} + g_{o4}} = -\frac{\sqrt{2Kn \frac{W2}{L2} I_{ss}}}{(\lambda_1 + \lambda_3) I_{ss}} = -\frac{\sqrt{2 \cdot 100e-6 \cdot \frac{8}{2} \cdot 8e-6}}{(0,014 + 0,018) \cdot 8e-6} = -\frac{10}{0,032} = -312,5$$

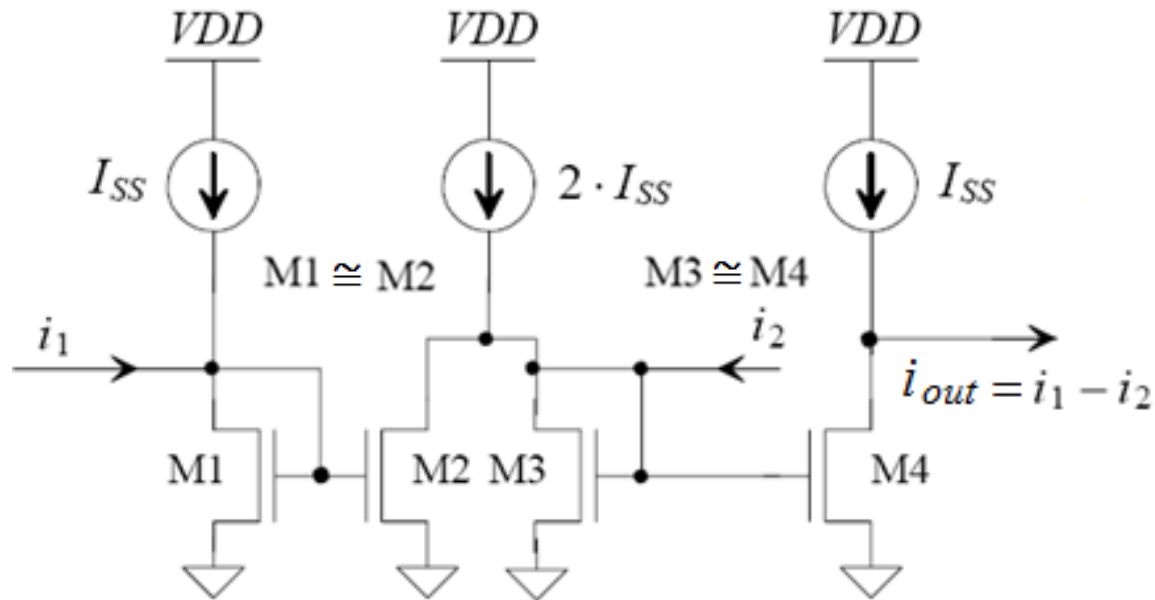
$$BW = \frac{1}{2\pi r_o C_L} \approx \frac{g_{o2} + g_{o4}}{2\pi C_L} = \frac{0,032 \cdot 8e-6}{2\pi 10e-12} = 4074 \text{ Hz}$$

$$GBW \approx |A_u| \cdot BW = 1,273 \text{ MHz}$$

$$SR = \frac{2I_{ss}}{C_L} = 1,6 \text{ V}/\mu\text{s}$$

$$V_o (f_{\text{max}} = GBW) = \frac{SR}{2\pi \cdot GBW} = 0,2\text{V}$$

Диференциален усилвател с токови входове



i_1, i_2 – диференциални входни токове

$$i_1 + i_2 = \text{const.} = I < I_{SS}$$

$$i_1 = \frac{I}{2} + i; \quad i_2 = \frac{I}{2} - i; \quad i_1 - i_2 = 2i$$

$$i_{D1} = I_{SS} + i_1 = I_{SS} + \frac{I}{2} + i = i_{D2}$$

$$i_{D3} = 2I_{SS} + i_2 - i_{D2} = 2I_{SS} + \left(\frac{I}{2} - i\right) - \left(I_{SS} + \frac{I}{2} + i\right) = I_{SS} - 2i = i_{D4}$$

$$i_{out} = I_{SS} - i_{D4} = I_{SS} - (I_{SS} - 2i) = 2i = i_1 - i_2$$

Приложение – при нисковолтови схеми с високо бързодействие

БЛАГОДАРЯ ЗА ВНИМАНИЕТО